

**REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE DEL COMPORTAMIENTO DE LAS  
CARGAS ELECTROSTÁTICAS MANIFESTADAS, ESTUDIADAS Y  
ANALIZADAS EN APLICACIONES INDUSTRIALES**

**PIEDY DEL MAR AGAMEZ ARIAS  
CRISTIAN ANDRÉS MORALES VÁSQUEZ**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR  
FACULTAD DE INGENIERÍAS - PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA E  
INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
CARTAGENA DE INDIAS D.T. Y C.**

**2011**

**REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE DEL COMPORTAMIENTO DE LAS  
CARGAS ELECTROSTÁTICAS MANIFESTADAS, ESTUDIADAS Y  
ANALIZADAS EN APLICACIONES INDUSTRIALES**

**PIEDY DEL MAR AGAMEZ ARIAS  
CRISTIAN ANDRÉS MORALES VÁSQUEZ**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de  
Ingenieros Electricistas**

**Director  
MSc. MARIO ROBERTO ARRIERA PATERNINA  
Ingeniero Electricista**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR  
FACULTAD DE INGENIERÍAS - PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA E  
INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
CARTAGENA DE INDIAS D.T. Y C.**

**2011**

*A Dios, a nuestros padres y hermanos,  
por su incondicional apoyo y acompañamiento durante el curso de esta importante  
etapa en nuestras vidas.*

*A nuestros amigos y profesores, por los inolvidables momentos compartidos.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Primeramente agradecemos a Dios, por permitirnos fortalecer nuestra vida profesional y personal con esta importante experiencia, pues cada evento vivido durante esta etapa de la vida, logró satisfacer nuestra existencia.

A la Universidad Tecnológica de Bolívar -UTB-, por todos los esfuerzos realizados para ofrecernos un completo y competitivo desarrollo profesional, y a nuestros profesores, por todos los conocimientos transmitidos.

Piedy Del Mar Agamez Arias agradece especialmente:

Al Programa de Becas Premio a la Excelencia y Talento Caribe y por supuesto a Argos, por darme la hermosa oportunidad de ingresar a la UTB, para cumplir con el sueño de formarme como profesional.

Al señor Álvaro Críales y a la señorita Helena Castellón, por el apoyo brindado a través de cada una de sus palabras y sus acciones.

## CONTENIDO

LISTA DE ABREVIATURAS

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABLAS

LISTA DE ANEXOS

INTRODUCCIÓN

RESUMEN

|  |    |
|--|----|
| 1. OBJETIVOS .....   | 16 |
| 1.1 OBJETIVO GENERAL .....   | 16 |
| 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....  | 16 |
| 2. REVISIÓN HISTÓRICA DE LAS CARGAS ELECTROSTÁTICAS Y SU EVOLUCIÓN .....                         | 17 |
| 2.1 ¿CÓMO SE ORIGINAN LAS CARGAS ELECTROSTÁTICAS?.....   | 22 |
| 2.2 ANÁLISIS FÍSICO-MATEMÁTICO.....  | 26 |
| 2.3 MATERIALES ELÉCTRICOS .....  | 30 |
| 2.3.1 Conductores .....  | 30 |
| 2.3.2 Aislantes .....  | 31 |
| 2.3.3 Semiconductores .....  | 31 |
| 2.3.4 Superconductores.....  | 34 |
| 3. REVISIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE CARGAS ELECTROSTÁTICAS .....                                   | 37 |
| 3.1 APROVECHAMIENTO DE LAS CARGAS ELECTROSTÁTICAS EN APLICACIONES Y/O PROCESOS INDUSTRIALES..... | 37 |
| 3.1.1 Precipitador Electrostático.....   | 38 |
| 3.1.2 Pintura Electrostática.....  | 39 |

|  |    |
|--|----|
| 3.1.3 Electrofotografía o Xerografía .....   | 40 |
| 3.1.4 Generador de Van de Graaff .....   | 41 |
| 3.1.5 Lápiz triboeléctrico .....   | 43 |
| 3.2 DESCARGAS ELECTROSTÁTICAS O ESD.....   | 44 |
| 3.2.1 Descargas sobre equipos y/o dispositivos electrónicos .....  | 46 |
| 3.2.1.1 Descargas electrostáticas indirectas .....   | 46 |
| 3.2.1.2 Descargas electrostáticas directas.....  | 49 |
| 3.2.2 Descargas electrostáticas donde participa el cuerpo humano .....   | 49 |
| 3.2.3 Interacción entre los SPT y eventos de descargas electrostáticas...57  |    |
| 3.3 MANIFESTACIONES DE CARGAS ELECTROSTÁTICAS EN PROCESOS INDUSTRIALES .....   | 60 |
| 3.3.1 Acumulación de cargas electrostáticas en refrigerantes de transformadores .....  | 61 |
| 3.3.2 Acumulación de cargas electrostáticas en procesos que utilizan rodillos.....   | 62 |
| 3.3.3 Acumulación de carga electrostática en discos duros.....   | 64 |
| 3.3.4 Acumulación de cargas electrostáticas en el interior de silos industriales .....   | 65 |
| 3.3.5 Acumulación de cargas electrostáticas y flujo de corriente ductos para transporte de combustibles. ....                            | 67 |
| 3.4 RIESGOS ASOCIADOS A CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS Y DESCARGAS ELECTROSTÁTICAS.....  | 68 |
| 4. CORRELACIÓN ENTRE LA REVISIÓN TEMÁTICA Y LA MANIFESTACIÓN DE CARGAS ELECTROSTÁTICAS EN EMBARCACIONES QUE SE ENCUENTRAN EN TIERRA..... | 71 |

|   |    |
|---|----|
| 4.1 PROCEDIMIENTOS DE REPARACIÓN Y/O MANTENIMIENTO DE EMBARCACIONES EN TIERRA .....   | 72 |
| 4.1.1 Capacidad de levante de embarcaciones, en los astilleros .....  | 73 |
| 4.1.2 Tecnologías para poner en seco las embarcaciones .....  | 73 |
| 4.1.3 Actividades realizadas previo al inicio de las labores de reparación y/o mantenimiento de embarcaciones.....  | 76 |
| 4.1.4 Actividades realizadas durante las labores de reparación y/o mantenimiento de embarcaciones.....  | 77 |
| 4.2 MANIFESTACIÓN DE CARGAS ELECTROSTÁTICAS DURANTE LA REPARACIÓN Y/O MANTENIMIENTO DE EMBARCACIONES .....  | 78 |
| 4.3 RELACIÓN ENTRE LA TEMÁTICA ESTUDIADA Y LA PRESENCIA DE CARGAS ELECTROSTÁTICAS EN LOS CASCOS DE LAS EMBARCACIONES .....  | 79 |
| 4.3.1 Descargas directas o indirectas sobre equipos electrónicos.....   | 80 |
| 4.3.2 Descargas electrostáticas y el cuerpo humano .....  | 81 |
| 4.3.3 Descargas electrostáticas y SPT.....  | 82 |
| 5. PROPUESTA METODOLÓGICA PARA ESTUDIAR Y ANALIZAR LAS MANIFESTACIONES DE CARGAS ELECTROSTÁTICAS EN LOS CASCOS DE EMBARCACIONES QUE SE ENCUENTRAN EN TIERRA ..... | 84 |
| 6. CONCLUSIONES .....   | 91 |
| 7. REFERENCIAS .....  | 94 |

## LISTA DE ABREVIATURAS

|                |  |
|----------------|--|
| A              | Amperios   |
| kA             | Kilo Amperios  |
| a.c.           | Antes de Cristo  |
| Ch             | Capacitancia del Cuerpo Humano   |
| cm             | Centímetro   |
| $\Delta$       | Diferencia de Potencial  |
| ESD            | Descarga Electrostática (electrostaticdischarges por siglas en inglés) |
| eV             | ElectrónVolts  |
| F              | Faradio  |
| kHz            | Kilo Hertz   |
| kV             | Kilo Voltios   |
| mA             | MiliAmperios   |
| m              | Metro  |
| m <sup>2</sup> | Metro cuadrado   |
| nF             | Nano Faradio   |
| nS             | Nano Segundos  |
| pF             | Pico Faradio   |
| Rh             | Resistencia del Cuerpo Humano  |
| SPT            | Sistemas de Puesta a Tierra  |
| UTB            | Universidad Tecnológica de Bolívar                                     |
| $\mu$ S        | Micro Segundos   |
| V              | Voltios  |

## LISTA DE FIGURAS

|   | Pág. |
|---|------|
| Figura 1. La máquina electrostática.....  | 19   |
| Figura 2. Experimento en el que se carga eléctricamente a una mujer y se descarga al besar a su novio. .... | 19   |
| Figura 3. Balanza de torsión. ....  | 19   |
| Figura 4. El telégrafo eléctrico. ....  | 22   |
| Figura 5. Electrización por contacto y/o frotación. ....  | 23   |
| Figura 6. Electrización por carga iónica. ....  | 24   |
| Figura 7. Electrización por inducción. ....   | 25   |
| Figura 8. Electrización por polarización. ....  | 25   |
| Figura 9. Estructura de bandas de materiales eléctricos a 0°K.....  | 30   |
| Figura 10. Variación de resistencia vs temperatura, para superconductores.....                              | 34   |
| Figura 11. Precipitador electrostático del tipo placa-alambre.....  | 38   |
| Figura 12. Funcionamiento esquemático del proceso xerográfico actual. ....                                  | 41   |
| Figura 13. Generador de Van de Graaff. ....   | 42   |
| Figura 14. Prueba de identificación a material plástico con lápiz triboeléctrico.....                       | 43   |
| Figura 15. Esquema de funcionamiento lógico del lápiz triboeléctrico.....                                   | 44   |
| Figura 16. Forma de onda característica de una descarga electrostática.....                                 | 46   |
| Figura 17. Configuración de espira con 1m <sup>2</sup> de área, para estudio y análisis de caso. ....       | 47   |
| Figura 18. Esquema de circuito electrónico bajo prueba. ....  | 49   |
| Figura 19. Modelo circuital del cuerpo humano para las ESD. ....  | 50   |
| Figura 20. Representación esquemática de interacción entre cuerpos. ....                                    | 51   |
| Figura 21. Curva de tensión de una persona cuando se baja de un automóvil.....                              | 53   |
| Figura 22. Modelo del cuerpo humano según especificaciones del caso 1. ....                                 | 54   |
| Figura 23. Modelo del cuerpo humano según especificaciones del caso 2. ....                                 | 54   |

|   |    |
|---|----|
| Figura 24. Clasificación de las formas de onda de las ESD según IEEE.....                                 | 56 |
| Figura 25. Sistemas de puesta a tierra bajo estudio. ....   | 58 |
| Figura 26. Formas de onda de ESD medidas y simuladas, para SPT mallado.....                               | 59 |
| Figura 27. Formas de onda de ESD medidas y simuladas, para SPT radial. ....                               | 59 |
| Figura 28. Esquema de circulación de aceite forzado en un transformador. ....                             | 61 |
| Figura 29. Esquema de acumulación de cargas en transporte de película de materiales en rodillos. ....     | 63 |
| Figura 30. Esquema de acumulación de cargas en enrollado y desenrollado de papel. ....                    | 63 |
| Figura 31. Esquema de prueba para analizar acumulación de cargas en silos. ....                           | 66 |
| Figura 32. Distribución de cargas eléctricas en el proceso de transporte de combustible.....              | 67 |
| Figura 33. Puesta en seco de un submarino con tecnología de dique seco. ....                              | 74 |
| Figura 34. Puesta en seco de embarcación con tecnología de dique flotante. ....                           | 74 |
| Figura 35. Puesta en seco de embarcación con tecnología de varadero. ....                                 | 75 |
| Figura 36. Puesta en seco de embarcación con tecnología de sincroelevador. ....                           | 75 |
| Figura 37. Descanso de embarcaciones sobre carros de quilla, para transporte a posiciones de varada. .... | 76 |

## LISTA DE TABLAS

|  | Pág. |
|--|------|
| Tabla 1. Aportes realizados durante los siglos XVII y XVIII. ....  | 18   |
| Tabla 2. Aportes realizados durante los siglos XIX y XX. ....  | 20   |
| Tabla 3. Análisis físico-matemático de cargas estáticas. ....  | 26   |
| Tabla 4. Análisis físico-matemático de materiales electrizados y cargas en movimiento. ....                  | 27   |
| Tabla 5. Tabla de verdad del funcionamiento lógico del lápiz triboeléctrico. ....                            | 44   |
| Tabla 6. Valores característicos de $R_h$ y $C_h$ del cuerpo humano según diversas normas. ....              | 50   |
| Tabla 7. Magnitudes eléctricas medidas durante experimentación de ESD propiciadas por el cuerpo humano. .... | 55   |

## LISTA DE ANEXOS

|   | Pág. |
|---|------|
| Anexo 1. Informe de visita técnica efectuada a un astillero para embarcaciones mayores, en la ciudad de Cartagena .....                         | 99   |
| Anexo 2. Formato de encuestas aplicado al personal de reparación y/o mantenimiento de embarcaciones en tierra .....                             | 118  |
| Anexo 3. Matriz de la revisión del estado del arte del comportamiento de las cargas electrostáticas en diversas aplicaciones industriales ..... | 124  |

## RESUMEN

Las manifestaciones de carga electrostáticas en elementos y/u objetos han sido observadas y estudiadas desde miles de años antes de Cristo por los chinos y griegos, quienes notaron que al frotar materiales como el ámbar o el topacio con pieles y telas suaves, eran atraídos pequeños elementos hacia estos materiales; en ese momento, el fenómeno fue descrito como el producto de una fuerza que actuaba a distancia, sin necesidad de unión mecánica entre los materiales.

En siglos posteriores, importantes estudiosos de las ciencias se interesaron en experimentar y analizar el fenómeno, lo que propició la generación de conocimiento de las cargas electrostáticas, la electricidad y el magnetismo. Durante estos estudios, se evidenció que no solo el ámbar presentaba tal comportamiento, si no que otros materiales como el vidrio también manifestaron acciones de atracción o repulsión al ser puestos bajo prueba.

Esta importante conclusión permitió que William Gilbert propusiera la existencia de dos tipos de carga eléctrica, una atractiva y una repulsiva; planteamiento que fue mejorado y complementado por Franklin, asumiendo que el fenómeno era como un fluido que circulaba entre materiales y observando que los cuerpos al ser frotados acumulaban la carga en ciertos lugares; por lo que se plantea que las cargas son positivas y negativas con acciones de atracción y/o repulsión.

Posteriormente, Coulomb concluyó que la fuerza manifestada durante los experimentos, era proporcional a la cantidad de carga que existe en el material que produce la fuerza y a la cantidad de carga en el material sobre el cual actúa. Pero es hasta mediados del siglo XIX que Michael Faraday plantea consideraciones y conclusiones formales al respecto, apoyado en los experimentos sobre la electrólisis que realizó y que le permitieron descubrir la

relación entre la electricidad y la materia[29]; luego, los trabajos de Joseph John Thomson al descubrir el electrón y de Robert Millikan al medir su carga, fueron de gran ayuda para conocer la naturaleza discreta de la carga.

En la actualidad, el estudio y análisis de las manifestaciones de cargas electrostáticas se han trasladado a entornos más complejos como los que proveen las aplicaciones y procesos que se desarrollan en la industria; lo que ha propiciado que se concentren esfuerzos por establecer el origen de las mismas, por profundizar en su manifestación y comportamiento, y por supuesto, por plantear soluciones que mitiguen los riesgos asociados con su presencia.

En situaciones de riesgo, el factor determinante es la acumulación de las cargas en las superficies metálicas aisladas o plásticas; estas acumulaciones se presentan por presencia de campos eléctricos y/o por descargas electrostáticas [28]. Para contrarrestar este fenómeno, en el caso de los materiales conductores es indispensable minimizar la acumulación de la carga maximizando la disipación de las mismas a tierra, mientras que en el caso de materiales no conductores la reducción de la carga es mejorada con el uso de eliminadores electrostáticos; en especial, las descargas electrostáticas deben su importancia a los serios problemas que causan en el cuerpo humano [5], a los dispositivos electrónicos [34] y los procesos de transporte y almacenamiento de materiales y combustibles, entre otras aplicaciones y/o procesos desarrollados en la industria.

En el caso particular de la industria naval, se han manifestado presencia de cargas electrostáticas en los cascos de las embarcaciones que se encuentran en tierra y que arriban a los muelles para que se les realice actividades de reparación y/o mantenimiento; por ello, la revisión del estado del arte del comportamiento de las cargas electrostáticas en aplicaciones y procesos industriales permitirá establecer una metodología con la que se estudie y analice que factores originan la presencia de estas cargas y como se puede mitigar su presencia.

## INTRODUCCIÓN

Las progresivas manifestaciones de cargas electrostáticas en diversas aplicaciones y procesos industriales, han propiciado que se desplieguen importantes esfuerzos para controlar y mitigar su presencia, pues frecuentemente estas cargas al ponerse en movimiento generan descargas que no solo afectan las aplicaciones y procesos sino que también afectan al ser humano.

Los riesgos que representan estas cargas son debidos a la acción o presencia de campos eléctricos y/o descargas electrostáticas sobre superficies metálicas aisladas o plásticas, puesto que propician la acumulación de cargas electrostáticas y potencializan la circulación de las mismas por un camino conductor a tierra.

Los campos eléctricos generan acumulaciones de cargas que pueden atraer polvos y suciedades a las superficies de productos y procesos, atraen elementos suaves y livianos a metales que se encuentren aterrizados, bloquean el transporte y/o procesamiento de productos, dañan componentes electrónicos, entre otros problemas registrados. Por su parte, las descargas electrostáticas pueden originar incendios y explosiones debido a la ignición de vapores combustibles y nubes de residuos, choques físicos, daños a componentes electrónicos, entre otros problemas que también se ha registrado [28].

Tomando en consideración la importancia que representan estos riesgos tanto para el ser humano como para las aplicaciones o procesos, y relacionándolos con las manifestaciones de cargas y descargas electrostáticas presentadas en diversas actividades que se adelantan en la industria naval, es pertinente anotar, que se hace necesario establecer una metodología que permita determinar qué factores originan la presencia de estas cargas y como se puede mitigar el impacto negativo asociado con su presencia.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Revisar el estado del arte del comportamiento de las cargas electrostáticas manifestadas, estudiadas y analizadas en diferentes aplicaciones industriales, para relacionar las condiciones, consideraciones y efectos presentados en dichas documentaciones, con las manifestaciones de estas cargas en los cascos de las embarcaciones navales que se reparan y/o mantienen en tierra; permitiendo así, proponer una metodología para estudiar y analizar este tipo de cargas, en este caso específico.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Realiza una revisión histórico-teórica del origen de las cargas electrostáticas y análisis físico-matemáticos, para determinar su evolución y conocer los principales factores que intervienen en la producción de las mismas.
- Revisar el comportamiento de las cargas electrostáticas en diversas aplicaciones industriales, para conocer los efectos positivos o aprovechamiento y los efectos negativos o problemas y riesgos, que se están presentando gracias a la manifestación de las mismas en la industria.
- Relacionar las condiciones, consideraciones y efectos presentados por las cargas electrostáticas en las diferentes documentaciones, con las manifestaciones de cargas electrostáticas en los cascos de las embarcaciones navales que se reparan y/o mantienen en tierra.
- Proponer una metodología para estudiar y analizar el comportamiento de las cargas electrostáticas que se originan en los cascos de las embarcaciones navales que se reparan y/o mantienen en tierra.

## 2. REVISIÓN HISTÓRICA DE LAS CARGAS ELECTROSTÁTICAS Y SU EVOLUCIÓN

Los primeros estudios de manifestaciones de electricidad se atribuye a los chinos, quienes analizaron este y otros fenómenos como el magnetismo. Según documentaciones, en el 2637a.c. durante el reinado del emperador Huáng Di se presentó un dispositivo que se asemeja a lo que hoy es un compás, el cual fue usado durante el desarrollo de una batalla [16]; así mismo, en el 1022 a.c. colocaban elementos filosos a flotar, para que les indicara direcciones. Como resultado de estas y otras experimentaciones, se obtuvo en el siglo VII a.c., una importante herramienta para el desarrollo de las civilizaciones humanas, la brújula [29].

Más tarde los griegos, encabezados por el filósofo Tales de Mileto notaron que al frotar un trozo de ámbar, se atraían objetos livianos como trozos de paja y hojas; aunque no se llegó a definir por qué ocurría esto, si se creía que algo, “la electricidad”, residía en el objeto frotado. También, reconocieron la presencia de fuerzas magnéticas al observar el fenómeno que se presentaba cuando la piedra magnetita era atraída por el hierro (la palabra magnético, proviene de *Magnesia*, nombre de la provincia griega donde se encontró por primera vez la magnetita).

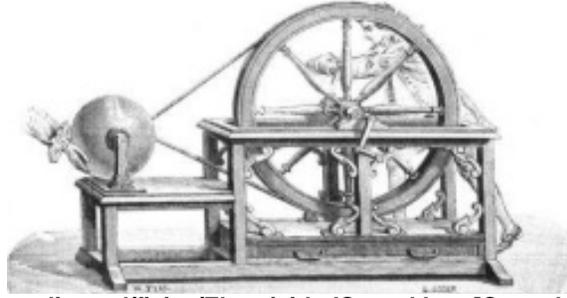
En siglos posteriores, exactamente durante el XVII y XVIII, importantes estudiosos de las ciencias se dedicaron a investigar, experimentar y analizar diversos fenómenos relacionados con las cargas electrostáticas, la electricidad y el magnetismo; así mismo, algunos de estos estudiosos construyeron diferentes maquinas y elementos para usar en el curso de sus experimentaciones o como resultado de las mismas. En la tabla 1, se presenta de manera detallada y cronológica dicha información.

**Tabla 1. Aportes realizados durante los siglos XVII y XVIII.**

| Siglo       | Estudioso  | Aportes realizados  |
|-------------|--|---|
| Siglo XVII  | William Gilbert,<br>Físico y Medico Inglés                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Verificó y comprobó que otros materiales y sustancias se comportaban como el ámbar.</li> <li>• Clasificó los cuerpos y materiales en eléctricos (aislantes) y aneléctricos (conductores).</li> <li>• Expresó la fuerza eléctrica, como la atracción o repulsión manifestada por los materiales bajo prueba.</li> <li>• Su mayor aporte a la ciencia lo obtuvo con su demostración experimental de magnetismo terrestre.</li> </ul> |
|             | Otto Von Guericke,<br>Físico Alemán                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Construyó la primera máquina electrostática capaz de producir una descarga al apoyar la mano sobre la esfera de azufre, ver figura 1.</li> </ul>   |
| Siglo XVIII | Stephen Gray,<br>Físico Inglés                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Estudió la conductibilidad de los cuerpos.</li> <li>• Descubrió la necesidad de aislar de tierra el conductor para que circulara corriente.</li> <li>• Clasificó los materiales como eléctricamente conductores y aislantes</li> </ul>   |
|             | Charles Du Fay,<br>Científico Francés                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Estudió fenómenos eléctricos que le permitieron establecer la existencia de dos tipos de carga eléctrica.</li> </ul>   |
|             | No Registra [16]   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Se realizaron pequeños trabajos y experimentaciones relacionadas con cargas electrostáticas, ver figura 2.</li> </ul>  |
|             | Benjamín Franklin,<br>Político y Científico Estadounidense | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Investigó diferentes fenómenos eléctricos e inventó el pararrayos.</li> <li>• Estudió y clasificó las sustancias como eléctricamente positivas y negativas.</li> <li>• Confirmó que las tormentas son fenómenos de tipo eléctrico y demostró que los rayos son descargas de tipo electrostático.</li> </ul>  |
|             | Charles Coulomb,<br>Físico e Ingeniero Francés             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Estudió e investigó acerca del magnetismo, rozamiento y electricidad.</li> <li>• Inventó la balanza de torsión para medir la fuerza eléctrica entre 2 cargas, ver figura 3</li> <li>• Estableció que la fuerza eléctrica es inversamente proporcional a la separación entre las cargas y proporcional al producto de las mismas.</li> </ul>  |
|             | Luigi Galvani,<br>Medico y Físico Italiano                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Precursor de los estudios de los efectos eléctricos en los nervios y músculos.</li> </ul>  |
|             | Alessandro Volta,<br>Físico Italiano                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ideó experimentos como la ignición de gases mediante una chispa y desarrolló la pila de Volta.</li> </ul>  |

Fuente: R. Serway, R. Beichner, "Física para ciencias e ingeniería", 5ed. Tomo II, pp. 708-1075, México D.F. 2004.

Figura 1. La máquina electrostática.



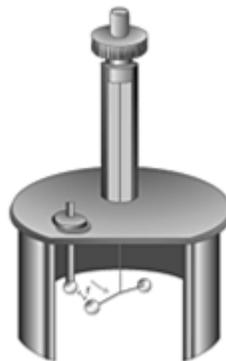
Fuente: <http://www.profesorenlinea.cl/fisica/ElectricidadCronol.htm> [Consulta: Junio 16 de 2010].

Figura 2. Experimento en el que se carga eléctricamente a una mujer y se descarga al besar a su novio.



Fuente: J. Lewiner, "Space Charge and Polarization in Insulators: a Long History with a Promising Future", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 17 Issue: 4, pp. 1098, Aug. 2010

Figura 3. Balanza de torsión.



Fuente: <http://correorichy.blogspot.com/2009/07/la-balanza-de-torsion.html> [Consulta: Junio 16 de 2010].

A pesar de todos estos adelantos, durante los siglos XIX y XX, otro grupo de estudiosos presentaron grandes avances que no solo propiciaron la creación de

maquinas o elementos, si no que se constituyeron en el punto de partida para presentar explicaciones y soluciones contundentes a fenómenos de tipo eléctrico que les inquietaba. En la tabla 2, se presenta de manera detallada y cronológica dicha información.

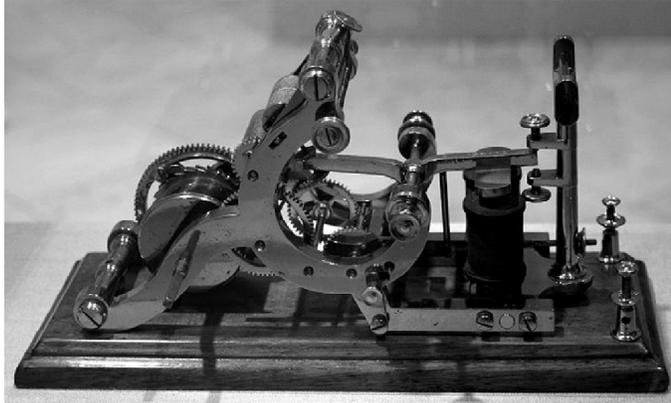
**Tabla 2. Aportes realizados durante los siglos XIX y XX.**

| Siglo     | Estudioso  | Aportes realizados  |
|-----------|--|---|
| Siglo XIX | Hans Oersted,<br>Físico y Químico Danés            | <ul style="list-style-type: none"> <li>Lideró estudios de agujas imantadas por efecto de campos magnéticos, pero nunca logró presentar una explicación satisfactoria que sustentara el fenómeno.</li> <li>Fue el primero en aislar y producir aluminio, utilizando la electrolisis.</li> </ul>  |
|           | André Marie Ampere,<br>Físico y Matemático Francés | <ul style="list-style-type: none"> <li>Demostó la existencia de campo magnético en un conductor cuando por el circulaba una corriente.</li> <li>El estudio y análisis de la relación existente entre la electricidad y el magnetismo le permitió establecer la conocida ley de Ampere.</li> <li>Demostó que dos conductores paralelos por los cuales circula corriente, se atraen si circulan en el mismo sentido y se repelen si lo hacen en sentido opuesto.</li> </ul> |
|           | Samuel Morse,<br>Pintor e Inventor Estadounidense  | <ul style="list-style-type: none"> <li>La revisión y análisis de los estudios realizados por Ampere, le permitieron concebir la idea de crear un equipo que comunicara a grandes distancias, presentando así, el telégrafo eléctrico, ver figura 4.</li> </ul>  |
|           | Georg Simon Ohm,<br>Físico Alemán                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Sus estudios de la relación existente entre la corriente eléctrica y la FEM, le permitieron presentar la conocida ley de Ohm.</li> </ul>   |
|           | Michael Faraday,<br>Físico y Químico Ingles        | <ul style="list-style-type: none"> <li>Descubrió y experimentó los efectos de la inducción magnética. Esto permitió que posteriormente se crearan generadores, transformadores y motores.</li> <li>Demostó la inducción de corriente por acción de campos producidos por otras corrientes o por un elemento magnetizado.</li> <li>Introdujo el concepto de líneas de fuerza para representar los campos magnéticos.</li> </ul>  |
|           | Heinrich Lenz,<br>Físico Estonio                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Estudió y formuló la ley que lleva su nombre; esta, establece que el sentido de las corrientes o FEM inducida siempre se opone a la variación de flujo que la produce.</li> <li>Lideró investigaciones de la conductividad de los cuerpos en relación con la temperatura.</li> </ul>   |

|          |  |  |
|----------|--|--|
|          | James Prescott Joule,<br>Físico Inglés                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Amplió los estudios de Lenz, estudió la energía y sus aplicaciones técnicas.</li> <li>• Formuló la ley que lleva su nombre; esta, establece que todo cuerpo conductor recorrido por una corriente eléctrica desprende una cantidad de calor equivalente al trabajo realizado por el campo eléctrico para transportar las cargas de un lugar a otro.</li> </ul>  |
|          | León Foucault,<br>Físico Francés                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Demostró la rotación de la tierra mediante su famoso péndulo y midió la velocidad de la luz.</li> <li>• Demostró la existencia de corrientes parasitas en los núcleos de los circuitos magnéticos.</li> </ul>   |
|          | Gustav Kirchhoff,<br>Físico Alemán                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Estudió y presentó las leyes que relacionan la distribución de corrientes y tensiones en un circuito.</li> <li>• Desarrolló las bases teóricas de la espectroscopía.</li> </ul>   |
|          | James Clerk Maxwell,<br>Físico y Matemático<br>Escocés | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Investigó la división de los colores y los principios de la termodinámica.</li> <li>• Demostró que la naturaleza de los fenómenos luminosos y electromagnéticos era la misma, apoyándose en la demostración de que ambos se propagan a la velocidad de la luz.</li> <li>• Amplió las investigaciones de Faraday y demostró la relación entre el campo eléctrico y el magnético.</li> <li>• Formulo las 4 ecuaciones diferenciales fundamentales en el electromagnetismo.</li> </ul> |
| Siglo XX | John Hopkinson,<br>Físico e Ingeniero<br>Británico     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Descubrió y trabajó con el sistema trifásico de generación y distribución de la corriente eléctrica.</li> <li>• Profundizó en los problemas de teoría electromagnética propuestos por Maxwell y posteriormente dió a conocer el principio de funcionamiento de los motores síncronos.</li> </ul>  |
|          | Nicola Tesla,<br>Ingeniero e Inventor<br>Croata        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Estudió y desarrolló el primer sistema práctico para generar y transmitir corriente alterna, así como el primer motor eléctrico de corriente alterna.</li> <li>• Dentro de sus inventos se destacan los generadores de alta frecuencia y la bobina de Tesla.</li> </ul>   |
|          | Robert Milikan,<br>Físico Estadounidense               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Estudió los efectos del campo eléctrico y gravitatorio sobre una gota de agua y de aceite.</li> <li>• Descubrió que la carga eléctrica siempre se presenta en algún múltiplo integral de cierta unidad fundamental de carga (la establecida por el electrón); lo que le permitió establecer que la carga existe como paquetes discretos.</li> </ul>   |

Fuente: R. Serway, R. Beichner, "Física para ciencias e ingeniería", 5ed. Tomo II, pp. 708-1075, México D.F. 2004.

Figura 4. El telégrafo eléctrico.



Fuente: B. Bowers, "Inventors Of de Telegraph", *Proceedings of the IEEE*, vol. 90 Issue: 3, pp. 438, Mar 2002.

## 2.1 ¿CÓMO SE ORIGINAN LAS CARGAS ELECTROSTÁTICAS?

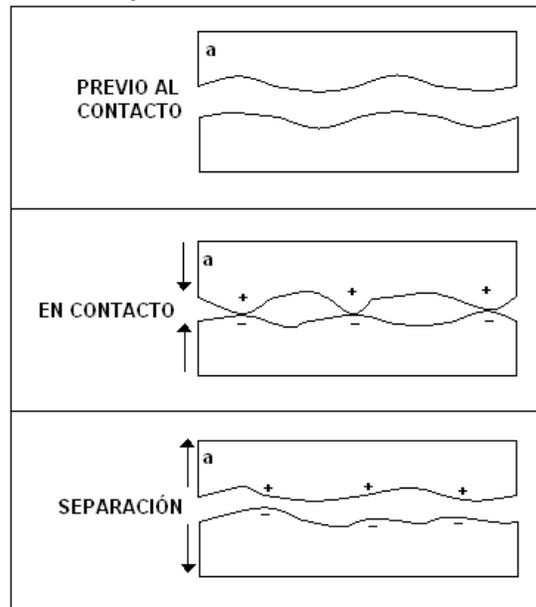
La electrostática comprende el campo de la física que estudia los fenómenos relacionados con la presencia, distribución y comportamiento de las cargas eléctricas que se concentran en un material, cuerpo u objeto, el cual se considera, estáelectrizado; estas cargas pueden ser de dos tipos, positivas o negativas.

Las características de electrización de un cuerpo, como magnitud y polaridad, se encuentran relacionadas con la naturaleza del mismo, es decir, con su composición química y estado físico, principalmente. Para obtener ese estado de electrización se cuenta con 4 métodos: carga por contacto y/o frotación, carga por inducción, la carga iónica y carga por polarización [26], [11].

- Carga por contacto y/o frotación: es la forma más común de electrizar un material, cuerpo u objeto, utilizando un procedimiento de contacto-separación. Específicamente, se presenta cuando dos materiales de distintas condiciones eléctricas entran en contacto; en ellos, las cargas no se generan sino que se separan y transfirieren entre sus superficies para neutralizar las diferencias

existentes; durante la separación las cargas no retornan al material original, si no que quedan remanentes si se dan las condiciones ambientales ideales (por ejemplo, un día seco), hasta que encuentren la forma de neutralizarse. En la figura 5, se ilustra el comportamiento presentado por dos superficies eléctricamente distintas que se cargan por este método; en esta, el material **a** es más positivo en la serie triboeléctrica, que el material **b** [18].

**Figura 5. Electrización por contacto y/o frotación.**

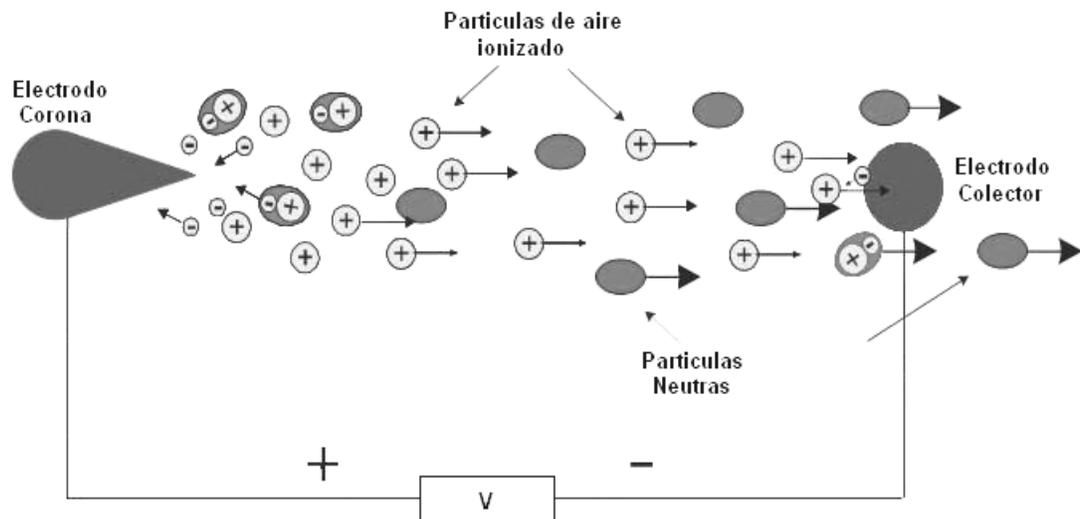


Fuente: K. Robinson, "Electrostatic issues in Roll –to-Roll manufacturing operations", *Conference record of the 2007 IEEE Industry Applications Conference*, pp 781-786, Sept 2007.

- **Carga iónica:** considera el uso de ionización localizada del aire a través de una descarga estable conocida como descarga corona, para producir carga estática; este comportamiento se presenta cuando existe un campo eléctrico significativamente no uniforme durante la aplicación de una muy alta tensión entre dos electrodos con diferencias geométricas, así como se presenta en la figura 6. Dependiendo de la polaridad de la tensión aplicada se producirá una nube de iones monoplares, los cuales pueden ser utilizados para bombardear una partícula o un material proporcionándole así, una carga neta.

Es un método controlado y confiable para aplicar carga cuya ventaja es que el material puede ser o no conductor; en la práctica, la descarga corona es producida por un cable metálico con diámetros entre  $10^{-4}$  y  $10^{-2}$  m que se conecta a una fuente de tensión con voltajes entre 1kV y 100kV a distancias muy cortas (entre  $10^{-2}$  y 0,5m), que atraen suciedades, residuos, polvos y elementos particulados [1].

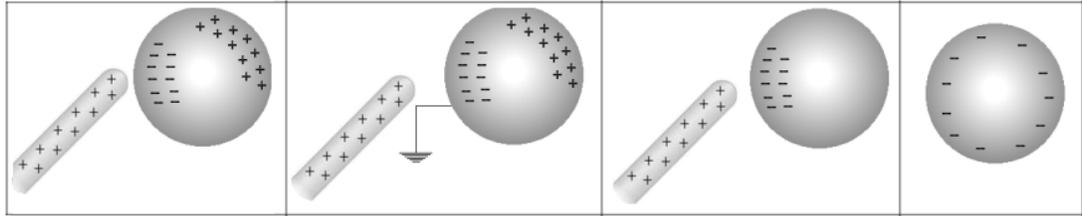
Figura 6. Electrización por carga iónica.



Fuente: R. Serway, R. Beichner, "Física para ciencias e ingeniería", 5ed. Tomo II, pp. 835, México D.F. 2004.

- Carga por inducción: esta forma de cargar eléctricamente un material, cuerpo u objeto, se obtiene sin necesidad de contacto físico entre los materiales. La electrización se presenta cuando un material conductor sin carga y aterrizado, es expuesto al campo eléctrico generado por un material que se encuentra cargado positiva o negativamente; la acción del campo eléctrico de dicho material propicia que las cargas de igual polaridad que se encuentran en el conductor se alejen lo suficiente, dirigiéndose a tierra. Como consecuencia de este comportamiento en el conductor, se manifestará una carga con polaridad opuesta al material que se aproxima, siempre y cuando sea retirada la conexión a tierra antes de retirar el material cargado. Ver figura 7.

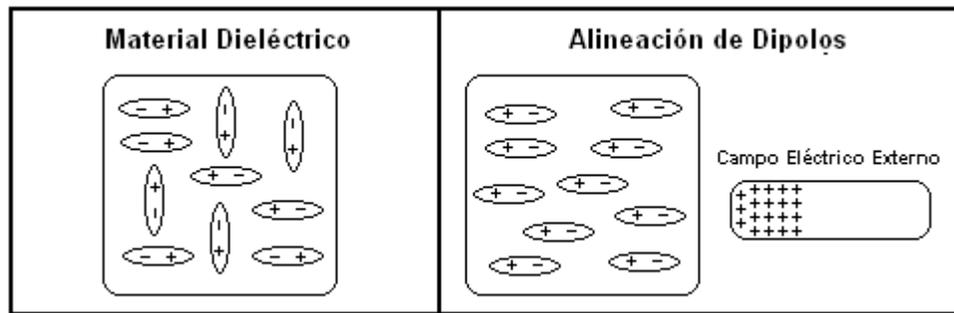
Figura 7. Electrización por inducción.



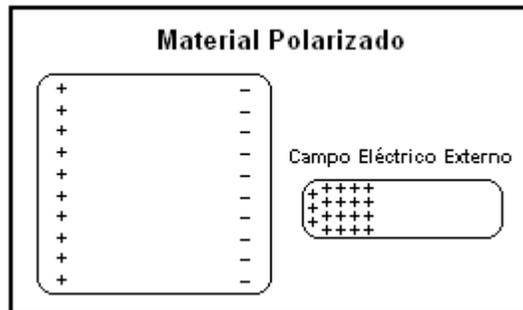
Fuente: R. Serway, R. Beichner, "Física para ciencias e ingeniería", 5ed. Tomo II, pp. 712, México D.F. 2004.

- Carga por polarización: se presenta únicamente en dieléctricos debido a que están conformados por moléculas polares o dipolos; en estado natural, los dipolos que comprende el material aislante se encuentran desordenados pero al exponerlos a un campo eléctrico se produce un momento de torsión sobre los dipolos que provoca su alineación en la dirección que impone el campo y un momento inducido que provoca la separación de carga[37]. Ver figura 8.

Figura 8. Electrización por polarización.



a) Alineación de dipolos en un material dieléctrico por exposición a un campo eléctrico.



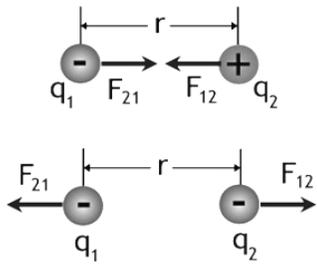
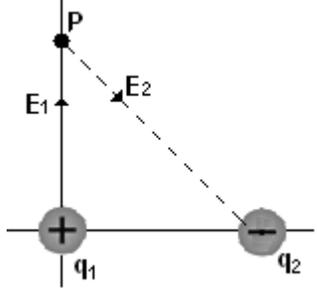
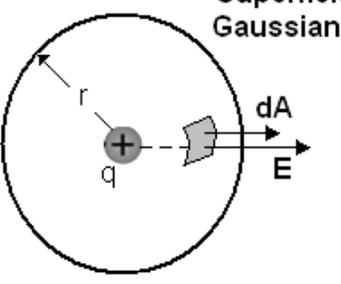
b) Material dieléctrico polarizado.

Fuente: W. Hayt, "Teoría Electromagnética", 5<sup>ta</sup> Ed., Mc Graw-Hill, pp. 146-158, México 2005.

## 2.2 ANÁLISIS FÍSICO-MATEMÁTICO

El desarrollo y evolución de la electrostática trajo consigo que importantes conclusiones fueran representadas con expresiones físico-matemáticas, como las que se presenta en la tabla 3; las cuales, se convirtieron en el punto de partida para que posteriormente se realizaran análisis eléctricos más complejos.

Tabla 3. Análisis físico-matemático de cargas estáticas.

| Aporte          | Representación gráfica  | Análisis presentados   |
|-----------------|---|--|
| Ley de Coulomb  |    | <p>—</p> <p>La fuerza eléctrica entre dos pequeñas esferas cargadas es directamente proporcional al producto de las magnitudes de las cargas e inversa a la separación entre ellas. La fuerza, es atractiva si las cargas son de signo opuesto y repulsiva si son de signos iguales [29], [18].</p>  |
| Campo Eléctrico |  | <p>—</p> <p>La magnitud del campo eléctrico en un punto P del espacio, originado por una carga q, esta dado por la relación entre la carga y el cuadrado de la distancia entre el punto y la carga.</p> <p>Para el caso en el que se considera más de una carga, el campo eléctrico en el punto P, está determinado por la suma algebraica del aporte que realiza cada una de esas cargas.</p> |
| Ley de Gauss    |  | <p>Establece la relación entre el flujo eléctrico neto a través de una superficie cerrada y la carga encerrada en la superficie.</p> <p>El campo eléctrico al interior de un material aislado o aislante que no rodea ninguna carga, es cero si su superficie es cerrada. Sin embargo, la carga acumulada en la superficie produce un campo hacia el exterior del material.</p>                |

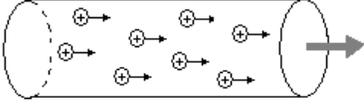
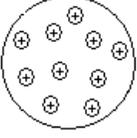
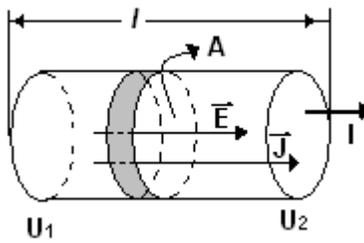
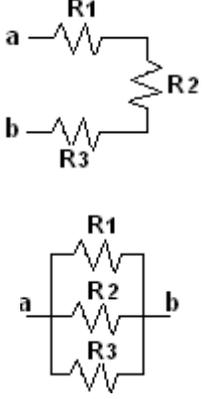
|                         |  |  |
|-------------------------|--|--|
| Diferencia de Potencial |  | <p style="text-align: center;">— —</p> <p>El trabajo efectivo que permite el transporte de una carga desde un punto A hasta uno B, debido a la acción de un campo eléctrico externo, se conoce como diferencia de potencial. Para el caso en el que el punto B se encuentre muy lejano, se asume entonces que el potencial eléctrico en ese punto es cero.</p> |
|-------------------------|--|--|

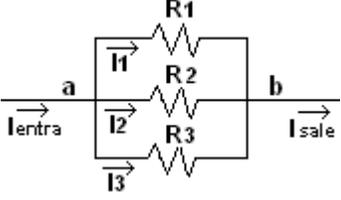
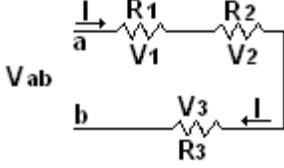
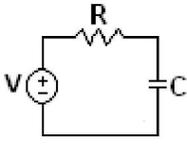
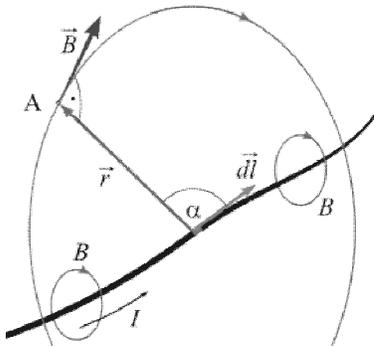
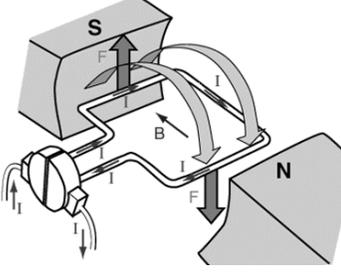
Fuente: R. Serway, R. Beichner, "Física para ciencias e ingeniería", 5ed. Tomo II, pp. 716, México D.F. 2004.

Análisis realizados al comportamiento entre cargas, que ahora se consideran relacionados con materiales eléctricos y no eléctricos, se presentan detalladamente en la tabla 4. Estos análisis, han contribuido en la construcción y desarrollo de elementos y equipos eléctricos y electrónicos; así como dispositivos y maquinarias de aplicación domestica e industrial.

Tabla 4. Análisis fisico-matemático de materiales electrizados y cargas en movimiento.

| Aporte                                | Representación gráfica | Análisis presentados   |
|---------------------------------------|------------------------|--|
| Capacitancia y Energía en Capacitores |                        | <p style="text-align: center;">—</p> <p>Al considerar dos cargas debidas a conductores eléctricos cargados eléctricamente, de manera opuesta, en igual magnitud y separados por un dieléctrico, se obtendrá un campo eléctrico entre los conductores y una diferencia de potencial. Comportamiento que caracteriza a los capacitores.</p>  |
|                                       |                        | <p style="text-align: center;">— — —</p> <p>Se utilizan para almacenar energía durante cortos tiempos. Esta energía es almacenada en forma de campo eléctrico y depende del valor de la carga almacenada y la diferencia de potencial; además, es limitada por el voltaje de operación del elemento, pues sin este límite, teóricamente el elemento almacenaría energía infinitamente.</p> |

|                                 |  |   |
|---------------------------------|--|---|
|                                 | = + +  |   |
| Corriente Eléctrica             | <p>Flujo de cargas en corte longitudinal</p>  <p>Flujo de cargas en corte transversal</p>  | $= \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \dots$ <p>La corriente, se define como la rapidez con la que fluyen las cargas eléctricas a través de una superficie transversal a la dirección del flujo.</p> <p>Si <math>\Delta Q</math> es la cantidad de carga que pasa por esta área en un intervalo de tiempo <math>\Delta t</math>, la corriente promedio <math>I_{prom}</math> es igual a la carga que pasa por el área <math>A</math> en la unidad de tiempo.</p> |
| Densidad de Corriente           |    | $= \dots =$ <p>La densidad de corriente en un conductor se define como la corriente que circula en el mismo en relación con su área, cuando a este se le mantiene constante un potencial en sus extremos; manifestando entonces, un campo eléctrico y una densidad de corriente.</p>  |
| Ley de Ohm y Potencia Eléctrica |   | $= \dots = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{1}{\dots} = \dots$ <p>Establece que la proporción entre la densidad de corriente y el campo eléctrico es una constante, que es independiente del campo eléctrico productor de la corriente.</p> $= \dots \Delta = \dots = \frac{(\Delta Q)}{\dots}$  |

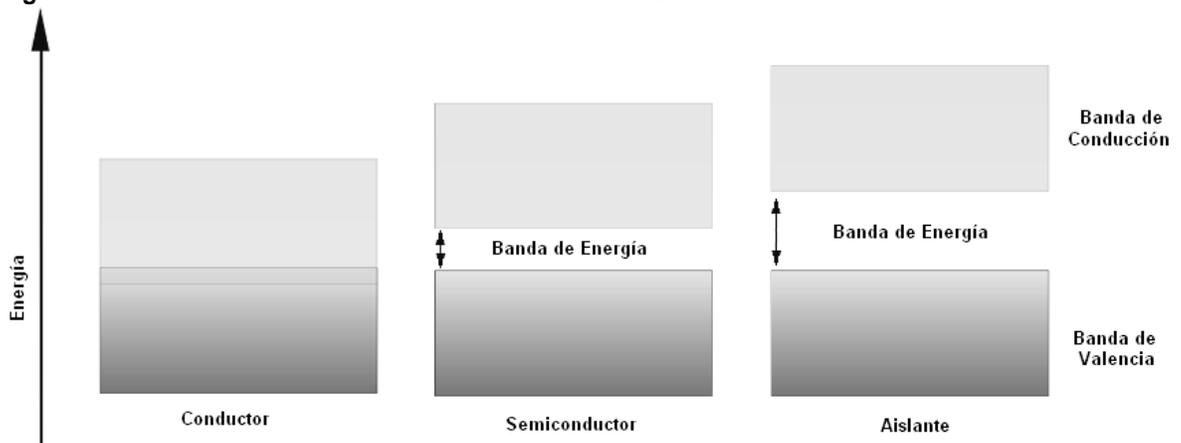
|                    |   |  |
|--------------------|---|--|
| Leyes de Kirchhoff |    | La suma de las corrientes que entran a una unión en un circuito, debe ser igual a la suma de las que salen de dicha unión.     |
|                    |    | La suma de las diferencias de potencial a través de todos los elementos de cualquier espira de circuito cerrado debe ser cero. |
| Circuitos RC       |    | —  |
| Ley de Biot-Savart |  | —  |
| Ley de Faraday     |  | —  |

Fuente: R. Serway, R. Beichner, "Física para ciencias e ingeniería", 5ed. Tomo II, pp. 716, México D.F. 2004.

## 2.3 MATERIALES ELÉCTRICOS

Todos los elementos químicos y cuerpos de la naturaleza, poseen características eléctricas que los clasifican en determinados grupos, conductores, aislantes, semiconductores o superconductores, según sea el caso; en este sentido, la conductividad eléctrica de los elementos y cuerpos juega un papel fundamental para dicha clasificación, puesto que ella permite establecer, que materiales dificultan o facilitan el movimiento de las cargas eléctricas[29], [37]. En la figura 9 se presenta la estructura de las bandas de tres tipos de materiales eléctricos.

Figura 9. Estructura de bandas de materiales eléctricos a 0°K.



Fuente: W. Hayt, "Teoría Electromagnética", 5<sup>ta</sup> Ed., Mc Graw-Hill, pp. 132, México 2005.

### 2.3.1 Conductores

Comprende materiales, elementos y/o sustancias que en mayor o menor proporción permiten el paso de la corriente eléctrica a través de ellos, gracias a la propiedad implícita de estos materiales. Los átomos que componen el elemento conductor poseen entre 1 y 3 electrones en su último nivel de valencia en su estado natural a temperatura de cero absoluto (0° K); aplicando una pequeña

cantidad de energía (se requiere poca energía para liberar los electrones) los electrones se liberan de los átomos moviéndose libremente por el conductor y produciendo una corriente eléctrica. La conducción, también puede ser producida por la luz que incide sobre el material, pues los fotones absorbidos por los átomos permiten la liberación de los electrones en las capas más externas.

Los metales y las aleaciones son los mejores conductores, pues su resistencia al paso de la electricidad es muy baja. Dentro de estos materiales se encuentran el oro y la plata, pero debido a su elevado precio se reemplazan frecuentemente por el cobre y el aluminio; aunque en estos, la conductividad eléctrica es inferior en un 50% aproximadamente, son tres veces más ligeros que el oro y la plata.

### **2.3.2 Aislantes**

En estos materiales, elementos y/o sustancias las bandas de energía se encuentran debidamente identificadas; la banda de valencia se caracteriza por contar gran número de electrones, a diferencia de la banda de conducción que se encuentre vacía. Entre estas bandas existe una separación conocida como banda prohibida, la cual representa la energía requerida para romper el aislamiento y permitir la conducción a través del material; en los aislantes esta energía o diferencia de potencial requerida es muy alta. En contraste con lo ocurrido con los conductores, a temperatura ambiente, muy pocos electrones tienen la suficiente energía térmica para llegar a la banda de conducción debido al gran número de electrones en la banda de valencia (de 6 a 8 electrones), por lo que hay muy pocos portadores de carga moviéndose libremente en la banda de conducción.

### **2.3.3 Semiconductores**

Usualmente se definen los semiconductores como los materiales cuya resistividad se encuentra dentro del rango de  $10^{-2}$  a  $10^9$   $\Omega$ -cm, o más específicamente, como los materiales cuya barrera de energía para la excitación de sus electrones se

encuentra entre cero y cerca de 4eV [25]. De estos materiales los más conocidos y utilizados son el Silicio (Si) y el Germanio (Ge), pero existen otros que se clasifican según sus características semiconductoras, magnéticas o ferroconductoras de construcción para utilizarlos en diferentes aplicaciones, así como se presenta a continuación:

- **Semiconductores Elementales:** en este grupo se encuentran el Silicio (Si), Germanio (Ge) y otros elementos de los grupos V y VI de la tabla periódica, como el Fósforo (P), Azufre (S) y Selenio (Se); se caracterizan por poseer una estructura cristalina en forma de diamante que comparten con otros materiales [29], en donde cada átomo se encuentra rodeado de cuatro átomos circundantes, formando un tetraedro. Dichos semiconductores constituyen la base fundamental de la electrónica digital y su uso es el más extendido entre todos los tipos de semiconductores.
- **Compuestos Binarios:** formados por elementos del grupo III y grupo V de la tabla periódica, cuentan con características similares a sus contrapartes del grupo IV cuando se originan semiconductores a partir de la unión de elementos del grupo III con los del grupo V, donde estos últimos ceden sus electrones; dicho comportamiento ocasiona que las interacciones Coulombicas dentro de los átomos se aumenten, aumentando las bandas de energía fundamentales para la excitación electrónica. Además de las uniones de elementos del grupo III-V, también se pueden presentar uniones de elementos de los grupos I-VII, II-VI y IV-VI; destacando de estos grupos los semiconductores Arseniuro de Galio (GaAs), Sulfuro de Zinc (ZnS), Teluro de Mercurio (HgTe), Cloruro de Cobre (CuCl) y Sulfuro de Plomo (PbS).
- **Óxidos:** Si bien los óxidos son conocidos más por ser buenos aislantes, algunos como el Óxido Cúprico (CuO) y Óxido Cuproso (Cu<sub>2</sub>O) son semiconductores. Debido al desconocimiento del proceso de dopado que se

debe seguir para estos, presentan muy pocas aplicaciones prácticas en la actualidad, a excepción del Óxido de Zinc (ZnO) que se utiliza como ingrediente en cintas adhesivas o en transductores; sin embargo en los últimos años se han descubierto las propiedades superconductoras de muchos óxidos, lo que ha centrado la atención de investigadores en estos materiales.

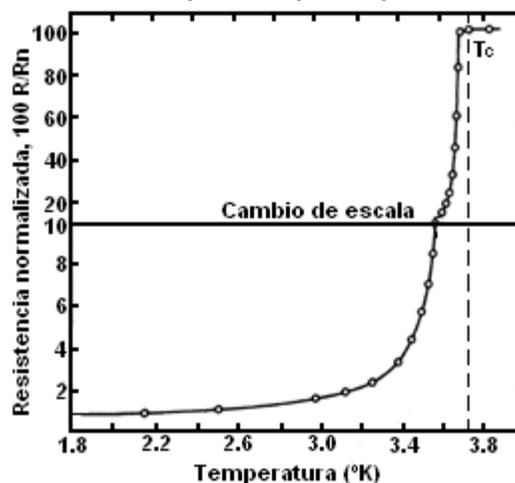
- **Semiconductores en Capas:** Algunos semiconductores compuestos presentan una estructura cristalina en capas, tales como el Yoduro de Plata ( $\text{PbI}_2$ ) y el Seleniuro de Galio (GaSe); las capas en la estructura cristalina están unidas por enlaces covalentes que hacen que las fuerzas de atracción sean muy fuertes, siendo de especial interés debido a que sus capas estructurales son bidimensionales, lo que permite que su manejo sea mucho más sencillo.
- **Semiconductores Orgánicos:** su aplicación en el campo de la electrónica no ha tenido lugar pero son la promesa en el futuro cercano para la electrónica. Las ventajas de los compuestos orgánicos sobre los inorgánicos es que pueden ser adaptados fácilmente a la medida de las aplicaciones, por lo que se está haciendo un gran esfuerzo para su implementación, tal como en la optoelectrónica, en donde compuestos con uniones conjugadas entre átomos de carbono presentan no linealidades ópticas, lo que posibilita su uso.
- **Semiconductores Magnéticos:** algunos compuestos además de poseer características semiconductoras presentan propiedades magnéticas en mayor o menor medida, tal como el Europio (Eu) o el Manganeseo (Mn), cuyas propiedades son interesantes. Estos materiales y sus aleaciones poseen iones magnéticos que les dan distintas propiedades, convirtiéndolos en ferromagnéticos o antiferromagnéticos; lo que posibilita utilizarlos como moduladores optomagnéticos dado que presentan efectos magneto-ópticos.

### 2.3.4 Superconductores

Existen materiales metálicos y compuestos cuya resistencia se aproxima significativamente a cero bajo ciertas condiciones de temperatura o frecuencia; estos materiales son conocidos como superconductores y presentan las siguientes características generales que los identifican [42]:

- Variación de la resistencia DC con la temperatura: estos materiales presentan un comportamiento característico de resistencia vs temperatura. Al tomar como referencia el estaño superconductor se puede notar en la figura 10, que es necesario aplicarle a la resistencia un cambio de escala una vez el valor de la temperatura se aproxima a la temperatura crítica ( $T_c$ ), puesto que, para pequeños incrementos, la resistencia aumenta considerablemente; además, al sobrepasar la  $T_c$ , el incremento del valor resistivo será muy pequeño por mas que se aumente la temperatura. Por otra parte, los valores resistivos que presentan estos materiales a temperaturas por debajo de  $T_c$ , alcanzan magnitudes del orden  $10^{-23} \Omega\text{-cm}$ ; valores que son interpretados o aproximados a cero al compararlos con los valores comunes de resistividad de un material conductor (el cual es aproximadamente  $10^{17}$  veces mayor).

Figura 10. Variación de resistencia vs temperatura, para superconductores.



Fuente: R. Matick, "Transmission Lines and Communication Networks: An Introduction to Transmission Lines, High-frequency and High-speed Pulse Characteristics and Applications", 1<sup>ra</sup> Ed., Wiley-IEEE Press, pp. 214, New York, 2000.

- Efecto Meissner: sustenta que un campo magnético externo variable se mantiene por fuera de un superconductor; para este hecho, se expone que al tomar una esfera de un material superconductor y someterla a un campo magnético variable que induce una corriente eléctrica en la esfera y que puede ser mantenida varios años sin pérdida de magnitud, se generará un campo magnético producto de la corriente inducida que rechaza el campo magnético externo y lo mantiene por fuera del superconductor. Por lo anterior, se considera que los superconductores son perfectos materiales diamagnéticos, ya que producen un momento magnético inducido igual en magnitud y en dirección opuesta al campo magnético aplicado.
- Resistencia como función de la frecuencia: Cuando la frecuencia de excitación de un superconductor se incrementa, estos presentan una resistividad constante para todos los valores de temperatura. Lo anterior se determinó por primera vez en el año de 1940 cuando se descubrió que con una excitación DC, la resistencia de un superconductor para todos los valores de temperatura menores que  $T_c$  tienden a cero, en general, se puede considerar que hasta frecuencias de excitación menores a 1000Hz los valores de resistividad del conductor con temperaturas por debajo de  $T_c$  son despreciables, por el contrario a frecuencias muy altas, mayores a  $10^9$ Hz la resistividad del material se vuelve finita y desciende junto con la temperatura pero no es cercana a cero, llegando a ser constante para frecuencias de  $10^{13}$ Hz.
- Resistencia como función del campo magnético: un superconductor expuesto a una temperatura por debajo de su  $T_c$  y que está sometido a un campo magnético externo, presenta un campo magnético inducido que rechazará al externo así como lo expone el efecto Meissner. A medida que la magnitud del campo externo aumenta, en la misma proporción lo hace el inducido; esto

sucede hasta cierta magnitud de campo magnético externo ( $H_c$ ), en donde un tipo de superconductor del tipo I deja de serlo, debido al aumento de su resistividad. Al reducir el campo magnético, el material se convierte nuevamente en superconductor con un valor finito de campo magnético inducido; cabe anotar que  $H_c$  depende de la temperatura y es mayor a valores de temperatura más bajos y menor para altas temperaturas.

Los superconductores tipo I o superconductores “suaves”, no poseen una gran resistencia mecánica, a diferencia de los superconductores del tipo II o superconductores “duros”. Estos últimos se comportan diferente al alcanzar un valor de campo magnético  $H_{c1}$ , pues el campo inducido disminuye y como consecuencia el campo externo aumenta, aun así el material no deja de ser superconductor hasta alcanzar una magnitud de campo externo  $H_{c2}$ .

### **3. REVISIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE CARGAS ELECTROSTÁTICAS**

Como se mencionó con anterioridad, las manifestaciones presentadas por el fenómeno de las cargas electrostáticas se estudiaron desde muchos años antes de cristo; aun así, en los últimos siglos se potencializó su estudio y análisis, lo que propició la generación de conocimientos, avances y aplicaciones entorno a esta temática.

Para determinar y establecer el estado teórico-práctico en el que se encuentran las cargas electrostáticas, en este numeral se desarrolla una revisión del estado del arte; la cual se realiza en función de diversos factores determinantes para el establecimiento del impacto con el que cuentan esta temática y se fundamente en los datos registrados en el anexo 3. Entre estos factores se encuentran las aplicaciones realizadas para mitigar o aprovechar las cargas, los modelados desarrollados para estudiarlas, las simulaciones ejecutadas y principios de funcionamiento establecidos o determinados según aplicaciones.

#### **3.1 APROVECHAMIENTO DE LAS CARGAS ELECTROSTÁTICAS EN APLICACIONES Y/O PROCESOS INDUSTRIALES**

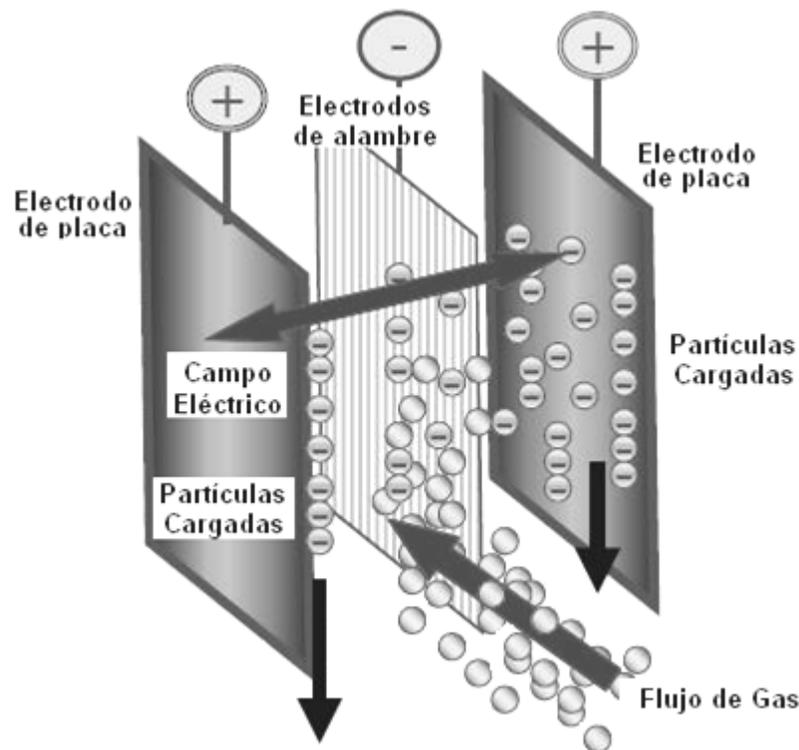
En los últimos años, las manifestaciones de cargas electrostáticas en diversas aplicaciones y procesos, ha propiciado que las universidades e industrias afectadas enfoquen esfuerzos en estudiar los comportamientos originados por este fenómeno y por supuesto que se propongan soluciones que minimicen los riesgos asociados a su presencia. Aun así es conveniente destacar que el comportamiento manifestado por las cargas electrostáticas en determinadas aplicaciones y procesos, ha sido aprovechado para desarrollar equipos y/o dispositivos que fundamentan su funcionamiento con este tipo de cargas.

### 3.1.1 Precipitador Electrostático

Son equipos cuyo funcionamiento se fundamenta en la carga y atracción de partículas sólidas que se encuentran en gases y que se someten a una descarga corona; aunque este principio se considera muy simple, la aplicación práctica es dificultosa porque en este proceso intervienen factores eléctricos, mecánicos y químicos. Según la configuración utilizada, los precipitadores electrostáticos pueden ser de placa-alambre, de placa plana, tubulares y de dos etapas.

En la figura 11, se presenta un precipitador electrostático del tipo placa-alambre. En este equipo, el gas atraviesa el campo eléctrico existente entre las placas paralelas de metal y los electrodos de alambre, gracias al voltaje aplicado; este, se caracteriza por ser pulsante y por propiciar una descarga corona negativa cuando se rompe eléctricamente el aire entre los alambres y las placas [6].

Figura 11. Precipitador electrostático del tipo placa-alambre.



Fuente: T. Yakamoto, T. Abe, T. Mimura, N. Otsuka, Y. Ito, Y. Ehara, A. Zukeran, "Electrohydrodynamically Assisted Electrostatic Precipitator for the Collection of Low-Resistivity Dust", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 45 Issue: 6, pp. 2178, Sep. 2009.

Los iones generados por la descarga siguen las líneas del campo eléctrico desde los alambres hasta las placas recolectoras, por lo que se establece una zona de carga a través de la cual las partículas deben pasar; al pasar por esta zona, estos se interceptan y los iones se adhieren, permitiendo así aproximar las partículas a los puntos de recolección. Finalmente, en las placas recolectoras se encuentran unos golpeadores que se incorporan para desprender las partículas acumuladas.

El uso de este equipo es preferido en plantas térmicas a base de carbón, motores diesel, en procesos que incluyen hornos de cemento, incineradores de residuos, unidades de refinación de petróleo, entre otros [35]. En las últimas décadas, los avances incorporados permiten que por este método se acumule un porcentaje mayor al 97% de las partículas contaminantes que pueden ser emitidas al aire.

### **3.1.2 Pintura Electroestática**

La pintura electroestática es un proceso de pintura en seco en el cual las partículas poliméricas de pintura son cargadas y transportadas a través del aire hasta el objetivo, donde son atraídas y depositadas gracias a una combinación de fuerzas aerodinámicas y electrostáticas que actúan sobre las partículas. Para aplicar esta pintura se requiere del apoyo de un equipo de tipo electrostático que funciona como una fuente de voltaje que genera corriente y que la transporta hacia el electrodo de la pistola, donde se produce la ionización del aire; estos iones al interceptarse con las partículas poliméricas las cargan eléctricamente y posteriormente se adhieren al material a pintar, gracias a que estos se encuentran expuestos a polaridades opuestas.

Este proceso fue desarrollado a partir de los avances realizados con los precipitadores electrostáticos en la década de 1930; para la década de 1940 el proceso se había tecnificado y estas líneas de pintura se implementaron en la

industria, donde los rendimientos alcanzados superaron el 70%, aun así, se propuso utilizar atomizadores, disco rotativos o pistolas hidráulicas para mejorar el método de carga y la distribución de partículas. Para la década de 1960 se eliminan los solventes de las pinturas y se aplican como finas partículas eléctricamente aisladas sobre el objetivo, las cuales eran cargadas por medio de descargas corona o cargas triboeléctricas y eran atraídas al material como producto de fuerzas electrostáticas.

### **3.1.3 Electrofotografía o Xerografía**

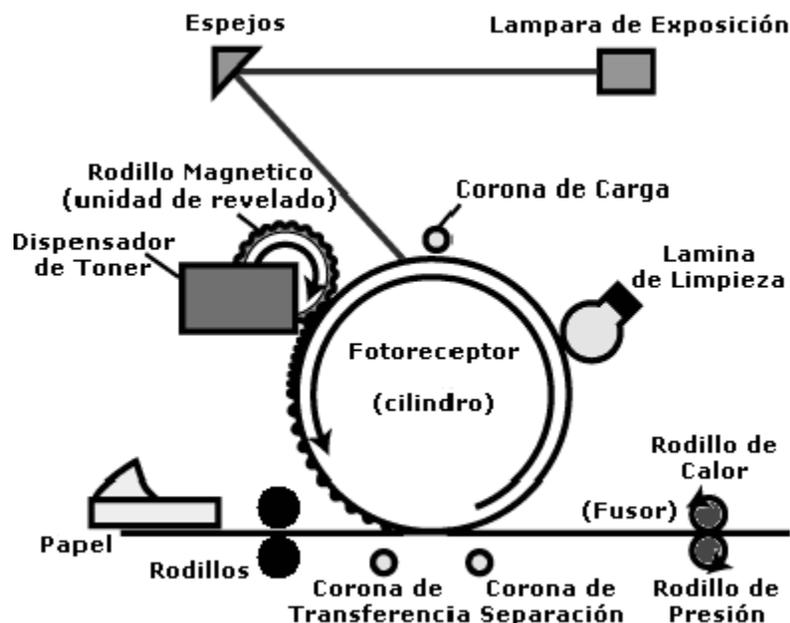
En la historia del desarrollo de la electrostática se ha considerado la obtención de copias de los documentos o xerografía, como uno de los avances mas importantes en las aplicaciones con este tipo de cargas, no solo por su impacto económico sino por que incluía diversos procesos como el electrostático, la fotoconductividad, carga corona, carga triboeléctrica, atracción electrostática y neutralización iónica.

En la figura 12, se puede observar un esquemático del funcionamiento de un proceso xerográfico; este inicia al colocar el documento a copiar sobre una superficie de cristal o algún otro material transparente; bajo esta superficie corre una fuente luminosa conocida como lámpara de exposición, que permite reflejar esta imagen por los espejos hasta llegar a un cilindro fotoreceptor que está girando y al cual se le proporciona carga electrostática positiva; la superficie de este cilindro puede clasificarse como semiconductora pues se comporta en ocasiones particulares como conductor, dependiendo de la fuente de luz.

La imagen del documento copiado se proyecta sobre la superficie fotoconductora, volviéndose realmente conductora sólo en las áreas donde la luz incide; en esas áreas la luz produce portadores de carga en el fotoconductor, los cuales mueven la carga positiva del tambor y permanecen en aquellas áreas del fotoconductor no

expuestas a la luz, dejando una imagen latente del objeto en forma de una distribución de carga superficial positiva. Luego un polvo con carga negativa, llamado “tónér” se esparce sobre la superficie a través de los rodillos; este polvo cargado se adhiere sólo a aquellas áreas de la superficie que contienen la imagen con carga positiva gracias a la diferencia en los signos de las dos cargas interactuantes, lo que crea una fuerza electrostática atractiva entre los dos materiales, para ello, es necesario que el papel pase por un elemento fusor, pues este se encarga de adherir por completo el polvo del tónér al papel.

Figura 12. Funcionamiento esquemático del proceso xerográfico actual.



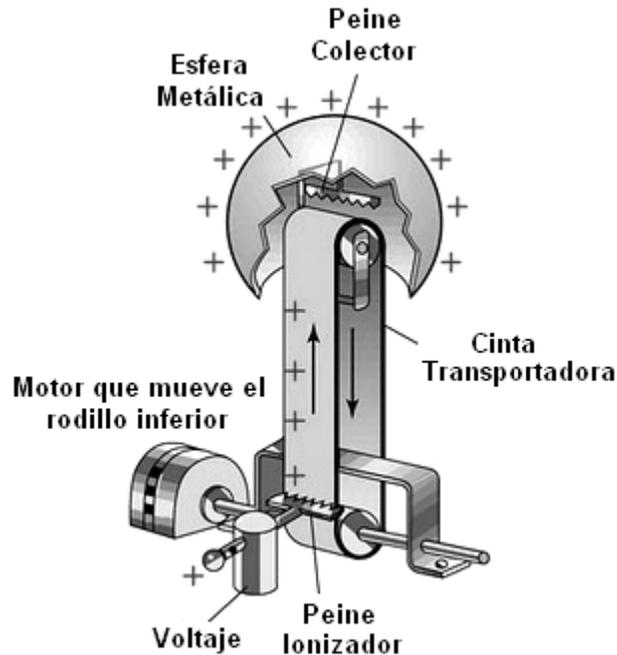
Fuente: J. F. Hughes, “Electrostatics and applications to industrial processes”, *IEE Proceedings A Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management an Education*, vol. 128 Issue: 4, pp. 253, Nov 2008.

### 3.1.4 Generador de Van de Graaff

Es una máquina electrostática que acumula grandes cantidades de carga eléctrica en una esfera metálica hueca [29]. En 1929 Robert Van de Graaff consideró que “cuando un conductor cargado se pone en contacto con el interior de un conductor hueco, toda la carga del primer conductor se transfiere

al conductor hueco; en principio, la carga en el conductor hueco y su potencial eléctrico pueden incrementarse sin límite repitiendo el proceso”, para diseñar y construir un generador electrostático, como el presentado en la figura 13.

Figura 13. Generador de Van deGraaff.



Fuente: <http://sites.google.com/site/hispaliprojectointegrado2/home/curso-2010-2011/2o-bach-ciencias/generador-van-der-graaf> [Consulta: Julio 24 de 2010].

El proceso de carga de este generador se inicia al entregar carga de manera continua a un electrodo de alta tensión (o esfera metálica) mediante una cinta transportadora de material aislante; la banda se carga por medio de una descarga corona entre unas agujas metálicas o peine ionizador que se mantienen a un potencial positivo de  $10^4\text{V}$ , y una rejilla conectada a tierra. La carga sobre la banda móvil se transfiere a la esfera por medio de un peine colector conectado a esta.

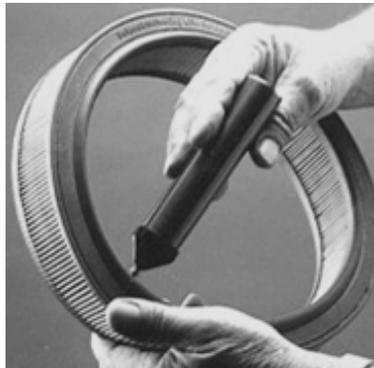
Como el campo eléctrico dentro de la esfera es cero, la carga se transfiere a este electrodo fácilmente sin tomar en cuenta su potencial; en la práctica es posible aumentar el potencial eléctrico hasta que la descarga ocurra a través del aire, lo que puede producir diferencias de potencial tan altas como 20 millones de volts.

### 3.1.5 Lápiz triboeléctrico

El lápiz triboeléctrico o tribopen fue desarrollado para proporcionar métodos cómodos y ecológicos de clasificación de materiales no metálicos de vehículos para desguace, en la industria automotriz; debido a que, los automóviles se conforman entre un 21% y 23% por materiales sólidos no metálicos. Tradicionalmente, clasificar estos plásticos significa quemar el plástico para observar el color de la llama u oler el humo que se produce, lo que es poco saludable para el medio ambiente e inexacto y lento para el proceso de selección.

El lápiz triboeléctrico presentado en la figura 14, es un dispositivo portátil equipado con sensores en su punta que permiten el reconocimiento de determinados materiales plásticos cuando esta los roza; la punta, contiene ciertos materiales que al colocarse en contacto con el plástico, generan una combinación de cargas que dependen únicamente de las propiedades electrostáticas del material bajo prueba y que se utilizan como base de identificación de los mismos. Estos dispositivos apoyan su funcionamiento en dos aspectos importantes, la resistividad de los materiales y el tiempo de disipación de las cargas a tierra [10].

Figura 14. Prueba de identificación a material plástico con lápiz triboeléctrico.

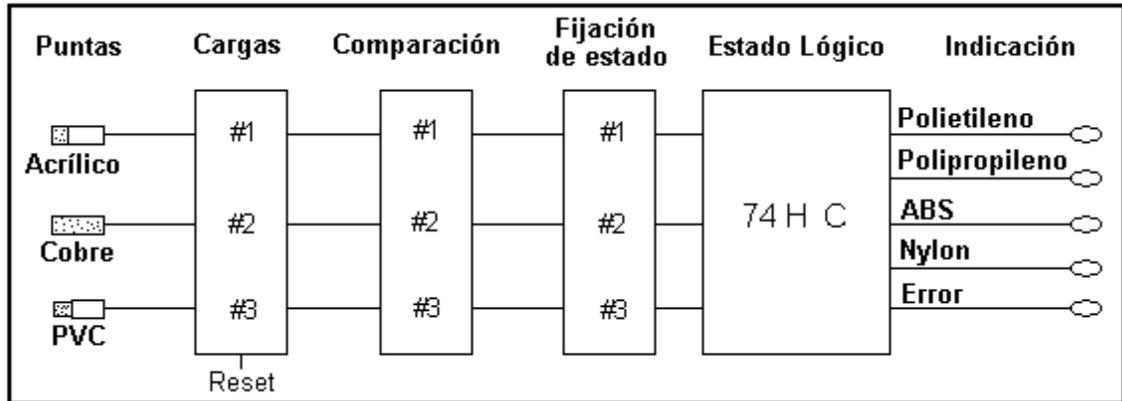


Fuente: G.I. Hearn, P.E.R. Mucci, A. Eyres, J.A. Amner, "The triboelectric pen: an electrostatic method for the identification of plastics in recycling", *IEEE Conference Record of the 1996, Industry Applications Conference, 1996, thirty-First IAS Annual Meeting*, vol. 4, p.p. 1958, Aug. 2002.

El lápiz triboeléctrico puede distinguir entre 4 materiales que se encuentran comúnmente en los automóviles, los cuales son el polietileno, polipropileno, ABS y

nylon; en la figura 15, se presenta un esquema simplificado del funcionamiento lógico de este lápiz y en la tabla 5, se presenta la tabla de verdad del mismo.

Figura 15. Esquema de funcionamiento lógico del lápiz triboeléctrico.



Fuente: G.I. Hearn, P.E.R. Mucci, A. Eyres, J.A. Amner, "The triboelectric pen: an electrostatic method for the identification of plastics in recycling", *IEEE Conference Record of the 1996, Industry Applications Conference, 1996, thirty-First IAS Annual Meeting*, vol. 4, p.p. 1958, Aug. 2002.

Tabla 5. Tabla de verdad del funcionamiento lógico del lápiz triboeléctrico.

| Puntas   |       |     | Comparación |    |    | Indicación |    |     |     |       |
|----------|-------|-----|-------------|----|----|------------|----|-----|-----|-------|
| Acrílico | Cobre | PVC | #1          | #2 | #3 | PE         | PP | ABS | PVC | Error |
| +        | +     | +   | 0           | 0  | 0  | 1          | 0  | 0   | 0   | 0     |
| +        | +     | -   | 0           | 0  | 1  | 0          | 1  | 0   | 0   | 0     |
| +        | -     | -   | 0           | 1  | 1  | 0          | 0  | 1   | 0   | 0     |
| -        | -     | -   | 1           | 1  | 1  | 0          | 0  | 0   | 1   | 0     |
| Otro     |       |     | otro        |    |    | 0          | 0  | 0   | 0   | 1     |

Fuente: G.I. Hearn, P.E.R. Mucci, A. Eyres, J.A. Amner, "The triboelectric pen: an electrostatic method for the identification of plastics in recycling", *IEEE Conference Record of the 1996, Industry Applications Conference, 1996, thirty-First IAS Annual Meeting*, vol. 4, p.p. 1958, Aug. 2002.

### 3.2 DESCARGAS ELECTROSTÁTICAS O ESD

Las descargas producto de las acumulaciones de cargas electrostáticas son fenómenos comúnmente experimentados las personas, equipos y/o dispositivos tanto en la casa, la oficina o en la industria; las cuales, en la mayoría de los casos producen molestias e incomodidades. Sin embargo, las manifestaciones

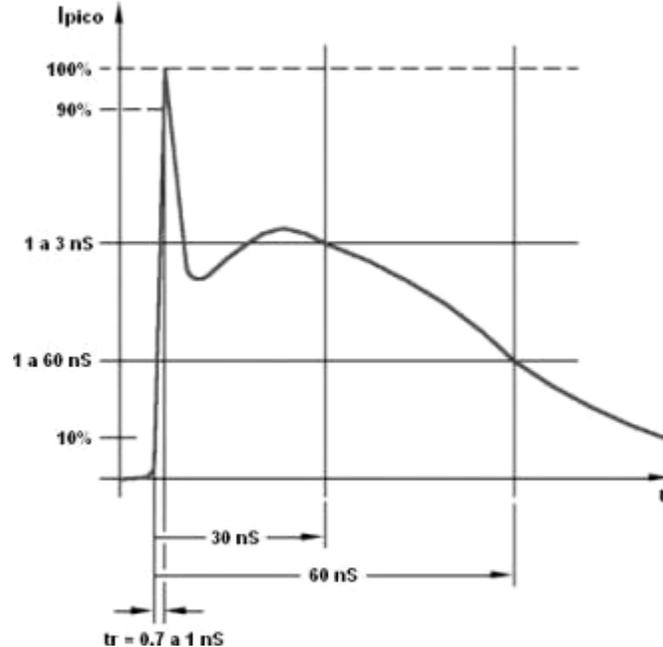
presentadas en la industria como por ejemplo en la fabricación o ensamble de componentes electrónicos, pueden propiciar problemas más complejos que dejan como consecuencias daños significativos y altamente costosos.

La producción y acumulación de cargas electrostáticas en los seres humanos puede deberse a numerosas causas, tales como quitarse una camisa, caminar sobre una alfombra, levantarse de una silla de cuero, lo que ocasiona que en ellos se presenten tensiones de hasta 15kV [38] que causan daños importantes a equipos electrónicos y sistemas si se dan las condiciones propicias para manifestarse como una ESD; Al manifestarse, se pueden presentar pérdidas de información en los equipos, fallas irreparables y/o destrucción de componentes de los circuitos microelectrónicos. Las ESD, también se originan por campos electromagnéticos radiados por otras ESD que se manifiestan en las cercanías o por chispas o corrientes de corta duración y alta magnitud que generan variaciones de tensión en muy cortos tiempos de duración; en gran parte de los casos, estas ESD no alcanzan a ser registradas por los dispositivos de protección, por lo que se presentan corrientes parasitas que producen señales erróneas y/o pérdida de información.

Todas las ESD en la última etapa son conducidas a tierra a través de una variedad de caminos, pueden saltar a través de materiales o secciones aisladas y pasar a través de equipos o largos tramos de cables conductores, caminos de circuitos electrónicos impresos, líneas de alta potencia, líneas de señal y redes de conducción a tierra, produciendo en su camino radiaciones con componentes de campo eléctrico y magnético que inducen tensiones transitorias en señales de baja impedancia o acoplamientos eléctricos en circuitos con entradas de alta impedancia; por ello, la caracterización de las ESD ha sido efectuada por científicos y normalizada por comisiones internacionales como la IEC, así como se presenta en la figura 16. En esta curva se puede notar el corto tiempo de duración del pico de corriente (que produce frecuencias de alrededor de 1GHz) y el corto

tiempo de descarga luego del pico inicial; en términos generales la descarga se efectúa en unas decenas de nanosegundos, tiempo que es muy corto para que actúen los dispositivos de protección contra sobrecorrientes o sobretensiones.

Figura 16. Forma de onda característica de una descarga electrostática.



Fuente: Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4: Testing and measurement techniques - Section 2: Electrostatic discharge immunity test - Basic EMC Publication, IEC61000-4-2, Mar. 1995.

### 3.2.1 Descargas sobre equipos y/o dispositivos electrónicos

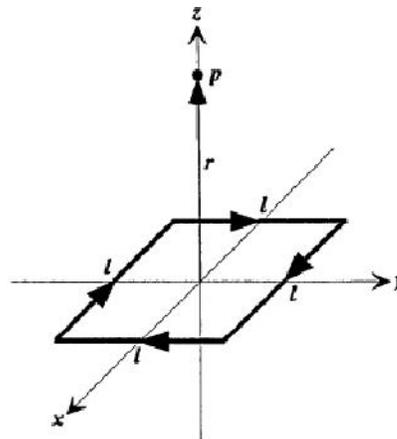
Los equipos y circuitos electrónicos sufren efectos nocivos de las ESD, tanto si son producidas de manera directa (por contacto con un ser humano cargado) o de forma indirecta (por campos electromagnéticos que inducen corrientes parásitas).

#### 3.2.1.1 Descargas electrostáticas indirectas

Se forman por campos electromagnéticos que inducen corrientes sobre los circuitos electrónicos; por ejemplo, en la industria naval, debido al proceso de

construcción de embarcaciones, es necesario incorporar los equipos y dispositivos electrónicos durante la construcción de la embarcación, exponiéndolos así a radiaciones por soldadura de láminas de acero naval que producen corrientes parásitas y tensiones inducidas. Para estudiar este comportamiento han utilizado un modelo físico del cable de una maquina de soldar configurado en forma de espira de  $1\text{m}^2$  de área y ubicado cerca al punto de soldadura; suponiendo el arco de la soldadura en una esquina de la espira, según se ilustran en la figura 17.

Figura 17. Configuración de espira con  $1\text{m}^2$  de área, para estudio y análisis de caso.



Fuente: T. R. Anderson, C. F. Derewiany and M. D. Obara, "Electrostatic Discharge Sensitive (ESDS) Equipment Susceptibility To Welding Generated Electromagnetic Fields" *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 1998, vol. 1, pp. 364, Aug. 1998.

Para determinar la intensidad del campo electromagnético y establecer sus efectos sobre circuitos electrónicos en las cercanías, se requirió del análisis de los dos campos de manera independiente. Primeramente se analizó el campo magnético apoyándose en la ley de Biot-Savart (ec. 1) para obtener la magnitud de este sobre el punto P a lo largo del eje Z; en esta,  $\mu_0$  representa la permeabilidad del espacio vacío;  $i$ , la corriente en amperios;  $l$ , la longitud en metros; y  $z$ , la posición en metros sobre el eje z.

$$= \frac{\mu_0 i l}{4\pi z^2} \quad \text{ec. 1}$$

Para el caso en el que el cable de la maquina de soldar se configura como una espira de 1m de lado y por el que circula una corriente de 2kA en el secundario; en el punto  $z=0$ , el campo magnético máximo obtenido fue de 5,66 Gauss.

Al analizar el campo eléctrico, consideraron la mismas condiciones anteriores, pero especificando que el tiempo de subida y de bajada de la corriente se encuentra en el orden de los 100uS (10kHz de frecuencia) [2]; en este caso, utilizaron una expresión para una espira en la que  $\ll$ , desarrollada por Stutzman y Thiele[31]. Como resultado obtuvieron que el campo eléctrico es de 25V/m para un punto de soldadura que se encuentra a 1m de distancia, o de 1075V/m para un punto a 15,24cm (6 pulgadas) de distancia. Por otra parte, tomando en consideración el campo magnético producto del arco eléctrico de la soldadura y utilizando un modelo de estado estable hidrodinámico, determinaron que la contribución realizada por este es de 10 Gauss [34].

Finalmente, determinaron la magnitud de la tensión y la corriente inducida en un circuito electrónico de 64pulgadas<sup>2</sup> de área, que es expuesto a los campos magnéticos y eléctricos descritos anteriormente. Para hallar la tensión inducida debido al campo magnético utilizaron la ley de Faraday, con la que para este caso particular se obtiene que  $\epsilon = 0,406$ ; donde:  $f$ , corresponde a la frecuencia del campo magnético en Hertz;  $B$ , a la densidad de flujo magnético en Gauss; y  $A$ , al área del lazo en pulgadas<sup>2</sup>. Al reemplazar los valores de frecuencia (10kHz), campo magnético (15,66Gauss=10Gauss+5,66Gauss) y área del lazo o circuito (64 pulgadas<sup>2</sup>), obtuvieron que la tensión inducida es aproximadamente 4,1V.

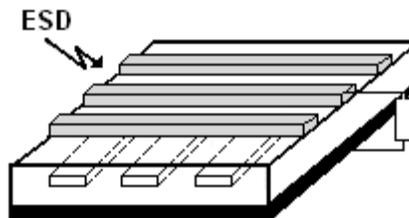
Para determinar la corriente inducida consideraron que el circuito está protegido por un blindaje metálico de protección; la corriente inducida en un blindaje tipo cable de 2m de longitud expuesto a un campo eléctrico de 10V/m es de 32uA [22]. Escalando este valor al campo eléctrico de 1075V/m para una distancia de 6pulgadas, se tiene que en el blindaje se inducen unos 3,4mA de corriente.

### 3.2.1.2 Descargas electrostáticas directas

Se presentan a un circuito electrónico por vía de cableado o por las pistas del circuito, produciendo daños directos a los dispositivos electrónicos, que propician comportamientos indeseados (como en el caso indirecto), pérdidas de información, explosiones o quemas de elementos de circuito.

Para demostrar la magnitud de las tensiones que se pueden experimentar en un circuito por ESD directas, se realizan cálculos teóricos y pruebas prácticas sobre un circuito electrónico como el presentado en la figura 18 [27], el cual comprende una PCB con dos capas de pistas conductoras con direcciones opuestas.

Figura 18. Esquema de circuito electrónico bajo prueba.



Fuente: R. De Leo, G. Cerri, V. Primiani, "ESD in Electronic Equipment: Coupling Mechanisms and Compliance Testing", *Proceedings of the 2002 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Vol. 4, p.p. 1382, Nov. 2002.

Durante la prueba se efectuó una descarga directa de 6kV sobre las pistas, para calcular y medir la tensión a la que se encuentran expuestas el grupo de pistas ubicadas en la parte de abajo; como resultados obtuvieron tensiones pico de 20V respecto a tierra, en un tiempo de 20nS. También se notó que los dispositivos de protección electrónicos no respondieron oportunamente, por lo que se produjeron daños irreparables al circuito y pérdida de información [27].

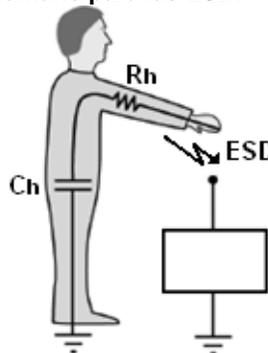
### 3.2.2 Descargas electrostáticas donde participa el cuerpo humano

Como resultados de diferentes investigaciones se ha establecido que las cargas electrostáticas acumuladas en el cuerpo humano constituyen una de las

principales causas de ESD sobre elementos y/o dispositivos altamente vulnerables [12]; por lo que este comportamiento ha motivado a diversas organizaciones ingenieriles, a entidades entandarizadoras y a fabricantes de dispositivos electrónicos a que se propongan modelos del cuerpo humano para analizarlos en relación con las ESD, así como lo ha realizado el ministerio de defensa estadounidense en su último estándar, la asociación de ESD de estudios en alianza con la ANSI [9], la alianza de industrias electrónicas [8], el concejo de electrónica automotriz y el Comité Electrotécnico Internacional IEC [7]. El modelo utilizado con frecuencia por la industria en general es el propuesto por la alianza de industrias electrónicas en el EIA/JEDEC Standard JESD22-A114-E [21].

Considerando las normas enunciadas con anterioridad, el modelo del cuerpo humano se propone en función de un resistencia del cuerpo humano ( $R_h$ ) y una capacitancia del cuerpo humano ( $Ch$ ), así como se ilustra en la figura 19; con los valores característicos tabulados en la tabla 6.

Figura 19. Modelo circuital del cuerpo humano para las ESD.



Fuente: H. Luo, J. Kyu Kim, E. F. Schubert, “Human body model (HBM) for electrostatic discharge (ESD)”, Jul. 2003.

Tabla 6. Valores característicos de  $R_h$  y  $Ch$  del cuerpo humano según diversas normas.

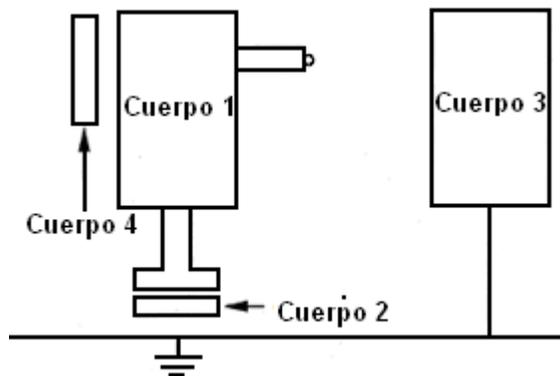
| Elemento  | IEC 1000-4-2 | JESD22-A114E  | ANSI/ESD STM5.1-2007 | MIL-STD 2883C Method 3015. 7 |
|-----------|--------------|---------------|----------------------|------------------------------|
| <b>Rh</b> | 330 $\Omega$ | 1,5k $\Omega$ | 1,5k $\Omega$        | 1,5k $\Omega$                |
| <b>Ch</b> | 150pF        | 100pF         | 100pF                | 100pF                        |

Fuente: H. Luo, J. Kyu Kim, E. F. Schubert, "Human body model (HBM) for electrostatic discharge (ESD)", Jul. 2003.

Teniendo en cuenta lo anterior, se puede anotar que en una ESD siempre se ven involucrados dos o más cuerpos; uno de ellos se encuentra cargado y se considera flotante o aislado de tierra, el otro puede estar aislado o conectado a tierra. La interacción entre estos cuerpos y sus características eléctricas, determinan la magnitud de la ESD; en especial, la capacitancia ejerce significativa influencia en esta interacción, pues ella demarca la carga que puede acumular un cuerpo y la tensión que este presenta.

La interacción de un cuerpo humano cargado, con otros cuerpos tales como la ropa, zapatos, entre otros, se ha analizado teniendo en cuenta las capacitancias de dichos cuerpos y las tensiones y cargas que estos pueden acumular. En la figura 20, se presenta un modelo esquemático de un cuerpo humano cargado y varios cuerpos interactuando con él; en esta, el cuerpo 1 hace referencia al cuerpo humano, el cuerpo 2 a los zapatos, el cuerpo 3 a un cuerpo independiente y el cuerpo 4 a la ropa.

Figura 20. Representación esquemática de interacción entre cuerpos.



Fuente: W. Greason, "Charge and Potential Control of Electrostatic Discharge (ESD) and the Human Body", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 32, No. 5, Oct. 1996.

Si se establece que el cuerpo 1 no se encuentra cargado y que el cuerpo 2 y 4 si lo están, la tensión experimentada por el cuerpo 1 referenciado a tierra es:

$$= \frac{+}{- \quad -}$$

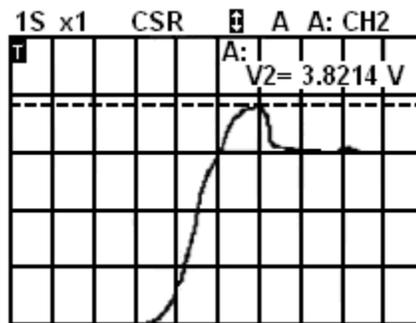
Donde:  $Q_2$  representa la carga del cuerpo 2 en Coulomb;  $Q_4$ , la carga del cuerpo 4 en Coulomb;  $C_{11}$ , la capacitancia del cuerpo;  $C_{22}$ , la capacitancia del cuerpo 2; y  $C_{44}$ , la capacitancia del cuerpo 4. La carga acumulada por el cuerpo 1 será entonces igual a  $= -[ \quad + \quad ]$ .

Una vez se coloquen en contacto el cuerpo 1 y el cuerpo 3, y mientras este último se encuentre aterrizado, se transfiere la totalidad de la carga al cuerpo 3 y la tensión del cuerpo 1 respecto a tierra, se vuelve cero. Por otra parte, si al presentarse el contacto entre los cuerpos, el cuerpo 3 se encuentra aislado de tierra y los cuerpos 2 y 4 están cargados por frotamiento, se pueden presentar dos comportamientos diferentes, los cuales están sujetos al tamaño del cuerpo 3. Si el cuerpo 3 se encuentra aislado y es muy grande comparado con los otros cuerpos, la carga acumulada en el cuerpo 1 y la diferencia de potencial entre los cuerpos será:  $= -[ \quad + \quad ]$  y  $- = \frac{\quad}{\quad}$ , respectivamente. Si el cuerpo 3 se encuentra aislado y es muy pequeño comparado con los otros cuerpos, la carga acumulada en el cuerpo 1 y la diferencia de potencial entre los cuerpos será:  $\rightarrow 0$  y  $- = 0$ , respectivamente.

Tomando ahora en consideración un caso específico en el que se manifiesta una descarga del cuerpo humano, como sucede en el descenso de una persona de un automóvil que luego cierra la puerta o coloca la llave en la misma, se evidenció con claridad los aspectos que intervienen durante la interacción entre los cuerpos. Para los fabricantes de automóviles este tipo de descargas representan una gran preocupación debido a que se convierten en contratiempos para los usuarios de los vehículos, entre los que se destacan la momentánea desorientación o sobresalto y en el peor de los casos, el origen de graves incendios [5].

De acuerdo a experimentaciones realizadas, se determinó que la carga transferida por el movimiento y rozamiento de un automóvil con el viento a una persona no produce una elevación de tensión importante como para producir una descarga electrostática; además, se estableció que la descarga son producto de cargas transferidas al cuerpo humano por la fricción de la ropa con el asiento de automóvil y de los zapatos con el piso [5]. También se manifestaron elevaciones de potencial de hasta 15kV, incluso en condiciones de alta humedad relativa; la descarga se comportó como se presenta en la figura 21, la cual se obtuvo de un osciloscopio digital con escala vertical de 3000Div/V.

Figura 21. Curva de tensión de una persona cuando se baja de un automóvil.

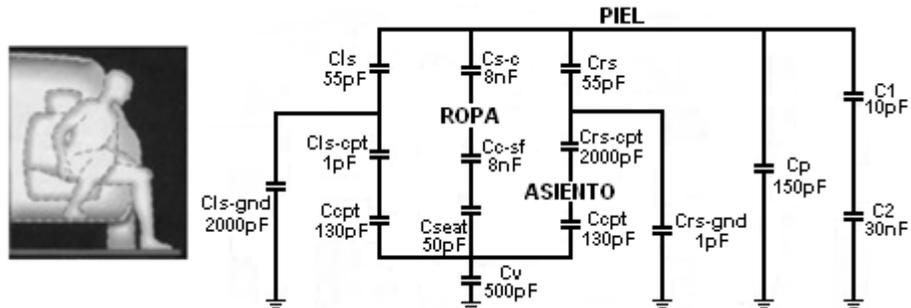


Fuente: D. Pirici, J. Rivenc, T. Lebey, D. Malec, A. Agneray y M. Cheaib, "A Physical Model to Explain Electrostatic Charging in an Automotive Environment; Correlation with Experimental Approach," *Electrical Overstress/Electrostatic Discharge Symposium*, 2003.

A partir de estos resultados se consideró la representación del modelo del conjunto cuerpo humano-automóvil, en función de elementos capacitivos [5], debido a que las descargas se presentaron cuando la persona descendía del automóvil; para ello, se proponen dos modelos partiendo del presentado en la IEC [7]; el primer modelo contempla el caso en el que una persona se encuentra sentada en el automóvil pero con un pie en el suelo, así como lo presenta la figura 22; el otro contempla el caso en el que la persona está bajando del automóvil y ha perdido el contacto con el asiento, así como se presenta en la figura 23.

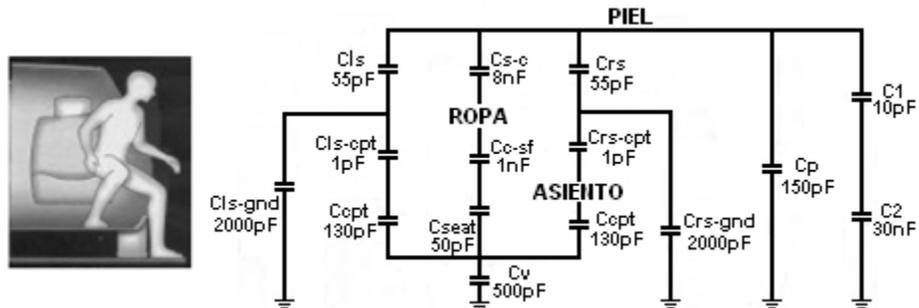
Al realizar las simulaciones de las ESD experimentadas por las personas y según los modelos expuestos anteriormente, obtuvieron comportamientos aproximados al presentado en la figura 21; por lo que afirman entonces que los modelos del cuerpo humano planteados con elementos capacitivos, corresponden con comportamientos típicos ante una ESD [5].

Figura 22. Modelo del cuerpo humano según especificaciones del caso 1.



Fuente: D. Pirici, J. Rivenc, T. Lebey, D. Malec, A. Agneray y M. Cheaib, "A Physical Model to Explain Electrostatic Charging in an Automotive Environment; Correlation with Experimental Approach," *Electrical Overstress/Electrostatic Discharge Symposium*, p.p. 5, 2003.

Figura 23. Modelo del cuerpo humano según especificaciones del caso 2.



Fuente: D. Pirici, J. Rivenc, T. Lebey, D. Malec, A. Agneray y M. Cheaib, "A Physical Model to Explain Electrostatic Charging in an Automotive Environment; Correlation with Experimental Approach," *Electrical Overstress/Electrostatic Discharge Symposium*, p.p. 5, 2003.

Otras documentaciones estudiadas, permiten afirmar que las ESD producto del cuerpo humano también han sido analizadas en función de las magnitudes de las

variables eléctricas, específicamente de la tensión y la corriente de carga y el tiempo de subida de las ESD; para ello, fue necesario cargar el cuerpo humano a diferentes niveles de tensión, así como se presenta en la tabla 7.

**Tabla 7. Magnitudes eléctricas medidas durante experimentación de ESD propiciadas por el cuerpo humano.**

| Tensión Electrostática (V) | Pico de corriente (A) | Tiempo de subida (nS) |
|----------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1000                       | 0,114                 | 1,94                  |
| 2000                       | 0,374                 | 3,57                  |
| 4000                       | 0,93                  | 4,63                  |
| 6000                       | 0,94                  | 6,6                   |
| 8000                       | 2,28                  | 37                    |
| 10000                      | 2,6                   | 35,8                  |
| 12000                      | 4,57                  | 37,3                  |
| 14000                      | 8                     | 39                    |

Fuente: W.P. O'Neill, B.R. Varlow, "Electrostatic discharges from the human body", *IEE Proceedings*, Vol. 133, Pt. A, No. 9, Dec. 1986.

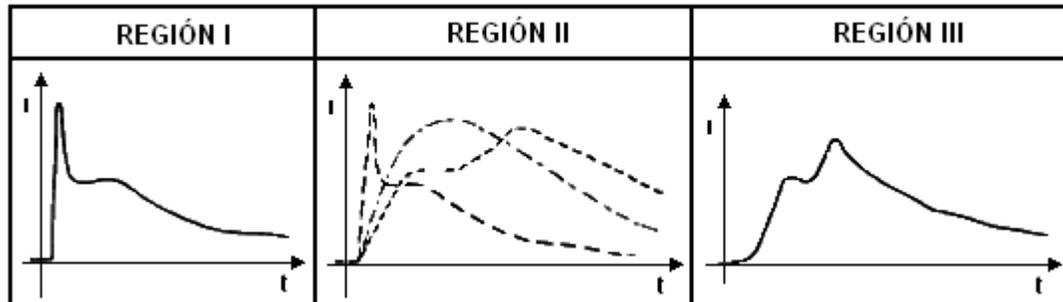
Los resultados obtenidos permitieron establecer que el cuerpo cuenta con una capacitancia promedio de 163,6pF y que alcanza tensiones entre 500V y 15kV [38]; al analizar las descargas manifestadas por el cuerpo sobre un objeto que se encontraba aterrizado, identificaron las siguientes características:

- La magnitud del pico de la descarga aumenta con el aumento de la tensión electrostática.
- El tiempo de subida, que va desde un valor del 10% al 90% de la magnitud del pico de corriente aumenta con el aumento de la tensión electrostática.
- No es posible establecer una relación entre los valores de tensión electrostática y las magnitudes analizadas dadas sus variaciones irregulares.

En lo referente a las formas de onda de las corrientes de descarga, documentaciones obtenidas de trabajos experimentales establecen que estas manifiestan comportamientos similares a la forma de onda presentada en la figura 21; las cuales contrastaron con la forma de onda propuesta por la IEC en la figura

16, específicamente en los cortos tiempos de subida y de bajada de la señal. A diferencia de la IEC, la IEEE clasifica diferentes tipos de ESD en función de las denominadas regiones [12], cuyos comportamientos se presentan en la figura 24.

Figura 24. Clasificación de las formas de onda de las ESD según IEEE.



Fuente: Guide on Electrostatic Discharge (ESD): Characterization of the ESD Environment, IEEE Standard C62.47, 1992.

- La región I: las tensiones de descarga no superan los 4kV y las variaciones de corriente son mayores a 20A/nS, con tiempos de subida menores a 1nS. Esta forma de onda se caracteriza por ser repetitiva.
- La región II: las tensiones de descarga se encuentran entre 3kV y 10kV, y con variaciones de corriente entre de 20A/nS y 0,4A/nS, con tiempos de subida entre 2 y 20nS. Esta forma de onda se caracteriza por ser muy variable.
- La región III: las tensiones de descarga superan los 8kV y las variaciones de corriente se encuentran entre 15A/nS y 0,4A/nS, con tiempos de subida mayores a 20nS. Esta forma de onda se caracteriza por ser no repetitiva.

Finalmente, se puede anotar que se han establecido expresiones matemáticas experimentales, que relacionan algunos parámetros de las ESD[40]; ejemplo de ello, corresponde a las experimentaciones de las ESD sobre el cuerpo humano con un simulador de descargas y utilizando el modelo circuital propuesto según la norma IEC [7]. Esta experimentación permitió adquirir medidas de tensión de descarga, corriente pico de descarga, velocidad de aproximación del elemento sobre el que se realiza la descarga y tiempo de subida de la ESD; inicialmente se

consideraron tensiones de descarga de 4kV y 8kV, que fueron aplicadas 33 veces por cada nivel de tensión, para posteriormente medir picos de corriente a velocidades de aproximación fijas.

Con esta información e incorporando técnicas de regresión lineal a los datos adquiridos, propusieron la expresión  $I_p \cdot t_r / V = 0,002$ , donde,  $I_p$  representa el pico de corriente de la ESD;  $t_r$ , al tiempo de subida de la señal;  $V_C$ , a la tensión de descarga; y  $\alpha$ , representa la constante de proporcionalidad que depende de las condiciones experimentales. Se sustenta que esta es una expresión preliminar que debe ser sometida a validación en diferentes condiciones de trabajo, debido a que la probabilidad de repetitividad de una ESD es muy baja; además, debe ser validada en condiciones reales[40].

### **3.2.3 Interacción entre los SPT y eventos de descargas electrostáticas**

Dentro de los conocimientos básicos de la electricidad, es muy conocido el hecho que al conectar un elemento cargado a tierra, toda su carga eléctrica es transmitida a ella [29]; por ello, el análisis de las ESD sobre los sistemas de puesta a tierra ha cobrado significativa importancia. Estudios realizados, no solo consideran el comportamiento o interacción de las cargas electrostáticas del ser humano con diferentes cuerpos, si no que también contempla la interacción de las personas o los objetos cargados con los sistemas de puesta a tierra[36]. Tomando como referencia la figura 20 y contemplando las siguientes condiciones:

- Descartar la existencia de los cuerpos 3 y 4.
- Considerar inicialmente el cuerpo 1 como descargado y aislado de tierra.
- Considerar el cuerpo 2 cargado con una carga  $Q_2$  y aislado de tierra.

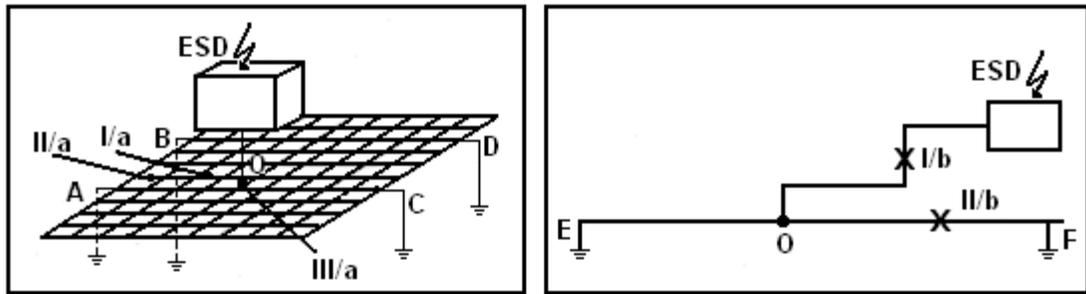
Establecieron que, el cuerpo 1 al estar aterrizado, adquiere por inducción una carga neta de igual magnitud pero de signo opuesto a la que presenta el cuerpo 2;

al desconectar la conexión existente entre el cuerpo 1 y tierra, este queda cargado y con un potencial a tierra que es directamente proporcional a la carga neta adquirida e inversamente proporcional a la capacitancia entre el cuerpo y la tierra. Este comportamiento evidencia la importancia de los SPT para la mitigación de las descargas electrostáticas[36], por lo que se recomienda mantener el control del potencial del cuerpo humano guiándolo efectivamente a tierra, garantizando así una mínima diferencia de potencial entre este y el SPT.

Por otra parte, al considerar la eficiencia de los SPT convencionales (edificios familiares, oficinas e industrias) ante ESD, notaron que su respuesta se encuentra limitada, pues estos sistemas comúnmente se diseñen considerando fallas a tierra a frecuencia industrial (50 o 60Hz), descartando fallas a frecuencias mayores [20]; lo que propicia que importantes picos de corriente a cortas duraciones no se despejen eficientemente y pongan en riesgo todo a su paso. Experimentaciones y simulaciones específicas evaluaron la eficiencia de los SPT mallados y radiales ante el despeje ESD [20], considerando los esquemas presentados en la figura 25.

Las simulaciones se realizaron contemplando una tensión de descarga de 4kV, para luego determinar la corriente de descarga por medio de integrales de campos magnéticos [20]; se utilizó un simulador de descargas electrostáticas y un osciloscopio digital para la medida de la corriente de descarga. Las mediciones y cálculos se hicieron en los puntos señalados en la figura 25 como I/a, II/a, III/a, I/b y II/b, obteniendo como resultado las formas de onda presentadas en las figuras 26 y 27, para el SPT mallado y el SPT radial, respectivamente.

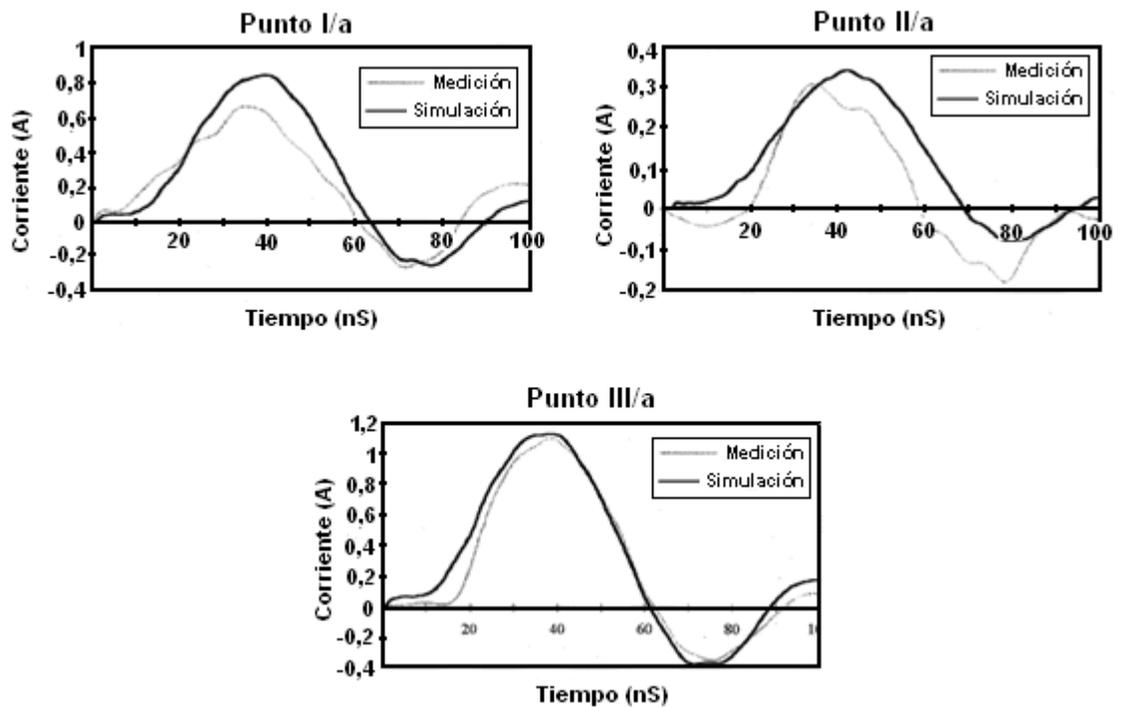
**Figura 25. Sistemas de puesta a tierra bajo estudio.**



a) Sistema de puesta a tierra mallado.

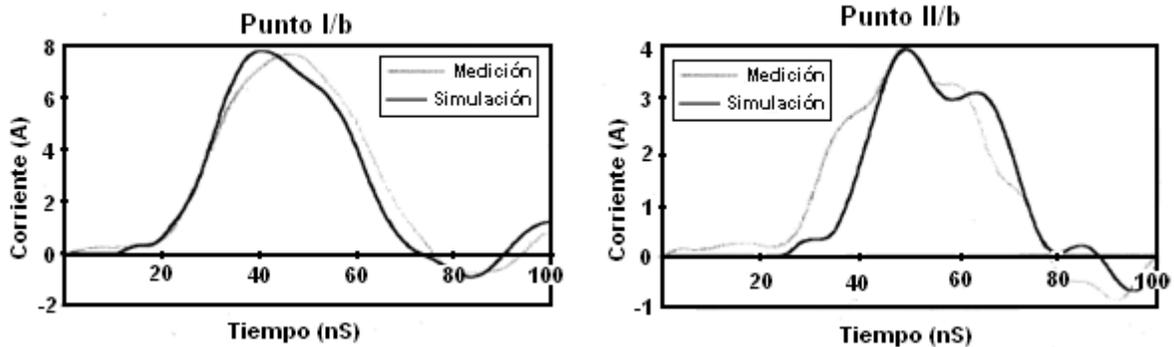
b) Sistema de puesta a tierra radial.

Fuente: M. Angeli, E. Cardelli, N. Esposito, B. Tellini, "Interaction between Grounding Systems and Electrostatic Discharge Events" *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 34, no. 5, September 1998.  
 Figura 26. Formas de onda de ESD medidas y simuladas, para SPT mallado.



Fuente: M. Angeli, E. Cardelli, N. Esposito, B. Tellini, "Interaction between Grounding Systems and Electrostatic Discharge Events" *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 34, no. 5, September 1998.

Figura 27. Formas de onda de ESD medidas y simuladas, para SPT radial.



Fuente: M. Angeli, E. Cardelli, N. Esposito, B. Tellini, "Interaction between Grounding Systems and Electrostatic Discharge Events" *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 34, no. 5, September 1998.

En la figura 26 y en la figura 27, se observa que el comportamiento simulado se aproxima significativamente al medido, y que sus diferencias se deben a inconvenientes técnicos asociados con el comportamiento no lineal de las puntas del osciloscopio, ruidos externos, baja repetitividad de las curvas, entre otras cosas. Además, se puede anotar que para una descarga de 4kV sobre una malla de tierra se produce en la rama principal una corriente pico cercana a 1,1A, mientras que en el sistema radial se manifiesta una corriente pico cercana a 8A.

### 3.3 MANIFESTACIONES DE CARGAS ELECTROSTÁTICAS EN PROCESOS INDUSTRIALES

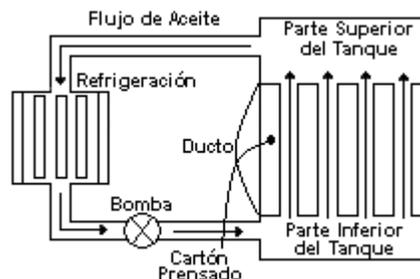
Las acumulaciones de cargas electrostáticas se presentan en diversos procesos industriales como un fenómeno que se considera parte de ellos mismos, debido a las características propias de los procesos; en muchos de estos casos, los problemas que generan la presencia de estas cargas electrostáticas ponen en riesgo a los equipos, al proceso, a la producción y/o a los seres humanos.

### 3.3.1 Acumulación de cargas electrostáticas en refrigerantes de transformadores

Los transformadores de potencia utilizados en los niveles de transmisión subtransmisión y distribución, utilizan aceites refrigerantes para disminuir la temperatura en sus devanados y el núcleo; tales aceites se caracterizan porque su conductividad debe ser baja para que se mantenga el aislamiento y la integridad del transformador, pues así se garantiza su buen funcionamiento.

El aceite dieléctrico circula por el transformador ya sea de manera natural (circula por cambio de densidades debido al calentamiento) o de manera forzada (circula como producto del impulso proporcionado por una bomba), así como se presenta en la figura 28. En este proceso se acumulan cargas electrostáticas como resultado de la fricción que experimenta con el aislamiento en cartón prensado del bobinado [23], [13]; las tensiones que pueden adquirirse como producto de estas acumulaciones alcanzan los miles de volts y dependen, por supuesto, de la conductividad del aceite y del tiempo de relajación del mismo [33].

Figura 28. Esquema de circulación de aceite forzado en un transformador.



Fuente: T. Ogura, Y. Shibuya, K. Tsuji, "Evaluation of Streaming Electrification Considering Circulation of Charged Oil", Proceedings of 2001 International Symposium on Electrical Insulating Materials, p.p 860, Nov.2001.

Resultados obtenidos de experimentaciones realizadas con este tipo de aislamiento en transformadores reflejó que las cargas electrostáticas son acumuladas en el aislamiento de cartón prensado y que la magnitud de la tensión electrostática depende del campo eléctrico presente en los extremos de las

bobinas de los transformadores cerca de los puntos donde existe aislamiento con cartón prensado [23] y [13]; aun así, se determinó que con el pasar del tiempo, este aislamiento absorbe componentes del aceite dieléctrico mejorando las condiciones para que se acumulen cargas electrostáticas, lo que produce en los transformadores de muy altas tensiones, emisión de acetileno como consecuencia de las altas tensiones y descargas electrostáticas presentadas en los mismos[30].

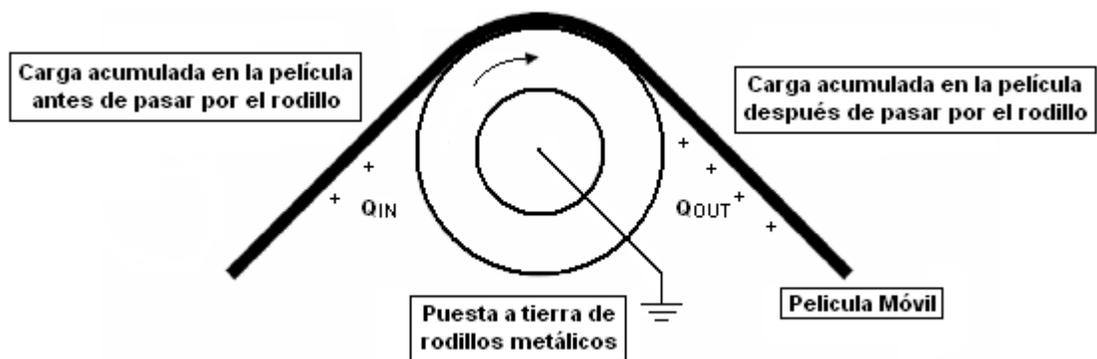
### **3.3.2 Acumulación de cargas electrostáticas en procesos que utilizan rodillos**

En algunos procesos productivos el producto final es o depende de una película muy delgada de determinado material, por lo que se hace necesario incorporar a estos procesos los rodillos; los cuales permiten extender de manera continua la película mientras se transporta a lo largo de un gran conjunto de rodillos a los que se les realiza monitoreo de la velocidad, se controla el grosor de la película y se monitorea la calidad de la misma. Ejemplo de esta incorporación se puede observar en la fabricación de empaques y en la producción de papel.

Durante el siglo XIX, la creciente necesidad de fabricación de papel impulsó el desarrollo de circuitos impresos, ensamble de pantallas electrónicas y producción de celdas solares económicas, entre otras cosas. Del mismo modo, surgieron problemas debidos a las manifestaciones de cargas electrostáticas en las películas aisladas de material que se transportaban por los rodillos, lo que afectó principalmente a algunos materiales sensibles a la acumulación de polvos y a circuitos impresos, y provocó daños e imperfecciones al producto final; tales manifestaciones de cargas electrostáticas se detectaron en el proceso de transporte y en el enrollado y desenrollado de materiales.

- Transporte de materiales: durante el transporte, la acumulación de cargas en los materiales se presenta producto de la fricción entre estos y superficies químicamente diferentes como los rodillos metálicos aislados o rodillos cubiertos con polímeros, así como se presenta en la figura 29. La magnitud de la carga acumulada depende del rozamiento entre el material y los rodillos, y de la separación existente entre estos en la serie triboeléctrica.

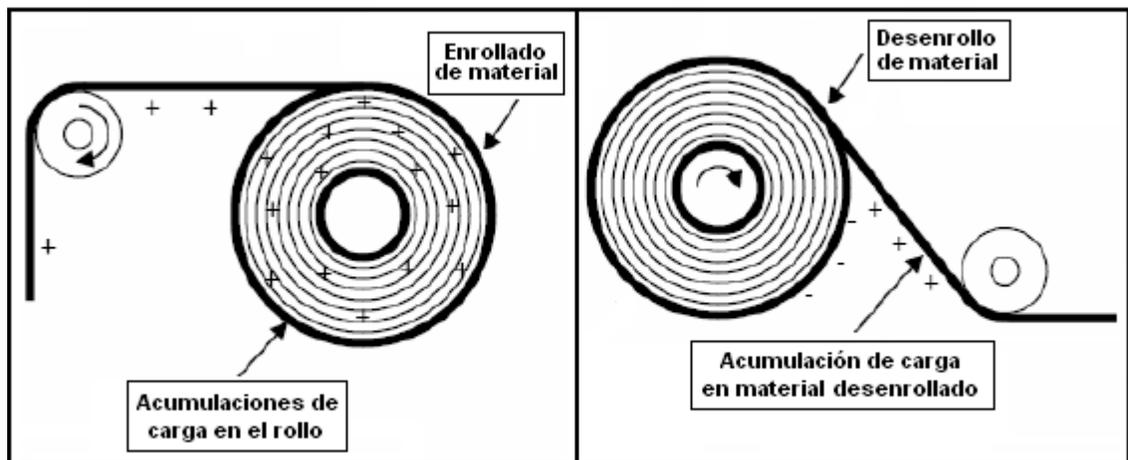
Figura 29. Esquema de acumulación de cargas en transporte de película de materiales en rodillos.



Fuente:K. Robinson, "Electrostatic Issues in Roll-to-Roll Manufacturing Operations", *Record of the 2007 IEEE 42nd IAS Annual Meeting Conference*, p.p. 782, 2007.

- Desenrollo de materiales: en muchos procesos en los que se utilizan rodillos de transporte, los productos finales son obtenidos a partir de secuencias de diferentes procesos con rodillos; ejemplo de ello es lo sucedido con la materia prima para aplicaciones de impresión. Esta materia prima es entregada en rollos, desenrollada para su pintado y secado, enrollada nuevamente para llevarla al siguiente punto en donde se desenrolla y se transforma en un material manejable para posteriormente enrollarlo, cortarlo y empacarlo; durante todo este proceso se han presentado cargas electrostáticas que se acumulan en los rollos de material durante cada una de las etapas del mismo.

Figura 30. Esquema de acumulación de cargas en enrollado y desenrollado de papel.



a) Enrollado de material

b) Desenrollado de material

Fuente: K. Robinson, "Electrostatic Issues in Roll-to-Roll Manufacturing Operations", *Record of the 2007 IEEE 42nd IAS Annual Meeting Conference*, p.p. 782-783, 2007.

### 3.3.3 Acumulación de carga electrostática en discos duros

Una interesante área de estudio en la industria informática hace referencia a la medición y control de las tensiones de ruptura para los medios de almacenamiento magnético, específicamente para los discos duros. Gracias a los avances presentados en estos elementos se ha aligerado la cabeza lectora y el disco extrayéndole los recubrimientos de carbón que tenían en otras épocas, lo que produjo una disminución en la tensión de ruptura entre estos dispositivos del disco duro; así mismo, la reducción de la separación entre la aguja y el disco ha llegado al límite de presentar un contacto significativo entre estos dos elementos generándose carga triboeléctrica en la aguja y elevando la tensión entre la cabeza lectora y el disco, lo que le ocasiona daños significativos [15].

Experimentaciones realizadas a discos duros de aluminio permiten establecer que las tensiones de ruptura para estos, se encuentran entre los 1,6V y los 17V [15]. Por otra parte, se determinó que no solamente las agujas sino que también el disco duro, se cargan electrostáticamente por el rozamiento que se presenta a

medida que el disco rota [19]. Mediciones realizadas arrojaron que durante 6 horas de giro ininterrumpidas del disco duro, este alcanzaba una tensión electrostática de 20V, donde la polaridad dependía de la temperatura, pues a 20°C la polaridad de la tensión en el disco era negativa mientras que a 25°C era positiva; este fenómeno aún no ha sido profundizado.

### **3.3.4 Acumulación de cargas electrostáticas en el interior de silos industriales**

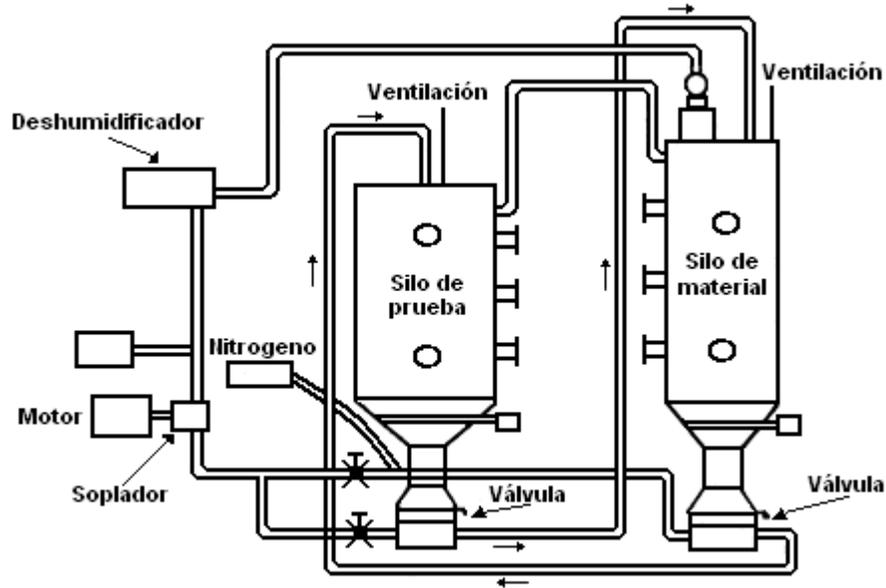
Los grandes silos utilizados en la industria se encuentran expuestos a explosiones que los destruyan y quemen todo o gran parte del material almacenado en ellos; según investigaciones realizadas se ha determinado que las chispas producidas por la acumulación de carga electrostática dentro de los silos, comprende una de las principales causas de sus explosiones[4], [14]. Estas acumulaciones de cargas son debidas al transporte de materiales aislantes hacia los silos, en forma de partículas; aun así, se desconocen muchos factores que también intervienen, como por ejemplo la carga transferida a los silos, que papel juega la temperatura, la presión de aire, el material almacenado, la humedad relativa del ambiente, etc.

Tomando esto en consideración, se estudiaron algunos de estos aspectos con un modelo a escala de silos industriales como el presentado en la figura 31[24], el cual transfieren a través de alta presión de aire, polietileno de alta densidad. Durante la primera prueba el flujo de aire fue de 16m<sup>3</sup>/min y una humedad relativa menor al 50%, obteniendo como resultado una carga estática para el polietileno de +0,7μC/kg; al incrementar la humedad relativa por encima del 50%, se observó una disminución de la carga electrostática para el material.

Durante la segunda prueba se midió el campo eléctrico dentro del silo, considerando el mismo flujo de aire con una humedad relativa menor al 50%; esto permitió establecer que las paredes del cono alcanzan campo eléctricos de hasta

150kV/m con polaridad positiva y a que a medida que se va subiendo el material, se pueden experimentar campos eléctricos negativos de menor magnitud; aun así, estos valores de campos eléctricos ocasionan chispas por descargas electrostáticas, que producen incendios y explosiones.

Figura 31. Esquema de prueba para analizar acumulación de cargas en silos.



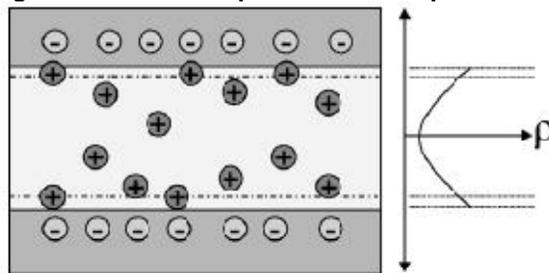
Fuente: P. Cartwright, S. Singh, A. G. Bailey, L. J. Rose, "Electrostatic Charging Characteristics of Polyethylene Powder During Pneumatic Conveying", *IEEE Transactions On Industry Applications*, vol. IA-21, No. 2., March/April 1985.

### 3.3.5 Acumulación de cargas electrostáticas y flujo de corriente ductos para transporte de combustibles.

En el almacenamiento y transporte de combustibles, la acumulación de cargas electrostáticas representa uno de los principales problemas para las industrias petroleras y comercializadoras de combustibles, pues, una posible descarga electrostática puede propiciar corrientes a través de los ductos transportadores y de acuerdo al comportamiento del combustible, incendios importantes [17]. Para controlar y mitigar estos riesgos, han estudiado detalladamente aspectos importantes, tales como la generación de las cargas y su disipación; controlando la primera o eliminando la segunda, se pueden evitar descargas espontáneas que posean energía suficiente como para originar incendios y/o explosiones.

Según lo expuesto en [17], cuando un combustible líquido se mueve a través de un ducto se presenta un efecto de doble capa eléctrica, así como se presenta en la figura 32. Una capa con concentración de cargas eléctricas negativas se presenta en la superficie de las paredes del tubo y una capa de cargas eléctricas positivas en el combustible se ubica cerca de las paredes, en esta última la concentración disminuye a medida que se aproximan al centro del combustible; comportamiento que produce un efecto de separación de cargas en la interface sólido-líquida, pues estas son transferidas al ducto, y de acuerdo a la conductividad eléctrica del material presentan varios tipos de comportamientos.

Figura 32. Distribución de cargas eléctricas en el proceso de transporte de combustible.



Fuente: J. Vazquez, J. Rivenc, A. Agneray, T. Paillat, "A critical approach to measure streaming current: case of fuels flowing through conductive and insulating polymer pipes", *IEEE Transactions on industry applications*, vol. 41, issue 5, sep/oct 2005

Así mismo, analizaron teóricamente las propiedades de los distintos materiales utilizados en los ductos transportadores de combustible; el primer tipo lo comprenden los materiales conductores que se equipotencializan a tierra (con puesta a tierra intencional o por encontrarse enterrados), los cuales permiten la libre movilización de las cargas electrostáticas transferidas a ellos por convección, las cargas se mueven hacia tierra evitando acumulaciones peligrosas de las mismas que puedan ocasionar chispas. El segundo tipo comprende los materiales aislantes o aquellos conductores que no se equipotencializan a tierra, los cuales dificultan la movilidad a tierra de las cargas generadas por convección; motivo por el cual no pueden ser disipadas eficientemente, lo que provoca acumulaciones de cargas eléctricas a medida que el combustible líquido sigue fluyendo.

Por otra parte, con un banco de pruebas realizaron experimentaciones con diferentes combustibles en las cuales los canalizaban por tuberías conductoras aterrizadas y/o aisladas. Resultados obtenidos reflejaron corrientes a tierra desde la tubería conductora aterrizada cuya magnitud incrementaba mientras el combustible se bombeaba y disminuía cuando el combustible dejaba de fluir hasta hacerse cero. También, experimentaron con una tubería aislada eléctricamente; en esta, la corriente fluía hacia la tubería, dejándola cargada hasta por 30 minutos y luego se disminuía por pérdidas con el aire.

### **3.4 RIESGOS ASOCIADOS A CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS Y DESCARGAS ELECTROSTÁTICAS**

Así como se ha mencionado en los numerales anteriores, las ESD comprenden una importante fuente de problemas en diferentes etapas de los procesos industriales; en términos generales, los problemas producidos por las cargas electrostáticas pueden agruparse teniendo en cuenta que está

originando estas cargas [28]. El primer grupo lo conforman los problemas de atracción y acumulación de polvo y suciedades en productos o líneas de procesamiento, de atracción de elementos suaves y livianos a metales que se encuentren aterrizados, de bloqueos durante el transporte y procesamiento de productos y de daños a componentes electrónicos, los cuales son originados por acumulación de cargas electrostáticas debido a los campos eléctricos a los que se encuentren expuestos durante el proceso o el desarrollo de determinado grupo de actividades. El segundo grupo lo conforman los problemas de incendios y explosiones por la ignición de vapores combustibles y nubes de residuos, de perturbaciones fisiológicas, de daños a componentes electrónicos y de patrones de descarga en materiales fotosensibles, los cuales son originados por las ESD.

Las descargas electrostáticas pueden producirse al aire libre cuando se alcanzan campos eléctricos mayores a 30kV/cm; el ser humano posee una capacitancia que oscila entre los 100pF y los 300pF, la cual es suficiente para que este almacene una energía de hasta 100mJ, factor importante a la hora de evaluar riesgos de incendios y explosiones en ambientes industriales, puesto que con menos de 10mJ muchos materiales inflamables pueden incendiarse y provocar accidentes [3], [26].

Como prevención a los problemas y accidentes que se pueden presentar debido a las descargas electrostáticas o campos eléctricos, se equipotencializan a tierra todos los materiales o metales conductores y se trata de proporcionar una trayectoria de descarga eficaz a tierra para los materiales aislados o aislantes, pues así se disminuyen las acumulaciones de cargas. Si bien, estas prevenciones son posibles de efectuar en muchas situaciones, en otras, se requieren de otras acciones de apoyo para mitigar el riesgo de accidente por ESD.

Un método alternativo para la reducción en la acumulación de cargas estáticas son los eliminadores electrostáticos, los cuales ionizan el aire alrededor del

aislador cargado y le proporcionan un camino conductor entre su superficie y tierra; estos eliminadores pueden ser implementados en ambientes con vapores y líquidos combustibles ya que reducen notoriamente la energía de las descargas sin producir chispas, lo que los convierte en soluciones seguras para muchas aplicaciones de gran peligrosidad. A continuación se describen los diferentes tipos de eliminadores de cargas electrostáticas.

- **Eliminadores activos:** estos eliminadores producen iones con polaridades positivas y negativas al aplicarles una tensión alterna. Poseen grandes limitaciones e inconvenientes, en algunos casos pierden muchos iones por recombinación mucho antes de que puedan neutralizar las cargas electrostáticas, desperdician energía cuando la carga es unipolar y puede producir pequeñas elevaciones superficiales de voltaje si es utilizado muy cerca a la superficie del aislante, entre otros aspectos; debido a estos inconvenientes se modificó la producción de iones, realizándose ahora a través de una fuente retroalimentada que proporciona un mayor número de iones para neutralización. Estos equipos se utilizan principalmente en procesos que se desarrollan a velocidades considerablemente altas, incluso pueden trabajar a varios metros de distancia del objetivo.
- **Eliminadores pasivo y radiactivos:** Los eliminadores pasivos son aquellos que utilizan la misma carga de la superficie del aislante para producir iones por descarga corona, dejando una carga residual en el material. Por su parte, los eliminadores radiactivos son un tipo de eliminadores pasivos que no utilizan descarga corona debido a la producción de chispas; se utilizan principalmente en aplicaciones con atmósferas muy sensibles que contienen vapores combustibles en donde no pueden producirse chispas, su limitante consiste en que su tiempo útil es de 138 días debido a la vida del polonio 210 que emite rayos  $\alpha$  durante sólo 138 días por lo que debe ser renovado periódicamente.

#### **4. CORRELACIÓN ENTRE LA REVISIÓN TEMÁTICA Y LA MANIFESTACIÓN DE CARGAS ELECTROSTÁTICAS EN EMBARCACIONES QUE SE ENCUENTRAN EN TIERRA**

La presencia de cargas electrostáticas en los procesos industriales, comprenden un fenómeno físico de gran importancia no solo por las aplicaciones positivas que se han desarrollado a partir de estas, si no también por los problemas que le ha generado a este sector. Con anterioridad se presentaron diversos casos en los que tanto la manifestación como el comportamiento de las cargas electrostáticas ha sido estudiado, analizado e identificado; sin embargo existen otros casos en los que la temática ha sido escasamente estudiada o en el peor de los casos, aun no se cuenta con algún registro o soporte que brinde un punto de partida.

En el sector naval, más específicamente en la reparación y mantenimiento de embarcaciones cuando se encuentran en tierra, se ha afirmado, por parte del personal de mantenimiento (ver anexo 2), presenciar ESD de alta magnitud, aun cuando se realizan las actividades previas al inicio de los trabajos, que ocasionaron serios y significativos problemas que afectaron el desarrollo de las actividades, provocaron accidentes e incendios en embarcaciones y/o sus alrededores. Este caso específico no registra un estudio detallado, motivo por el cual, las medidas y acciones tomadas hasta el momento para prevenir y mitigar (en forma parcial) dichas acumulaciones de cargas electrostáticas se fundamentan principalmente en el sentido común y experiencia con la que cuenta el personal de mantenimiento.

Por lo anterior, se puede afirmar que es pertinente y necesario plantear una metodología que permita estudiar y analizar este fenómeno para proponer soluciones óptimas que reduzcan los riesgos a los que se encuentran expuestos los seres humanos y las embarcaciones, durante el desarrollo de las diversas

actividades de reparación y mantenimiento para las cuales arriban las embarcaciones a tierra.

#### **4.1 PROCEDIMIENTOS DE REPARACIÓN Y/O MANTENIMIENTO DE EMBARCACIONES EN TIERRA**

En los astilleros, los principales servicios a ofrecer o actividades a realizar se concentran en la reparación y/o mantenimiento de embarcaciones y artefactos navales y fluviales. Para desarrollar y ejecutar dichas actividades es necesario contar con una infraestructura en tierra (talleres, zonas de almacenamiento, varaderos, equipos, maquinarias, entre otros) y en agua, que apoye la ejecución.

Teniendo en cuenta como se encuentra conformada la infraestructura, es indispensable establecer, que existe una serie de procedimientos y procesos básicos que se deben seguir antes y durante la ejecución de las actividades fundamentales que desarrollan los diferentes astilleros. La actividad inicial que debe realizar una embarcación que arribe al muelle de un astillero, consiste en utilizar las tecnologías de infraestructura en agua para poner en seco la embarcación, pues en tierra, es donde se ejecutan las actividades de reparación y/o mantenimiento.

Previo al inicio de actividades, es necesario tomar ciertas medidas que permitan asegurar la embarcación y a las personas que trabajaran en ella; dentro de estas medidas se destacan la puesta a tierra del casco metálico de la embarcación, la prueba de ausencia de vapores, limpieza de tanques de combustibles, conexión de aguas para refrigeración y descargas de aguas sentinas.

Una vez verificada cada una de las medidas de seguridad, se puede dar inicio a las actividades para las cuales arribó la embarcación, ya sea para abrasión del casco de la embarcación, pintura del casco de la embarcación, cambio o

reparación de láminas, soldadura de las laminas, instalación de tuberías, instalación de válvulas, reparación de motores y tableros eléctricos, entre otras.

#### **4.1.1 Capacidad de levante de embarcaciones, en los astilleros**

Uno de los principales limitantes con los que cuentan los astilleros para poder prestar sus servicios de reparación y mantenimiento es la capacidad de levante con la que cuentan; según esto, se clasifican en:

- Astilleros para embarcaciones menores: son aquellos astilleros que poseen la infraestructura necesaria para reparar, mantener o construir embarcaciones de hasta 24m de eslora y 50Ton de peso; en su gran mayoría poseen sistemas de puesta en seco tipo varadero.
- Astilleros para embarcaciones mayores: son aquellos que tienen capacidad para reparar, mantener y/o construir embarcaciones con eslora mayor a 24m y 50Ton de peso.

#### **4.1.2 Tecnologías para poner en seco las embarcaciones**

Dependiendo de la tecnología utilizada en los astilleros, la infraestructura en agua requerida para poner en seco las embarcaciones pueden ser de tipo dique seco, dique flotante, sincroelevador y varaderos.

- Dique seco: esta tecnología requiere de una esclusa en la cual se introducirá la embarcación; una vez cerrada dicha esclusa, se bombea el agua desde el interior hasta dejar apoyada la embarcación sobre una cama, así como se presenta en la figura 33, donde se pone en seco un submarino.
- Dique flotante: requiere de la inundación de tanques para hundir la estructura hasta el punto mas profundo del muelle y permitir el ingreso de la embarcación

que se encuentra en arribo, así como se presenta en la figura 34. Una vez la embarcación ingresa a la estructura, se achican los tanques provocando la elevación del conjunto; logrando de esta forma poner en seco la embarcación.

**Figura 33. Puesta en seco de un submarino con tecnología de dique seco.**



Fuente: GREENEVILLE [Consulta: Septiembre 12 de 2010], Disponible en: [http://www.navysite.de/ssn/ssn772\\_acc.jpg](http://www.navysite.de/ssn/ssn772_acc.jpg)

**Figura 34. Puesta en seco de embarcación con tecnología de dique flotante.**



Fuente: FLOATING DOCK [Consulta: Septiembre 12 de 2010], Disponible en: [http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Two\\_Ships-Hamburg.jpg](http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Two_Ships-Hamburg.jpg)

- Varadero: este es el sistema mas antiguo de puesta en seco de embarcaciones, actualmente se utiliza con mayor frecuencia para embarcaciones menores; esta tecnología consiste en permitir que, a través de la inclinación de un plano se efectúe el desplazamiento de la embarcación hasta colocarlo en tierra. En la figura 35, se observan embarcaciones que se colocaron en seco, gracias a esta tecnología.

- Sincroelevador: esta tecnología requiere de un sistema de vigas articuladas o de cabestrantes que tienen en sus extremos ganchos mecánicos; el conjunto puede ser operado sincrónicamente para generar una plataforma de izado de gran porte y así desplazar la embarcación hasta el punto deseado. En la figura 36, se observa la infraestructura para levante con este tipo de tecnología.

**Figura 35. Puesta en seco de embarcación con tecnología de varadero.**



Fuente: VARADEROS [Consulta: Septiembre 12 de 2010], Disponible en: [http://media.shipspotting.com/uploads/thumbs/rw/1013190\\_800/Ship+Photo+Varaderos+de+Celeiro,+Spain.jpg](http://media.shipspotting.com/uploads/thumbs/rw/1013190_800/Ship+Photo+Varaderos+de+Celeiro,+Spain.jpg)

**Figura 36. Puesta en seco de embarcación con tecnología de sincroelevador.**



Fuente: Base de datos fotográficas - COTECMAR.

Además de la infraestructura requerida para poner en seco las embarcaciones, es muy importante el espacio destinado para el descanso de la misma sobre tierra para la ejecución de los trabajos; en general, en los astilleros se utilizan cunas de

madera sobre estructuras metálicas con ruedas, llamadas carros de quilla y pantoque. La disposición y cantidad de las piezas de madera dependen de la forma de la estructura del barco, así como se observa en la figura 37.

**Figura 37. Descanso de embarcaciones sobre carros de quilla, para transporte a posiciones de varada.**



**Fuente: Base de datos fotográfico de COTECMAR.**

El sitio dispuesto para la ubicación final de la embarcación se conoce como posición de varada, el cual posee instalaciones eléctricas, aire comprimido, oxígeno, agua potable, agua salada, entre otras cosas, para cubrir algunas de las necesidades que se presentan durante la realización de los trabajos.

#### **4.1.3 Actividades realizadas previo al inicio de las labores de reparación y/o mantenimiento de embarcaciones**

Previo al inicio de las actividades de reparación y/o mantenimiento y con la finalidad de asegurar la embarcación y garantizarle al personal condiciones seguras de trabajo, se toman en consideración ciertas precauciones, tales como la colocar a tierra el casco metálico de la embarcación, realizar prueba de ausencia de vapores (gas free) y otras que se detallan en el anexo 1, numeral 3.2.

#### **4.1.4 Actividades realizadas durante las labores de reparación y/o mantenimiento de embarcaciones**

Dentro de las principales actividades de reparación y/o mantenimiento que se realizan en diversos astilleros se encuentran: cambios de protecciones catódicas, trabajos de abrasión, pinturas, cambio de láminas, reparación de líneas de eje, reparación de propulsores, mantenimiento a sistemas eléctricos y electrónicos, entre otras actividades de mayor especificidad [38-39]. A continuación se presentan algunos procesos en los que se desarrollan actividades indispensables para estudiar, analizar y verificar su relación con la presencia de cargas electrostáticas en los cascos de las embarcaciones; aun así, es necesario anotar que esta relación no es objeto de estudio en el presente documento.

- Sandblasting y Pintura: para la realización de actividades de pintura al casco metálico de las embarcaciones es necesario primeramente eliminar la capa de pintura existente por medio de una técnica denominada sandblasting, la cual consiste en expulsar aire y arena o granalla a alta presión sobre un metal, para eliminar de esta forma la corrosión y pintura del metal; una vez expuesto el casco de la embarcación, se aplica el anticorrosivo y luego la pintura naval. En el anexo 1 numeral 3.3, se presentan mayores detalles de este proceso.
- Corte y cambio de láminas: para la realización de actividades de corte y cambio de láminas en el casco de la embarcación, se debe tener en cuenta que primeramente es necesario cortar la lámina que se encuentra deteriorada o desgastada; para ello, se utilizan tanto las técnicas oxiacetilénicas como las de arco eléctrico. En el anexo 1 numeral 3.3, se presentan mayores detalles de este proceso.

## **4.2 MANIFESTACIÓN DE CARGAS ELECTROSTÁTICAS DURANTE LA REPARACIÓN Y/O MANTENIMIENTO DE EMBARCACIONES**

Como resultado de los diferentes procesos de reparación y/o mantenimiento de embarcaciones que se desarrollan en tierra, principalmente en los astilleros para embarcaciones mayores, se afirma, por parte del personal de reparación y/o mantenimiento (ver anexo 2), haber presenciado ESD cuando estos entran en contacto con el casco metálico de la embarcación; de acuerdo a testimonios del personal (soldadores, trabajadores de válvulas, entre otros) las descargas son fuertes y han provocado desde pequeñas reacciones y sensaciones en el cuerpo humano hasta accidentes graves y caídas desde escalinatas e incendios.

Tomando en consideración esta problemática y fundamentándose en el conocimiento y principios básicos de cargas electrostáticas, antes del inicio de los trabajos, el personal encargado coloca un conductor entre el casco metálico de la embarcación y tierra, este conductor se ubica muy próximo al lugar en el que se desarrollaran las actividades; este criterio se asume con el objeto de asegurar un camino a tierra para canalizar las cargas que se acumulen en el casco.

Gracias a este procedimiento de trabajo, se puede sustentar que en la actualidad no se cuenta con una metodología que permita equipotencializar eficazmente a tierra el casco de la embarcación y garantizar la seguridad del personal y de la embarcación durante el desarrollo de las actividades. Aun así, es pertinente anotar que una vez ubicada la embarcación en la posición de varada, esta es conectada al SPTa través de varios conductores que se sueldan al casco por medio de un elemento metálico también soldado. Procedimiento que se realiza aunque el casco de la embarcación sea metálico, ya que se aísla de tierra por las cunas de madera sobre las cuales reposa la embarcación en los carros de quillas, ver figura 36.

Según afirmaciones del personal de trabajo, esta medida disminuyó significativamente la frecuencia de los eventos en donde el casco de la embarcación se electrizaba y producía descargas electrostáticas; sin embargo, no las eliminó totalmente pues la superficie del casco de una embarcación puede alcanzar cerca de 3000m<sup>2</sup> con aceros navales metálicos de hasta 1" de espesor, los cuales pueden provocar que las descargas electrostáticas sean sectorizadas gracias a la distribución que se le ofrece a los puntos de conexión a tierra que se realizan entre el casco de la embarcación y el SPT.

#### **4.3 RELACIÓN ENTRE LA TEMÁTICA ESTUDIADA Y LA PRESENCIA DE CARGAS ELECTROSTÁTICAS EN LOS CASCOS DE LAS EMBARCACIONES**

La temática abordada y desarrollada en el numeral 3, representa la información obtenida de investigaciones y análisis realizados sobre aplicaciones y/o problemas de cargas electrostáticas, manifestados en diversos procesos industriales. Tomando en consideración esta información, en este numeral se analizará la relación existente entre dicha información y las manifestaciones de cargas electrostáticas en los cascos de las embarcaciones después de la ejecución de las actividades de reparación y/o mantenimiento, en tierra.

El objeto principal de este relacionamiento se concentra en la obtención de una metodología para la investigación y análisis de este fenómeno en los cascos de las embarcaciones que se encuentran en tierra, pues no se cuentan con documentaciones que fundamente el estudio y análisis de este caso específico. Con la metodología propuesta se espera analizar y comprender la naturaleza y comportamiento de las cargas electrostáticas presentes en los cascos de las embarcaciones cuando se encuentran en tierra, su interacción y relación con las actividades desarrolladas durante las labores de reparación y/o mantenimiento, y sus efectos sobre el cuerpo humano y equipos electrónicos.

#### **4.3.1 Descargas directas o indirectas sobre equipos electrónicos**

En el numeral 3.2.1, se presentaron análisis realizados para fundamentar los efectos negativos que puede ocasionar un campo electromagnético producto del proceso de soldadura, sobre los equipos electrónicos. Con gran importancia se mencionó el caso de la industria naval, debido a que los procesos de soldadura se realizan muy cerca de componentes y dispositivos electrónicos que se encuentran en la embarcación, dado las características de construcción de las mismas[34].

Durante la reparación y/o mantenimiento de las embarcaciones, se han evidenciado comportamientos negativos similares a los expuestos en el numeral 3.2.1 cuando se realizan actividades de soldadura sobre las láminas de acero naval, válvulas o tuberías que se encuentran muy cercanas a los equipos electrónicos como radares, radios, antenas, entre otros. Aunque este impacto se intenta minimizar colocando un conductor entre el casco y el SPT, no ha sido suficiente porque las embarcaciones se encuentran armadas y no es posible desmontar los equipos electrónicos para realizar las actividades programadas.

Según resultados obtenidos de las investigaciones [34], con solo soldar a 6" de distancia de un equipo o dispositivo electrónico, se le inducen corrientes de 3,4mA y tensiones de 4,1V; si se suelda a menos distancia se ejerce mayor influencia negativa sobre los equipos, pues incrementan las tensiones y corrientes inducidas. En algunos casos, se han confirmado daños que representan significativas pérdidas económicas en los proyectos de reparación y/o mantenimiento.

Por otra parte, las descargas directas sobre los equipos electrónicos pueden ser ocasionadas por las personas que los maniobran o por la inducción de las cargas encontradas en el casco de la embarcación. Según investigaciones [27], se estableció que para una tensión electrostática de 6kV en el cuerpo humano, la descarga sobre una pista del circuito puede inducir sobre las demás pistas hasta 20V durante un tiempo de 20nS; al escalar esta información a valores reales de

tensión en el cuerpo humano, 15kV [38], se puede establecer que los efectos producidos alcanzan, en algunos casos, condiciones de destrucción total en relación con el funcionamiento de los equipos.

Finalmente, para minimizar la ocurrencia de estos tipos de eventos es indispensable estudiar las cargas electrostáticas en estos casos específicos, pues al comprender su comportamiento, establecer que origina su presencia y que produce la descarga, se pueden presentar soluciones para mitigar este fenómeno.

#### **4.3.2 Descargas electrostáticas y el cuerpo humano**

Considerando la importancia de las consecuencias negativas generadas ESD tanto en los equipos electrónicos como en la producción de explosiones e incendios, y teniendo en cuenta que el cuerpo humano también ejerce influencia en la producción de este tipo de descargas, es apropiado tener en cuenta el modelo eléctrico del cuerpo humano. Ver figura 19.

Frecuentemente, el modelo lo conformaban elementos resistivos y capacitivos, cuyos valores cambian dependiendo de la norma utilizada. La IEC asume el valor de la resistencia como  $330\Omega$  y la capacitancia como  $150\text{pF}$ , mientras que otras normas los asumen como  $1,5\text{k}\Omega$  y  $100\text{pF}$ , respectivamente; por lo anterior, se considera que estos valores oscilan dentro de rangos que contemplan la mayor parte de los valores obtenidos [38]. Aun así, es conveniente asumir o medir los valores teniendo en cuenta el ambiente bajo prueba en el que se encuentren [5]; por ello, es conveniente desarrollar un modelo del cuerpo humano que contemple su interacción con el casco metálico de una embarcación ubicada en tierra para poder incluir especificidades de este ambiente que permitirán determinar y simular parámetros de referencia para el análisis de este fenómeno.

Por otro lado, es pertinente considerar las causas que pueden ocasionar que el cuerpo de los trabajadores de reparación y/o mantenimiento en los astilleros se cargue electrostáticamente, tomado como punto de partida la ropa, botas o

zapatos y guantes que utilizan para el desarrollo de sus actividades, y la frecuencia y tipo de contacto que existe entre estos y otros objetos (sillas, paredes, aire, arena, equipos)[36]; de esta forma se puede determinar tanto la tensión y la carga acumulada en el cuerpo humano como la diferencia de potencial que experimentaría una persona al interactuar con la embarcación cuyas dimensiones sobrepasan las del cuerpo humano (una de las condiciones establecidas en [36]). Con los resultados que se obtengan de estos análisis se pueden establecer medidas para proteger al personal de trabajo.

#### **4.3.3 Descargas electrostáticas y SPT**

Los SPT permiten despejar a tierra cualquier acumulación de carga electrostática, por lo que en ocasiones se ha planteado utilizarlo como una importante medio para proteger directamente al personal de trabajo de diferentes industrias, contra las ESD[36], dada la importancia de la interacción entre estas y el SPT. Análisis realizados establecen que la tensión de un cuerpo conectado a tierra es cero, por tal motivo al conectar un cuerpo descargado a tierra, a pesar de que exista fricción entre el cuerpo y materiales aislantes, no se producirá acumulación significativa de carga electrostática, pues esta circulará fácilmente a tierra.

En el caso de las embarcaciones que reposan sobre cunas de maderas en las quillas y a las cuales se le conectan conductores entre el casco metálico y el SPT, sería lógico considerar que cualquier carga en el casco circulará hacia tierra; sin embargo se manifiestan acumulaciones de cargas electrostáticas que no alcanzan a eliminarse y que se caracterizan por concentrarse en espacios muy alejados de los puntos de conexión a tierra. Por lo anterior, se plantea la necesidad de mejorar el esquema de puesta a tierra para las embarcaciones, pues estas acumulaciones ponen en riesgo a una persona que entre en contacto con el casco de la embarcación; además, estas embarcaciones son grandes cuerpos con superficies y volúmenes de acero que deberían conectarse bajo ciertas especificaciones para mejorar las condiciones de despeje de fallas por acumulación carga electrostática.

También, se debe considerar la efectividad de la respuesta de los SPT ante las descargas electrostáticas, debido a que este fenómeno se presenta en el orden de los nanosegundos [20] y durante los diseños de los SPT esas altas frecuencias no son consideradas; por ello, es necesario incorporar estos análisis a los diseños de SPT existentes en los astilleros para que respondan óptimamente ante este tipo de descargas, sin producir tensiones de paso o contacto peligrosas para el ser humano.

## **5. PROPUESTA METODOLÓGICA PARA ESTUDIAR Y ANALIZAR LAS MANIFESTACIONES DE CARGAS ELECTROSTÁTICAS EN LOS CASCOS DE EMBARCACIONES QUE SE ENCUENTRAN EN TIERRA**

La problemática presentada por las manifestaciones de cargas electrostáticas en los cascos de las embarcaciones que se reparan y/o mantienen en tierra, requieren de una propuesta metodológica que permita realizar estudios y análisis entorno a esta temática, puesto que no se cuentan con documentaciones que sustenten el comportamiento de dichas cargas en este caso en específico; por ello, se toma en consideración la información presentada en el numeral 3, en donde se contemplan diferentes metodologías para la investigación del comportamiento de las cargas electrostáticas en diversa aplicaciones industriales.

La metodología a proponer, pretende determinar las variables que influyen en la producción de las cargas en los cascos de las embarcaciones y establecer la influencia que ejercen este tipo de cargas para poner en riesgo a los seres humano, equipos y dispositivos electrónicos; así mismo, se pretende analizar las descargas generadas producto de este tipo de cargas y su relación con los SPT.

- **Visitas de campo:** permiten identificar y reconocer procedimientos y características de las actividades realizadas desde que la embarcación es puesta en seco, hasta que se encuentra lista para la ejecución de los trabajos de reparación y/o mantenimiento; así mismo, permite identificar las consideraciones y condiciones con la que se desarrollan dichas actividades. Específicamente, con estas visitas de campo se pretende adquirir información que permita documentar cuales son las acciones y procedimientos que sigue el personal de reparación y/o mantenimiento para desarrollar las actividades previas al inicio de los trabajos (especialmente como y cuáles son las consideraciones a tener en cuenta para colocar a tierra el casco metálico de la embarcación) y durante el desarrollo de las actividades de soldadura, corte

oxiacetilénico y cambio de láminas de acero naval, sandblasting y pintura, y recolectar información relacionada con los problemas y accidentes provocados por descargas electrostáticas.

Además, la información adquirida a través de las visitas se contrastará con la información obtenida de la revisión teórica de los procedimientos de reparación y/o mantenimiento; así como, con la información obtenida de experimentaciones y mediciones de variables y parámetros indispensables para la elaboración de modelos de las ESD para las embarcaciones y el ser humano.

- Revisión de los procedimientos de reparación y/o mantenimiento de embarcaciones: previo al análisis de las causas y mediciones de los campos electrostáticos en los cascos de las embarcaciones, es necesario conocer los procedimientos que se siguen para la ejecución de actividades de reparación y/o mantenimiento de embarcaciones en tierra, así como la maquinaria y equipo que interviene en cada uno de ellos, ya que de esta manera se puede comprender, analizar, evaluar e identificar los puntos neurálgicos que permiten interrelacionar la mayor cantidad de variables y obtener resultados significativos. Gracias a esto, [13], [14] y [24], identificaron los procesos, variables, infraestructura, maquinaria y equipos, y entregaron como resultado puntos específicos donde pueden ser medidas las variables de interés.
- Aplicación de encuestas y entrevistas al personal de reparación y/o mantenimiento de embarcaciones: permite determinar las características de ocurrencia de ESD, la frecuencia con las que se presentan, la percepción de gravedad que originan estas descargas para el bienestar laboral y personal, medidas y prevenciones que se deben tener en cuenta para evitar o mitigar estas descargas durante el desarrollo de sus actividades, entre otras cosas;

por ello, la población la comprenden los soldadores, paileros, operadores de sandblasting y de oxicorte, supervisores de campo y técnicos electricistas.

También es conveniente adquirir información por parte de los líderes de seguridad industrial, pues ellos, son los responsables de verificar las medidas de seguridad en la misma y hasta presentar casos que permitan escalar la complejidad de las consecuencias que han generado las ESD por motivo de la ejecución de las actividades de reparación y/o mantenimiento.

- Documentación y dimensionamiento de la complejidad de las consecuencias y accidentes producidos por ESD: para fundamentar la investigación desde el punto de vista de la problemática que se presenta con las manifestaciones de cargas electrostáticas en los cascos de las embarcaciones, es pertinente tabular y escalar la información obtenida a través de encuestas y entrevistas, puesto que, de esta forma se dimensionan las consecuencias y daños que puede ocasionar una ESD que finalmente repercuten sobre el entorno laboral y económico de los proyectos desarrollados en los astilleros; así mismo se debe organizar la información obtenida por parte de personal de seguridad industrial y de ARP's en relación con los incidentes y accidentes presentados por motivos de manifestaciones de cargas electrostáticas. Esto permite presentar análisis técnico-económicos de las posibles medidas a implementar para mitigar los daños vs los daños ocasionados por las ESD, mano de obra incapacitada, mano de obra ociosa, materiales y maquinaria, etc.
- Caracterización de materiales y del cuerpo humano: la toma de muestras de materiales con los que construyen los cascos de las embarcaciones y de los aceros (grosos que oscilan entre  $\frac{1}{4}$ " y 1") que se utilizan para el reemplazo de las láminas deterioradas, permite caracterizarlos. La finalidad de dicha

caracterización se concentra en la obtención de parámetros eléctricos como la resistividad, inductancia y capacitancia del material y de los cuerpos, entre otros, aunque también se pueden caracterizar y modelar zapatos de trabajo, ropa de trabajo, guantes, madera para cuna de buques y otros, dada la importancia y relación que presentan los tiempos de subida y bajada con las ESD [26]; así como se puede notar en [5] y [36], estos parámetros constituyen un factor determinante para realizar análisis del comportamiento que pueden presentar las ESD ante determinados valores de los mismos. De igual forma, se debe tomar en consideración la variación que estos presentan en relación con las condiciones ambientales del medio circundante.

- Determinación de variables y parámetros principales: tomando como punto de partida la documentación revisada y presentada en el numeral 3, se determinan las variables y parámetros que impactan significativamente sobre la producción de cargas electrostáticas en los cascos de las embarcaciones; dentro de estas se encuentran, la temperatura ambiente, la humedad relativa, la conductividad del material, resistividad del material, campo eléctrico, campo magnético, entre otros. Se considera indispensable enfatizar en las condiciones medioambientales, pues como se determinó en [19] y [38], ante variaciones de temperatura durante la realización de prueba a materiales y simulaciones de ESD sobre el cuerpo humano, se manifestaron cambios en el comportamiento y polaridad de las cargas.
- Experimentaciones, mediciones de campo y análisis estadísticos: al conjugar la información obtenida a través de encuestas y entrevistas, con la información obtenida de la documentación revisada, se realizan, antes, durante y después de la ejecución de las actividades de reparación y/o mantenimiento a las embarcaciones, mediciones de campo eléctricos, tensiones, corrientes de

maquinas de soldar, temperatura del ambiente, humedad relativa, resistencia de puesta a tierra, entre otros parámetros. Las mediciones se deben tomar en diferentes puntos de una misma embarcación, en diferentes horarios y en diferentes proyectos, para contar con una amplia muestra a la que se le puedan aplicar análisis estadísticos.

- Experimentaciones y mediciones en campo con sistemas de puesta a tierra: para este caso se deben realizar nuevamente experimentaciones y mediciones según lo planteado en el punto inmediatamente anterior; sin embargo, los conductores de conexión a tierra que se colocan entre el casco metálico de la embarcación y el SPT del astillero, no se colocaran, con el objeto de obtener información de la tensión electrostática acumulada cuando la embarcación se encuentra aislada. Posteriormente, se conectan los conductores y se mide la corriente de descarga; logrando así, parametrizarla e identificarla dentro de una de las regiones establecidas por la IEEE C62.47, 1992 [12]. Gracias a esto, en [36]establecieron la existencia de diferentes magnitudes de tensiones y cargas acumuladas por los cuerpos cuando uno de los cuerpos es de gran tamaño y está aterrizado o aislado de tierra.
- Elaboración de modelo ESD para embarcaciones y para el personal de reparación y/o mantenimiento en astilleros: los resultados obtenidos de la caracterización de materiales y de las experimentaciones y mediciones realizadas en campo, permiten proponer modelos circuitales de embarcaciones y del cuerpo humano para simular y analizar el comportamiento de las ESD (para este caso específico); para ello, se toma como referencia la información y análisis propuestos en [5] y las facilidades del modelado circuital propuesto en [9-11] y [12]. Estos modelos de ESD, se elaboran con software matemático especializado y con software

especializados en ingeniería naval. La necesidad de proponer modelos circuitales propios para esta investigación, se basa en el hecho de que en las diversas normativas internacionales, los rangos de valores de los elementos del circuito son considerablemente amplios, ver tabla 7.

- Simulaciones y análisis de resultados: una vez obtenidos los modelos circuitales para el análisis de las ESD, se deben desarrollar simulaciones de descargas electrostáticas y contrastarla con la información obtenida durante las experimentaciones realizadas en campo. Gracias a esto, en [38],[20], [40], [33] y [5] se establecieron las diferencias entre la teoría y la práctica, y se validaron las simulaciones como predicciones aproximadas a la realidad.

Además, se pueden obtener curvas de descargas con las que se evidenciarían tiempos de subida, tiempos de bajada y duración total de la descarga; por ello, se sugiere efectuar simulaciones en función de la variación de las condiciones ambientales y de trabajo, pues así se analizaran si estas características se reflejaran en el comportamiento de la ESD.

- Análisis de la distribución de las cargas electrostáticas en los cascos de las embarcaciones: basándose en las experimentaciones, mediciones, modelos circuitales y simulaciones, y apoyándose en expertos en ingeniería naval, se considera conveniente presentar la distribución de los campos eléctricos exteriores que se manifiestan en los cascos de las embarcaciones, utilizando software de simulación especializada para campos y cargas electrostáticas. De esta manera se pueden establecer puntos críticos de acumulación de cargas electrostáticas en los cascos metálicos de las embarcaciones y curvas equipotenciales en las mismas así como presenta en [24]: logrando identificar

y generalizar campos eléctricos y tensiones por cargas electrostáticas en la superficie de las embarcaciones.

Del mismo modo, este análisis permitirá obtener relaciones físico-matemáticas que justifiquen la cadena de eventos que inicia con la manifestación de las cargas electrostáticas y termine con la descarga de las mismas, así como se presenta en [40].

- Determinación del sistema de puesta a tierra para despeje de cargas electrostáticas: como resultado de la investigación y partiendo del análisis de la distribución de las cargas electrostáticas en los cascos metálicos de las embarcaciones, se considera conveniente proponer un sistema de descarga eficaz a tierra de las acumulaciones de cargas electrostáticas en los cascos de las embarcaciones.

Con este sistema se pretende tener en cuenta los parámetros de diseño de sistema de puesta a tierra establecidos en las normas IEEE o IEC para baja frecuencia y alta frecuencia (debido a que los fenómenos de cargas electrostáticas se presentan a altas frecuencias), como corrientes de cortocircuito, resistividad del terreno, resistencia de la puesta a tierra, entre otros; así mismo, se contemplará la distribución de las cargas electrostáticas en la embarcación y su polaridad, ya que esto define el flujo de la corriente y la manera en que afecta e interactúa con los sistemas de puesta a tierra del astillero. Lo anterior tendrá como base el procedimiento y los resultados mostrados en [20], debido a que se presentan diferentes disposiciones de sistemas de puesta a tierra, se analizan las distribuciones de corriente sobre los mismos y se determina su comportamiento a la alta frecuencia.

## 6. CONCLUSIONES

La revisión del estado del arte del comportamiento de las cargas electrostáticas manifestadas, estudiadas y analizadas en diversas aplicaciones industriales tanto para su aprovechamiento o tratamiento, por las problemáticas que ocasiona, dejaron abordar otras temáticas mas específicas, las cuales, al ser conjugadas entre sí, permitieron presentar una propuesta metodológica para el estudio y análisis del comportamiento de cargas electrostáticas en los cascos de las embarcaciones que se reparan y/o mantienen en tierra; por lo anterior, se presentan a continuación los siguientes aspectos considerados relevantes e indispensables para cumplir con los objetivos del presente documento.

- Las cargas electrostáticas han comprendido una importante base para el desarrollo de la electricidad; aun así, su aplicación o aprovechamiento en el campo de la industria no cuenta con una masiva participación, debido a la dificultad que estas presentan para su manejo y a la limitación en la transmisión de la energía en casos puntuales, dada su naturaleza estática. Sin embargo, se pueden enunciar casos exitosos de aplicaciones de cargas electrostáticas, tales como el precipitador electrostático, la electrofotografía, el generador de Van de Graaf, la pintura electrostática y el lápiz triboeléctrico.
- La ESD indirecta es producto de tensiones y corrientes inducidas por campos electromagnéticos que pueden ser irradiados por equipos de soldadura. Por análisis y experimentación se estableció que la soldadura a menos de 6" separación con equipos electrónicos ocasiona corrientes en el orden de los mA y unos pocos Amperes y tensiones de centenas de Volts.
- El ser humano puede experimentar tensiones electrostáticas en el orden de los 15kV; la fricción con sillas de cuero, zapatos de caucho, ropa sintética, entre otros, provocan que se alcancen estos niveles de tensión. A este nivel, la

corriente puede ser de 8A con tiempos de subida de 39nS, lo que puede producir choques o sacudidas y afectar circuitos electrónicos.

- El contacto directo entre un cuerpo cargado y elementos aterrizados o conductores, específicamente en el campo de los circuitos electrónicos, pueden provocar ESD directas que inducen tensiones y corrientes que borran información, causan operaciones indeseadas o dañar seriamente los equipos.
- Para desarrollar análisis teóricos y simulaciones de las ESD en ambientes industriales o cotidianos, se demostró que los modelos basados en capacitancias permiten obtener aproximaciones válidas a los valores reales, tanto en formas de onda como en tiempos y picos de corriente, lo que se establece como una herramienta útil para predecir comportamientos de ESD.
- Las ESD son fenómenos que se producen por muy cortos tiempos de duración y amuy altas frecuencias; motivo por el cual su despeje por SPT comunes no es efectivo, pues estos se diseñan para descargas a frecuencias industriales.
- Se evidenció que las cargas electrostáticas se encuentran presentes en varios procesos industriales generando problemáticas que producen pérdidas de productos, daños a equipos electrónicos, atracción de partículas e incendios. En los transformadores estas cargas se presenta como resultado de la circulación de aceite y su fricción con el aislamiento del mismo; y en procesos con rodillos se presentan, cuando el elemento transportado entra en contacto con los rodillos; mientras que, en los discos duros se generan ESD como resultado del contacto con la superficie del disco.
- La presencia de cargas electrostáticas en diversos procesos industriales han puesto en importantes riesgos tanto a los seres humanos como a los equipos y maquinarias utilizados en dicho proceso; esto debido a que las ESD

producen energías de hasta 100mJ, cuyo valor supera 10 veces lo que se necesita en un ambiente inflamable para provocar un incendio o explosión.

- Durante las actividades de reparación y/o mantenimiento de embarcaciones en astilleros, se manifiestan descargas electrostáticas sobre el casco metálico y aislado de la embarcación, lo que ha provocado daños sobre el personal de trabajo y sobre los mismos equipos. Las medidas tomadas para mitigar esta problemática no han sido lo suficientemente efectivas, pues aunque se trata de equipotencializar la embarcación, continúan manifestándose acumulaciones de cargas electrostáticas.
- En la actualidad no se cuenta con una metodología sustentada en investigación, que establezca procedimientos para la equipotencialización a tierra de las embarcaciones que reposan sobre los carros de quilla y pantoque para su reparación y/o mantenimiento en tierra; por esta carencia de procedimientos, esta actividad es realizada bajo los argumentos de experiencia del operario de turno, motivo por el cual se considera su relación con el hecho que aun se manifiesten cargas electrostáticas en los cascos metálicos aislados de dichas embarcaciones.
- La metodología de investigación propuesta en el presente documento, se desarrolla con miras a realizar una investigación exhaustiva que permita estudiar y analizar el comportamiento de las cargas electrostáticas que se originan en los cascos de las embarcaciones que se reparan y/o mantienen en tierra; apoyándose en investigaciones realizadas y en las que se toman en cuenta las condiciones, consideraciones y efectos presentados por las manifestaciones de dichas cargas.

## 7. REFERENCIAS

- [1] A. Bendaoud, A. Tilmatine, K. Medles, M. Rahli, M. Huzau, L. Dascalescu, "Characterization of Dual Corona-Electrostatic Electrodes for Electrostatic Processes Applications", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 44 Issue: 3, pp. 692-698, May/June 2008.
- [2] American Welding Society. "Welding Handbook". Novena Edición, 1996.
- [3] C. Dahn, B. Reyes, A. Kashani, J. Finkelshtein, "Electrostatic Hazards of Explosive, Propellant and Pyrotechnic Powders", *Electrical Overstress/Electrostatic Discharge Symposium Proceedings*, p.p. 139-150, Oct. 1998.
- [4] D. Muller-Hillebrand, "Electrostatically initiated explosion of sugar dust in air", *SockerHantl*, vol. 11, issue 18, part 3, 40, 1963.
- [5] D. Pirici, J. Rivenc, T. Lebey, D. Malec, A. Agneray y M. Cheaib, "A Physical Model to Explain Electrostatic Charging in an Automotive Environment; Correlation with Experimental Approach," *Electrical Overstress/Electrostatic Discharge Symposium*, 2003.
- [6] D. Coy, J. Turner, P. Lawless, T. Yamamoto, J. McKenna, J. Mycock, A. Nunn, G. Greiner, W. Vatauvuk, "Precipitadores Electrostáticos", 1era Ed., ETS Inc., Secc. 6, Cap. 3, pp. 3-4, 3-9.
- [7] Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4: Testing and measurement techniques - Section 2: Electrostatic discharge immunity test - Basic EMC Publication, IEC61000-4-2, Mar. 1995.
- [8] Electrostatic Discharge (ESD) Sensitivity Testing Human Body Model (HBM) Electrostatic Discharge (ESD) Sensitivity Testing, JESD22- A114E, Jan. 2007.

[9] ESD Association Standard Test Method for Electrostatic Discharge Sensitivity Testing—Human Body Model (HBM) Component Level, ANSI/ESD STM5.1-2007, 2007.

[10] G.I. Hearn, P.E.R. Mucci, A. Eyres, J.A. Amner, "The triboelectric pen: an electrostatic method for the identification of plastics in recycling", *IEEE Conference Record of the 1996, Industry Applications Conference, 1996, thirty-First IAS Annual Meeting*, vol. 4, p.p. 1955-1958, Aug. 2002.

[11] G.S.P. Castle, Ed., "A Century of Development in Applied Electrostatics", *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 16 Issue: 4, pp. 8-13, Jul-Aug. 2010.

[12] Guide on Electrostatic Discharge (ESD): Characterization of the ESD Environment, IEEE Standard C62.47, 1992

[13] H. Okubo, M. Wakamatsu, K. Nakamura, "Charge Behavior in Flowing Charged Oil in Transformer Oil Duct", *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, p.p. 138-142, Feb. 2004.

[14] J. F. Hughes, R. P. Corbett, A. W. Bright, and A. G. Bailey, "Explosion hazards and diagnostic techniques associated with powder handling in large silos," *Inst. Phys. Conf. Ser.*, no. 27, p. 264, 1975.

[15] J. Himle, A. Wallash, "Tribocharging and electrical breakdown at the magnetic recording head-disk interface", *Electrical Overstress/Electrostatic Discharge Symposium*, p.p. 142 – 146, 2002.

[16] J. Lewiner, "Space Charge and Polarization in Insulators: a Long History with a Promising Future", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 17 Issue: 4, pp. 1096–1105, Aug. 2010

[17] J. Vazquez, J. Rivenc, A. Agneray, T. Paillat, "A critical approach to measure streaming current: case of fuels flowing through conductive and insulating polymer pipes", *IEEE Transactions on industry applicaxtions*, vol. 41, issue 5, sep/oct 2005

- [18] K. Robinson, "Electrostatic issues in Roll-to-Roll Manufacturing Operations", *Conference record of the 2007 IEEE Industry Applications Conference*, pp 781-786, Sept 2007.
- [19] M. A. Noras, B. Wang, V. Nguyen, "A miniature charged plate for testing charge accumulation in hard disk drives", *Electrical Overstress/Electrostatic Discharge Symposium*, p.p. 1-5, 2005.
- [20] M. Angeli, E. Cardelli, N. Esposito, B. Tellini, "Interaction between Grounding Systems and Electrostatic Discharge Events" *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 34, no. 5, September 1998.
- [21] M. Xuo, Q. Guo, Y. Han, L. Shen, Q. Liu, B. Song, Q. Ma, K. Zhu, Y. Shen, X. "A Case Study of Problems in JEDEC HBM ESD Test Standard", *IEEE Transactions On Device And Materials Reliability*, vol. 9, no. 3, Sept. 2009.
- [22] Martin, Albert R. "An Introduction to Surface Transfer Impedance". EMC Technology, July 1982.
- [23] N. Inoue, K. Kato, R. Shimizu, Y. Nakagami, H. Iwai, H. Okubo, "Mechanism of Charge Accumulation at Flowing Oil / Pressboard Interface Based on Optical Measurement of Electric Field", *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, p.p. 536-539, Feb. 2001.
- [24] P. Cartwright, S. Singh, A. G. Bailey, L. J. Rose, "Electrostatic Charging Characteristics of Polyethylene Powder During Pneumatic Conveying", *IEEE Transactions On Industry Applications*, vol. IA-21, No. 2., Mar/Apr 1985.
- [25] P. Yu, M. Cardona, "Fundamentals of Semiconductors Physics and Material Properties", Springer, 4<sup>th</sup> Ed, New York, 2010.
- [26] R. J. Plowman, "Electrostatic Discharge A Review", *IEE Colloquium on ESD (Electrostatic Discharge) and ESD Counter Measures*, pp. 1/1 – 1/8, March 1995

- [27] R. De Leo, G. Cerri, V. Primiani, "ESD in Electronic Equipment: Coupling Mechanisms and Compliance Testing", *Proceedings of the 2002 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Vol. 4*, p.p. 1382 – 1385, Nov. 2002.
- [28] R. Jones, "Investigations of industrial electrostatic hazard performed by wolfson electrostatic", *IEEE Conference Record of the 1994, Industry Applications Society Annual Meeting, 1994*, vol. 2, p.p. 1491-1492, Aug. 1994.
- [29] R. Serway, R. Beichner, "Física para ciencias e ingeniería", 5ed. Tomo II, pp. 708-1075, México D.F. 2004
- [30] S. Tsukao, A. Eto, T. Kobayashi, Y. Shirasaka, S. Yamada, N. Hosokawa, "Increase of Static Electrification in Aged Transformers", *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, p.p. 1-5, Jun. 2007.
- [31] Stuzman, Warren L., Garry A. Thiele. "Antenna Theory and Design". New York: John Wiley and Sons, 1981.
- [32] T. Oda, Y. Sakai, "Studies on Very High Speed Electrostatic Surface Discharge between an earthed electrode and a charged film", *Conference Record of the 1991 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, vol.1, p.p. 686-692, October 1991.
- [33] T. Ogura, Y. Shibuya, K. Tsuji, "Evaluation of Streaming Electrification Considering Circulation of Charged Oil", *Proceedings of 2001 International Symposium on Electrical Insulating Materials*, p.p.860-863, Nov. 2001.
- [34] T. R. Anderson, C. F. Derewiany and M. D. Obara, "Electrostatic Discharge Sensitive (ESDS) Equipment Susceptibility To Welding Generated Electromagnetic Fields" *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 1998*, vol. 1, pp. 364–367, Aug. 1998.

[35] T. Yakamoto, T. Abe, T. Mimura, N. Otsuka, Y. Ito, Y. Ehara, A. Zukeran, "Electrohydrodynamically Assisted Electrostatic Precipitator for the Collection of Low-Resistivity Dust", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 45 Issue: 6, pp. 2178-2184, Sep. 2009.

[36] W. Greason, "Charge and Potential Control of Electrostatic Discharge (ESD) and the Human Body", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 32, No. 5, Oct. 1996

[37] W. Hayt, "Teoría Electromagnética", 5<sup>ta</sup> Ed., Mc Graw-Hill, pp. 132-271, México 2005.

[38] W.P. O'Neill, B.R. Varlow, "Electrostatic discharges from the human body", *IEE Proceedings*, Vol. 133, Pt. A, No. 9, Dec. 1986

[39] W. Greason, "Analysis of human body model for electrostatic discharge (ESD) with multiple charged sources", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol 30, issue 3, p.p. 589, May/Jun 1994.

[40] X. Xiaoying, L. Qiongli, L. Quingrong, W. Dinghu, "Study In The Relation Of Electrostatic Discharge Parameters", *The Eighth International Conference on Electronic Measurement and Instruments ICEMI' 2007*, pp. 1-721 – 1-724, Jul-Aug. 2007.

[41] Z. Feng, C. Shih, V. Gubbi, F. Poon, "A study of tribo-charge/emission at the head-disk interface", *Journal of Applied Physics*, vol. 85, issue 8, p.p. 5615-5617, 1999.

[42] R. Matick, "Transmission Lines and Communication Networks : An Introduction to Transmission Lines, High-frequency and High-speed Pulse Characteristics and Applications", 1<sup>era</sup> Ed., Wiley-IEEE Press, p.p. 211-267, New York, 2000.

**Anexo 1. Informe de visita técnicaefectuada a un astillero para  
embarcaciones mayores, en la ciudad de Cartagena**

**INFORME DE VISITA TÉCNICA A LAS INSTALACIONES DE LA  
CORPORACIÓN DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DE LA  
INDUSTRIA NAVAL, MARITIMA Y FLUVIAL “COTECMAR” – PLANTA  
MAMONAL**

**Ing. PIEDY DEL MAR AGAMEZ ARIAS  
Ing. CRISTIAN ANDRÉS MORALES VÁSQUEZ  
MSc. Ing. MARIO ROBERTO ARRIETA PATERNINA**

**Informe presentado como avance de la formulación del proyecto titulado  
“COMPORTAMIENTO DE CARGAS ELECTROSTÁTICAS PRESENTES EN EL CASCO DE LAS  
EMBARCACIONES NAVALES QUE SE REPARAN Y/O CONSTRUYEN EN TIERRA”**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR, Campus Ternerera  
DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN  
GRUPO DE AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL Y CONTROL - GAICO  
CARTAGENA D.T. y C.  
MARZO DE 2010**

## **INTRODUCCIÓN**

La corporación de ciencia y tecnológica para el desarrollo de la industria naval, marítima y fluvial – COTECMAR-, es una entidad con aportes del sector público y privado, que esta orientada a la construcción, mantenimiento y reparación de embarcaciones y artefactos navales; ofreciendo en este sentido, soluciones avanzadas para la industria naval, marítima y fluvial. Para cumplir con tan importante labor, COTECMAR cuenta con dos astilleros en la ciudad de Cartagena, ubicados en los sectores de Bocagrande y Mamonal. Los procesos de reparación, mantenimiento y construcción que se ejecutan en el astillero ubicado en el sector de Mamonal serán motivo de estudio de la presente visita.

## CONTENIDO

### LISTA DE FIGURAS

### INTRODUCCIÓN

|  |     |
|--|-----|
| 1. OBJETIVOS.....  | 104 |
| 1.1 OBJETIVO GENERAL.....  | 104 |
| 1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS .....  | 104 |
| 2. GENERALIDADES DE COTECMAR .....   | 105 |
| 3. VISITA TÉCNICA A COTECMAR PLANTA MAMONAL .....  | 107 |
| 3.1 POSICIONES DE VARADA.....  | 107 |
| 3.2 ACTIVIDADES REALIZADAS PREVIO AL INICIO DE LOS TRABAJOS DE REPARACIÓN Y/O MANTENIMIENTO DE EMBARCACIONES. .... | 109 |
| 3.3 ACTIVIDADES REALIZADAS DURANTE LAS LABORES DE MANTENIMIENTO Y REPARACIÓN DE EMBARCACIONES .....                | 111 |
| 3.4 NUEVAS CONSTRUCCIONES .....  | 115 |
| 4. RESULTADOS.....   | 117 |

## LISTA DE FIGURAS

|   |     |
|---|-----|
| Figura 1. Organigrama corporativo de COTEMAR. ....                            | 105 |
| Figura 2. Diagrama de flujo de atraque y subida a dique de embarcaciones..... | 108 |
| Figura 3. Foso de transferencia. ....   | 108 |
| Figura 4. Carros de pantoque y quilla. ....                                   | 109 |
| Figura 5. Conexión a tierra del casco metálico de una embarcación.....        | 110 |
| Figura 6. Detalles de conexión a tierra. ....                                 | 110 |
| Figura 7. Proceso de pintura a casco metálico de una embarcación.....         | 112 |
| Figura 8. Sandblasting a embarcación.....                                     | 112 |
| Figura 9. Pintura al casco de la embarcación. ....                            | 112 |
| Figura 10. Proceso de corte oxiacetilénico y cambio de lámina.....            | 113 |
| Figura 11. Cambio de lámina de casco de embarcación. ....                     | 113 |
| Figura 12. Protección catódica instalada. ....                                | 114 |
| Figura 13. Protección catódica desinstalada.....                              | 114 |
| Figura 14. Mamparas de conexión.....  | 115 |
| Figura 15. Proceso de construcción de embarcaciones.....                      | 116 |
| Figura 16. Construcción de embarcación tipo fragata.....                      | 116 |

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Conocer los procedimientos realizados por los trabajadores de COTECMAR planta Mamonal durante la realización de labores de mantenimiento, reparación y/o construcción en las embarcaciones navales que se encuentran en tierra.

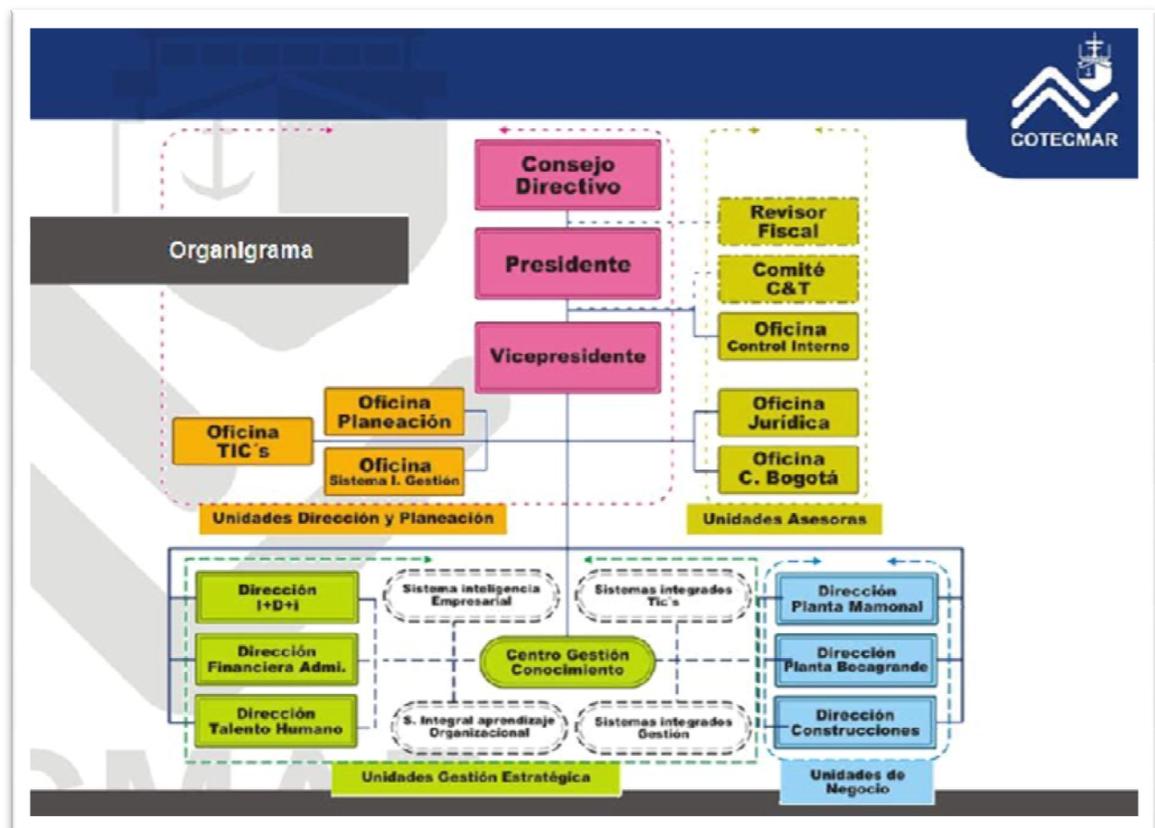
### **1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Conocer las instalaciones de apoyo a las actividades de mantenimiento, reparación y construcción de embarcaciones navales de COTECMAR planta mamonal.
- Conocer detalladamente el procedimiento establecido para transportar las embarcaciones navales desde el muelle hasta las posiciones de varada.
- Conocer las precauciones de seguridad, que tienen en cuenta los trabajadores de campo, para la realización de las labores de mantenimiento y reparación de las embarcaciones navales en tierra.
- Conocer procesos de reparación como corte y cambio de láminas, pintura y desmonte de propelas y ejes, que se realizan a las embarcaciones navales que se encuentran en tierra.

## 2. GENERALIDADES DE COTECMAR

La corporación de ciencia y tecnología para el desarrollo de la industria naval, marítima y fluvial COTECMAR, concentra sus actividades en la investigación, innovación, construcción, mantenimiento y reparación de embarcaciones de todo tipo; para ello, se ha organizado en diversas unidades estratégicas, así como se puede observar detalladamente en la figura 1.

Figura 38. Organigrama corporativo de COTECMAR.



Fuente: [www.cotecmar.com/NewsDetail/201/1/Estructuraorganizacional](http://www.cotecmar.com/NewsDetail/201/1/Estructuraorganizacional) [Consulta: Marzo 23 de 2010].

Las unidades de negocio presentadas en el organigrama (denotadas en color azul) son las que intervienen directamente en los procesos de mantenimiento, reparación y construcciones, mientras que las unidades de gestión estratégica (denotadas en color verde) sirven de apoyo para estas actividades. En

COTECMAR, planta Mamonal, se encuentran las unidades de negocio dirección Planta Mamonal y Dirección Construcciones, debido a que en esta planta se cuenta con la mayor capacidad de levante de embarcaciones (3600 Ton aproximadamente) y con la infraestructura adecuada para los trabajos en grandes embarcaciones.

La unidad de negocio Dirección Planta Mamonal, se encarga directamente de los procesos de reparación y mantenimiento de embarcaciones, al igual que se responsabiliza de la adecuación y mantenimiento de infraestructura que le permite desarrollar tales actividades. La dirección Planta Mamonal se encuentra estructurada como se presenta a continuación:

- Departamento de Gerencia de Proyectos
- Departamento de Producción
  - División de Varadero
  - División de Mecánica
  - División de Pintura
  - División de Soldadura
  - Oficina de Mantenimiento
- Proyectos de Inversión
- Gerencia de Proyectos submarinos

La dirección Construcciones se encarga de la ejecución de la construcción de nuevas embarcaciones que se realicen en la corporación, del mismo modo que se responsabiliza de la adecuación y mantenimiento de su infraestructura. Se encuentra estructurada principalmente por dos departamentos, el departamento de nuevas construcciones y el departamento de materiales compuestos.

### **3. VISITA TÉCNICA A COTECMAR PLANTA MAMONAL**

Durante, el día 18 de marzo de 2010 se realizó una visita técnica a las instalaciones de COTECMAR planta mamonal, entre las 8:00 a.m. y 11:30 a.m.. El propósito de esta visita se concentro en conocer, observar e inspeccionar las actividades desarrolladas en cada uno de los procesos de reparación, mantenimiento y construcción que realizan a las embarcaciones en tierra.

En primera instancia, se conocieron las normas de seguridad que se deben considerar en caso de emergencia dentro de la misma planta como en sus alrededores y de las normas de seguridad que se deben considerar para circular por las instalaciones, puesto que esta es el procedimiento requerido para permitir el acceso a las instalaciones de campo. Y en segunda instancia se procedió a realizar el recorrido correspondiente por cada uno de los procesos, de los cuales se resaltan cada una de las siguientes temáticas.

#### **3.1 POSICIONES DE VARADA**

Durante el recorrido por las posiciones de varada se logró observar la forma en que se encuentran posicionadas las embarcaciones en tierra. Cuando las embarcaciones atracan en los muelles de COTECMAR para su mantenimiento y/o reparación, es necesario que sean transportadas hasta las posiciones de varada, así como se presenta en la figura 2. Una vez dada la orden para operar sobre la embarcación que ha atracado a los muelles, esta debe ser transportada primeramente hasta las plataformas de los sincroelevadores con la ayuda de remolcadores; cuando se encuentran en las plataformas, se procede al levante de la embarcación, en este proceso es importante cuidar la posición de la embarcación, por lo que unos buzos se encargan de ajustar la cuña de madera

(las cuales descansan sobre carros metálicos llamados carros de quilla y pantoque, ver figura 12); ya que de esta forma se garantiza la correcta estabilidad de la embarcación cuando se ubica en los rieles.

Finalmente, se procede a transportar la embarcación a la posición de varada de reposo en donde un cargador es acoplado al primer carro de pantoque de la estructura de soporte, el cargador hala la estructura y la lleva hasta el foso de transferencia, como se presenta en la figura 3; allí una plataforma móvil lo coloca en la dirección de la posición de varada final y el cargador lo sigue halando hasta quedar ubicado definitivamente tal y como se presenta en la figura 4.

**Figura39. Diagrama de flujo de atraque y subida a dique de embarcaciones.**



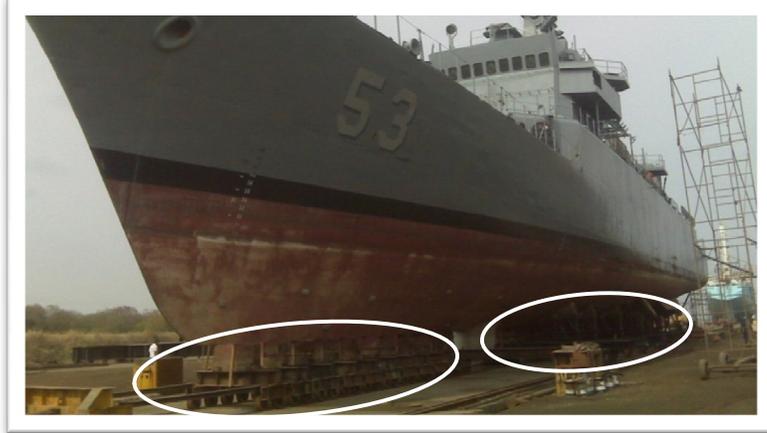
**Fuente: Información suministrada por personal de labores de reparación y/o mantenimiento.**

**Figura 40. Foso de transferencia.**



**Fuente: Base de datos fotográficas - COTECMAR.**

**Figura 41. Carros de pantoque y quilla.**



**Fuente: Base de datos fotográficas –Visita Técnica a COTECMAR, Marzo de 2010.**

### **3.2 ACTIVIDADES REALIZADAS PREVIO AL INICIO DE LOS TRABAJOS DE REPARACIÓN Y/O MANTENIMIENTO DE EMBARCACIONES.**

Antes de iniciar trabajos sobre las embarcaciones fijadas en las posiciones de varada, se deben considerar ciertas precauciones que tienen como principal propósito minimizar los riesgos de accidentes a trabajadores e incendios en las mismas; para ello, se realizan las actividades que se exponen a continuación:

- Puesta a tierra del casco metálico de la embarcación: se utiliza para canalizar la acumulación de cargas electrostáticas presentes en el casco de la embarcación, así como para referenciar la masa de la misma, al SPT del astillero; para ello, se utilizan conductores de cobre aislados o desnudos que se sueldan en diferentes puntos del casco de la embarcación y al SPT, así como se presenta en las figuras 5 y 6. En la actualidad, no se cuentan con metodologías que establezcan la equipotencialización, por lo que la conexión a tierra se realiza según el criterio del trabajador a cargo.

**Figura 42. Conexión a tierra del casco metálico de una embarcación.**



**Fuente: Base de datos fotográficas –Visita Técnica a COTECMAR, Marzo de 2010.**

**Figura 43. Detalles de conexión a tierra.**



**Fuente: Base de datos fotográficas – Visita Técnica a COTECMAR, Marzo de 2010.**

- Prueba de ausencia de vapores (gas free): se realiza para determinar la presencia de vapores combustibles, tóxicos, humos o cualquier otro tipo de gases que ponen en riesgo la seguridad del personal que se aproxime a la embarcación para desarrollar las actividades de mantenimiento y/o reparación.
- Conexión de agua para refrigeración: esta conexión se realiza para contribuir en el proceso de intercambio de calor que deben seguir los equipos de refrigeración y generación de energía que se encuentran al interior de la

embarcación; los cuales se ven afectados, por que su estadía en tierra les imposibilita tomar el agua de mar para permitir la refrigeración de dichos equipos.

- Limpieza de tanques combustibles: se realiza para garantizar óptimas condiciones de trabajo al personal de reparación y/o mantenimiento, puesto que la presencia de combustibles en los tanques incrementa el riesgo de incendio por chispas (presentadas en las actividades de soldadura y oxicorte).
- Descarga de aguas sentinas: la descarga de las aguas servidas que se encuentran depositadas en los tanques sépticos de la embarcación se extraen con el apoyo de equipos de succión, los cuales vacían los tanques para luego llevar el contenido a los rellenos sanitarios para su correcta disposición. Con esta medida se pretende garantizar adecuadas condiciones ambientales para que el personal de reparación y/o mantenimiento puedan realizar sus actividades.

### **3.3 ACTIVIDADES REALIZADAS DURANTE LAS LABORES DE MANTENIMIENTO Y REPARACIÓN DE EMBARCACIONES**

Durante la visita se contó con la oportunidad de presenciar actividades de reparación y/o mantenimiento de 2 embarcaciones, una de ellas correspondía a una embarcación militar y la otra a una embarcación comercial de carga. Sobre la embarcación comercial de carga se realizaban actividades de pintura y corte y cambio de láminas al casco de la embarcación; para estas actividades se puede presentar la siguiente información detallada.

- Sandblasting y Pintura: para realizar las actividades de pintura al casco metálico de la embarcación es necesario eliminar la capa de pintura existente

por medio de una técnica denominada sandblasting, la cual consiste en expulsar aire y arena a alta presión sobre un metal, eliminando de esta forma la corrosión y pintura del metal, ver figura 8; una vez expuesto el casco de la embarcación, se aplica el anticorrosivo y luego la pintura naval, ver figura 9. Las etapas de este proceso se presentan detalladamente en la figura 7.

**Figura 44. Proceso de pintura a casco metálico de una embarcación.**



**Fuente:** Información suministrada por personal de labores de reparación y/o mantenimiento.

**Figura 45. Aplicación de técnica de sandblasting a embarcación.**



**Fuente:** Base de datos fotográficas - COTECMAR.

**Figura 46. Aplicación de anticorrosivo y pintura al casco de la embarcación.**



**Fuente:** Base de datos fotográficas – Visita Técnica a COTECMAR, Marzo de 2010.

- Corte y cambio de láminas: para la realización de actividades de corte y cambio de láminas en el casco de la embarcación, se debe tener en cuenta que primeramente es necesario cortar la lámina que se encuentra deteriorada o desgastada ya sea por la corrosión o por golpes, ver figura 11; para ello se utilizan tanto las técnicas oxiacetilénicas como las de arco eléctrico y se sigue el proceso que se presenta en la figura 10.

**Figura 47. Proceso de corte oxiacetilénico y cambio de lámina.**



**Fuente:** Información suministrada por personal de labores de reparación y/o mantenimiento.

**Figura 48. Cambio de lámina de casco de embarcación.**



**Fuente:** Base de datos fotográficas – Visita Técnica a COTECMAR, Marzo de 2010.

En lo referente a la embarcación militar, se logró observar como se realiza el cambio de las protecciones catódicas y como se efectúa la alimentación eléctrica desde tierra, ya sea para las máquinas de trabajo o para alimentar la carga de la embarcación.

- Protecciones catódicas: son piezas de metal, denominadas ánodos de sacrificio, que se instalan en el casco de una embarcación para protegerla de la corrosión a la que se expone cuando se encuentra en el medio marino; la corrosión en debida principalmente a las corrientes galvánicas. En la figura 12, se puede observar uno de los ánodos de sacrificio que aun se encuentra instalado en el casco de la embarcación; en la figura 13, se puede observar este mismo ánodo pero retirado del casco y se puede apreciar el desgaste que sufre la pieza de metal, gracias a la corrosión.

**Figura 49. Protección catódica instalada.**



**Fuente: Base de datos fotográficas – Visita Técnica a COTECMAR, Marzo de 2010.**

**Figura 50. Protección catódica desinstalada.**



**Fuente: Base de datos fotográficas – Visita Técnica a COTECMAR, Marzo de 2010.**

- Alimentación eléctrica: fue requerida por la embarcación para alimentar su carga interna, pues el objeto era no utilizar su generador para no consumir combustible. El servicio se presta a través de mamparas de conexión, las cuales ofrecen posibilidad de conexión a niveles de 220V y 440V; en la figura 14, se puede observar una de estas mamparas.

**Figura 51. Mamparas de conexión.**



**Fuente: Base de datos fotográficas – Visita Técnica a COTECMAR, Marzo de 2010.**

### **3.4 NUEVAS CONSTRUCCIONES**

El proceso relacionado a nuevas construcciones supone 4 pasos muy importantes, iniciando por el diseño de la nueva embarcación a construir, la cual es responsabilidad de la Dirección de Investigación, Desarrollo de Innovación “DIDESI”; una vez diseñada la embarcación se presentan planos de construcción, presupuestos, cronogramas de ejecución, entre otras cosas. Con esta información establecida se avanza al paso 2, en el cual se realizan todas las gestiones para adquirir los recursos necesarios para construir la embarcación; cuando se ha obtenido totalidad o parte del recurso, se inician las labores de ejecución del

proyecto, dividido en secciones, para su paulatino ensamble; finalmente, se realiza la prueba de mar a la embarcación para luego ser entregada.

**Figura 52. Proceso de construcción de embarcaciones.**



**Fuente: Información suministrada por personal de labores de reparación y/o mantenimiento.**

Durante la visita se logró observar una embarcación que se encontraba en la etapa de ejecución de labores del proceso de construcción; se evidenciaron avances de la construcción de una embarcación tipo fragata, para la armada nacional. En las posiciones de varada se encontraban varias piezas de esta embarcación, las cuales están en etapa de construcción para posteriormente ser ensambladas, ver figura 16.

**Figura 53. Construcción de embarcación tipo fragata.**



**Fuente: Base de datos fotográficas – Visita Técnica a COTECMAR, Marzo de 2010.**

#### 4. RESULTADOS

La visita técnica realizada a las instalaciones de COTECMAR permitió conocer tanto la organización estratégica con la que cuenta la empresa, como la distribución física en la que se realizan las actividades de construcción, mantenimiento y/o reparación de embarcaciones en tierra. Más detalladamente se puede establecer que:

- Se conoció como se encuentra estructurada la organización tanto a nivel de unidades (agrupación general) como a lo que ellas conforman (divisiones especializadas). Esta organización cuenta con 4 unidades estratégicas dentro de las que encontramos la unidad de negocio, la cual hace referencia a lo relacionado con la parte técnica de la construcción, mantenimiento y/o reparación de embarcaciones.
- Se conocieron los procedimientos de seguridad y de maniobras que se consideran para realizar la elevación y transporte de las embarcaciones desde los muelles hasta las posiciones de varadas.
- Se observaron algunas actividades de mantenimiento y reparación de embarcaciones de las que se no solo se logró obtener información de los procesos a seguir para cada actividad, sino que también se logró ver de cerca materiales nuevos, conocer métodos de trabajo de los operarios, ver materiales residuos y en algunos casos conversar con operarios de las maquinas, quienes explicaron algunos de las técnicas que utilizan para llevar a cabo las actividades requeridas.

**Anexo 2. Formato de encuestas aplicado al personal de reparación y/o  
mantenimiento de embarcaciones en tierra**

## ENCUESTA APLICADA A PERSONAL DE REPARACIÓN Y/O MANTENIMIENTO DE EMBARCACIONES EN TIERRA

Área de trabajo:  Nuevas Construcciones  Reparación/Mantenimiento

¿Ha sufrido descargas eléctricas (Le ha pasado corriente) cuando toca el casco de una embarcación o una lámina en la que se ha trabajado con soldadura?

Si

No

Previo al inicio de trabajos de soldadura en embarcaciones, ¿coloca el casco de esta a tierra o verifica que esté conectada?.

Si

No

¿Ha sufrido descargas eléctricas cuando se realizan trabajos de oxiacorte en las embarcaciones?.

Si

No

Luego de realizar el proceso de Sandblasting a la embarcación, ¿le han sucedido descargas eléctricas por contacto con el casco metálico?

Si

No

¿Que opinión tiene acerca de las descargas eléctricas que se producen al tocar las embarcaciones? ¿Las considera peligrosas? ¿En que nivel de peligrosidad las clasifica? ¿Han sido graves?

---

---

---

¿Tiene alguna recomendación o comentario con respecto al tema de las descargas eléctricas producidas por contacto con los cascos de las embarcaciones?

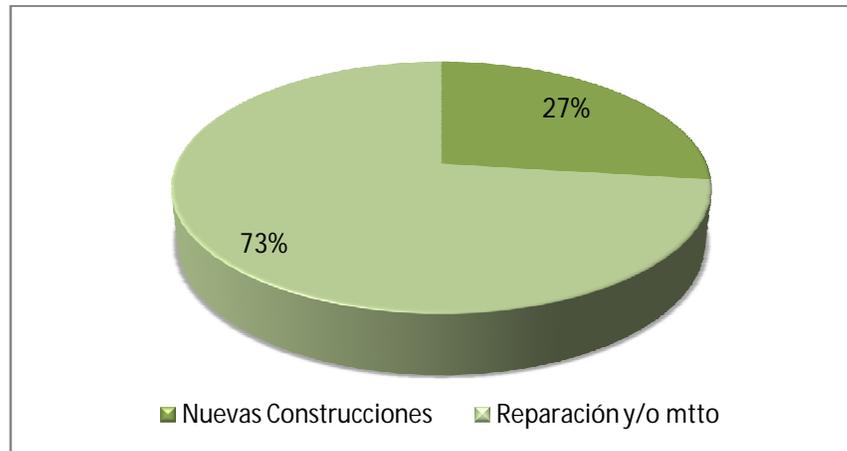
---

---

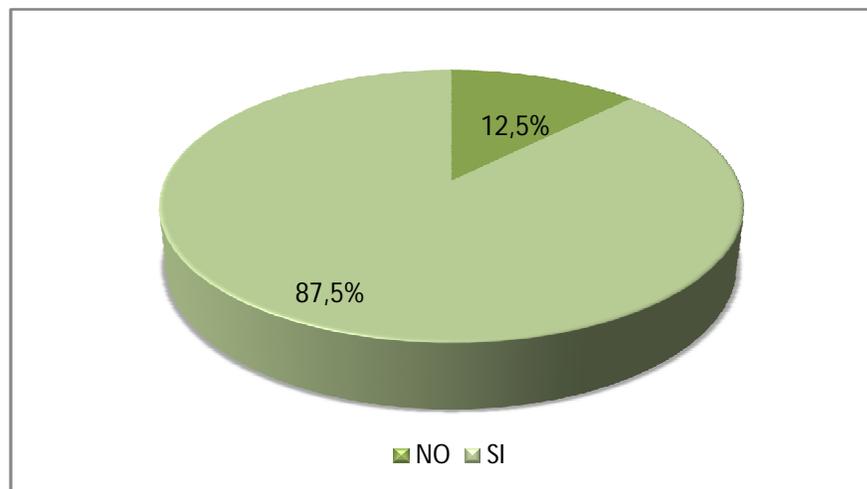
---

## RESULTADOS DE LA ENCUESTA APLICADA A PERSONAL DE REPARACIÓN Y/O MATENIMIENTO DE EMBARCACIONES EN TIERRA

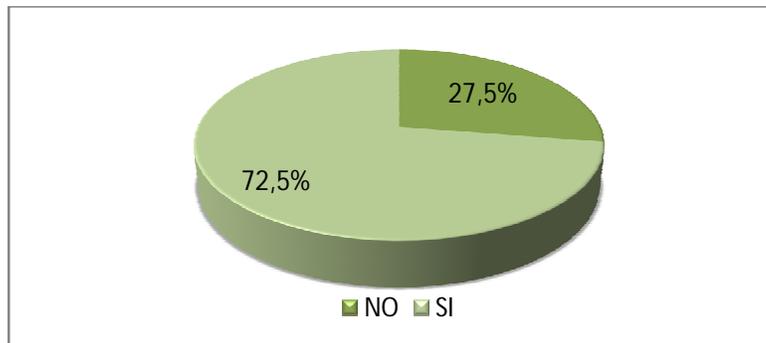
Área de trabajo del personal encuestado.



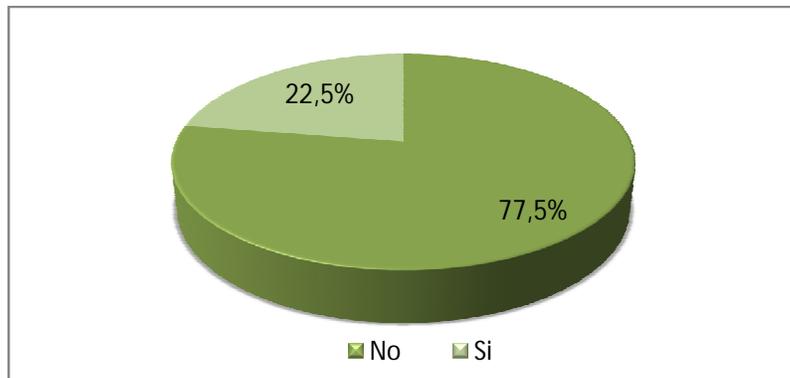
¿Ha sufrido descargas eléctricas (Le ha pasado corriente) cuando toca el casco de una embarcación o una lámina en la que se ha trabajado con soldadura?



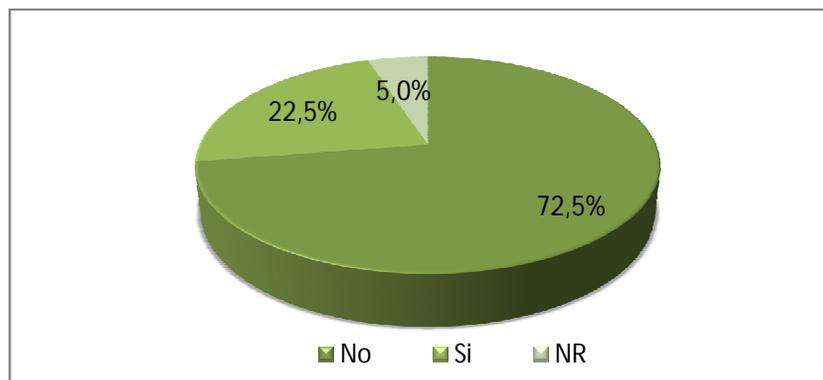
Previo al inicio de trabajos de soldadura en embarcaciones, ¿coloca el casco de esta a tierra o verifica que esté conectada?



¿Ha sufrido descargas eléctricas cuando se realizan trabajos de oxicorte en las embarcaciones?

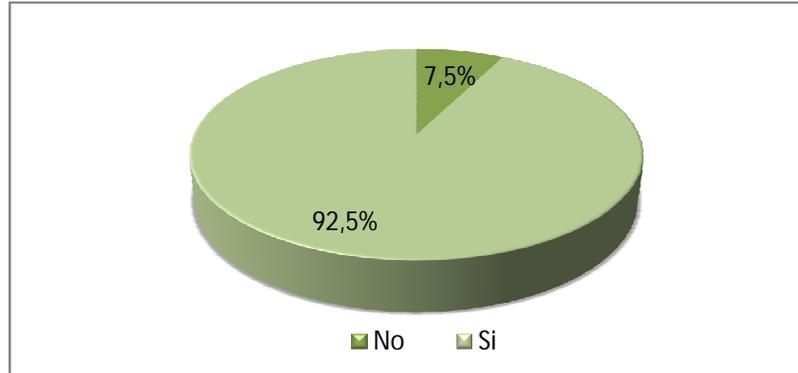


Luego de realizar el proceso de Sandblasting a la embarcación, ¿le han sucedido descargas eléctricas por contacto con el casco metálico?

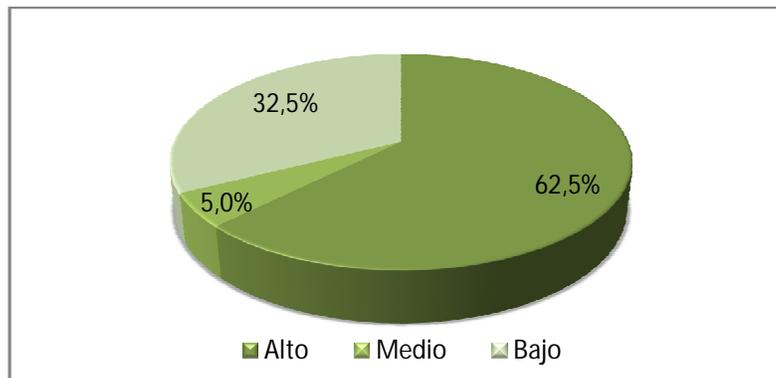


¿Que opinión tiene acerca de las descargas eléctricas que se producen al tocar las embarcaciones?

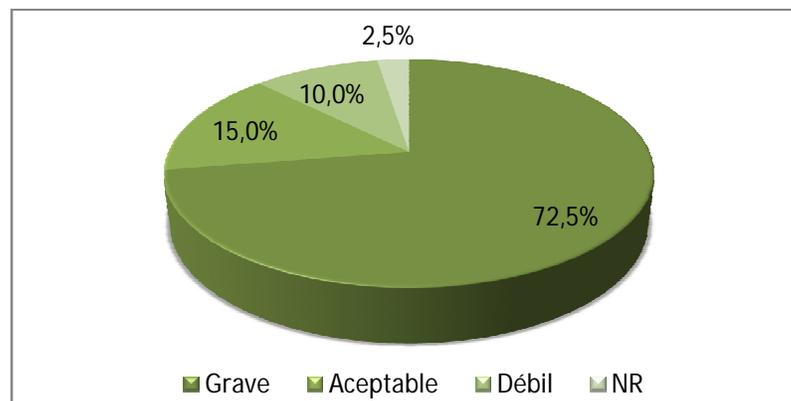
¿Las considera peligrosas?



¿En que nivel de peligrosidad las clasifica?



¿Han sido graves?



**Anexo 3. Matriz de la revisión del estado del arte del comportamiento de las cargas electrostáticas en diversas aplicaciones industriales**