

# FUNDAMENTOS DE CONTROL DE LA DESCARGA ELECTROSTÁTICA EN INSTALACIONES DE ENSAMBLAJE E INTEGRACIÓN DE VEHÍCULOS ESPACIALES

Enrique J. Luque V.

E-mail: Eluque@abae.gob.ve, Luquev14@gmail.com

**RESUMEN:** La descarga electrostática representa un problema en el ensamblaje e instalación de vehículos espaciales. Este trabajo trata de manera introductoria este problema, describiendo brevemente la naturaleza física de la electricidad estática y el comportamiento de los materiales con respecto a la misma. Se presentan también los modelos que se usan para estimar la sensibilidad de un dispositivo frente a la descarga electrostática. Finalmente se exponen las medidas administrativas y operativas que se deben aplicar para garantizar la calidad de los productos con respecto a la ESD dentro de cualquier instalación que contenga artículos susceptibles a daños por ESD, especialmente aquellas donde se ensamblen e integren vehículos espaciales.

**PALABRAS CLAVE:** Descarga Electrostática, Control de ESD, Ensamblaje e Integración.

## 1 INTRODUCCIÓN

La descarga electrostática (ESD, por sus siglas en inglés) se define como "La transferencia de carga electrostática entre cuerpos con diferentes potenciales electrostáticos, causada por contacto directo o inducida por un campo electrostático"[1], y ha representado un problema industrial para la humanidad en infinidad de campos a lo largo de la historia, desde la conservación de pólvora en fortalezas en el Siglo XV, hasta la misión del Apolo XI, pasando por aplicaciones en las industrias petroquímicas, farmacéuticas, textiles, agricultura, y muy especialmente en la industria electrónica, entre tantas otras.

En la industria Aeroespacial el margen de error es mínimo, por lo que para garantizar la calidad de los dispositivos electrónicos a bordo de vehículos espaciales es de suma importancia el establecimiento de medidas para controlar la ESD a lo largo de todas las etapas de desarrollo de un proyecto.

El objetivo de este trabajo es presentar al lector una introducción a la ESD, el problema que esta presenta en el ensamblaje e integración (A&I, por sus siglas en inglés) de vehículos espaciales y los principios y métodos usados para manejar el mismo.

## 2 CONCEPTOS BÁSICOS

En este aparte se pretende dar al lector los conceptos básicos que se manejan en la tecnología de ESD

### 2.1 FUENTES DE ESD

Para controlar la descarga electrostática es necesario conocer cómo se origina la carga electrostática.

La principal fuente de carga electrostática de un material es el contacto y separación de dos materiales, esto se conoce como "Efecto Triboeléctrico" y funciona de la siguiente manera: Supóngase que dos materiales tienen carga neta 0, esto es, que los átomos de estos materiales tienen igual número de protones en el núcleo que de electrones orbitándolo. Al frotarse entre sí y separarse, dependiendo de sus propiedades, es posible que uno de los materiales transfiera electrones de su superficie a la superficie del otro material. De esta manera el material que cedió electrones queda con carga positiva y el que los recibió queda con carga negativa (Fig.1). Esta transferencia de electrones está influenciada por múltiples factores: el área de contacto, la velocidad de separación, la humedad relativa (sumamente importante, a mayor humedad menor generación de carga electrostática), propiedades químicas del material, entre otras [2].

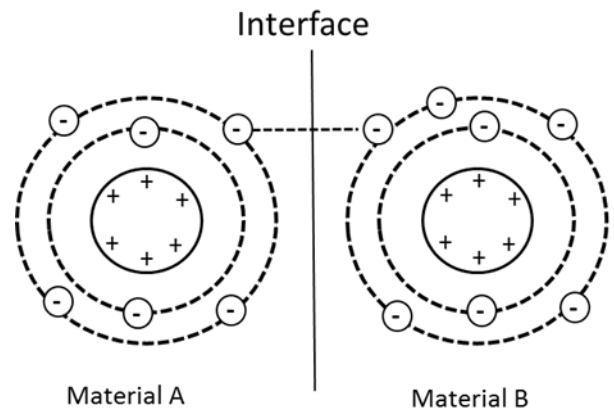


Figura 1. Representación del efecto triboeléctrico

La carga electrostática también puede ser inducida por un objeto cargado. Supongamos que a un material "A" eléctricamente neutro se le acerca un material "B" con carga positiva. Esta carga atraerá a los electrones

de "A" hacia su superficie, generando una separación de cargas en "A". Así pues "A" en su conjunto será eléctricamente neutro, pero la superficie cercana a "B" tendrá carga negativa. Este fenómeno debe ser considerado en el diseño de los vehículos espaciales puesto que al volar por zonas ionizadas se podrían cargar las superficies del mismo y generar un evento ESD, sin embargo a nivel de manufactura, manipulación, ensamblaje e integración la principal causa de acumulación de cargas es sin lugar a dudas el efecto triboeléctrico [2].

Ciertos tipos de materiales pueden presentar separación de cargas como respuesta a la aplicación de un esfuerzo mecánico o por efecto del calor [2], este origen de carga electrostática tampoco se toma en cuenta en este trabajo pues no representa un problema en los procesos de manufactura, ensamblaje e integración de vehículos espaciales.

En una sala de ensamblaje, integración y pruebas de vehículos espaciales (Sala AIT) la principal fuente de electricidad electrostática son los seres humanos y sus actividades dentro de la misma.

En la tabla 1 se presentan los voltajes electrostáticos que generan algunas actividades comunes, a varios niveles de humedad relativa en el aire.

Tabla 1. Generación de potencial electrostática a distintas humedades del aire

ACTIVIDAD	VOLTAJE ELECTROSTÁTICO (V)			
	10% Hr	40% Hr	55% Hr	90% Hr
Caminar sobre una alfombra	35000	15000	7500	1500
Caminar sobre un suelo de vinilo	12000	5000	3000	250
Actividad normal en banco de trabajo	6000	800	400	100

## 2.2 LOS MATERIALES Y LA ESD

Distintos materiales tienen distintas respuestas al fenómeno de electricidad estática. Las propiedades que deben ser tenidas en cuenta para una evaluación de los riesgos de ESD son básicamente tres:

- Capacidad de generación de carga electrostática: Esta propiedad tiene que ver con la estructura atómica del material y su capacidad para dar o ceder electrones al entrar en contacto con otro. Para una referencia rápida se ha elaborado una lista conocida como Serie Triboeléctrica, donde se encuentran algunos materiales comunes. En esta serie se colocan los materiales que tienen mayor tendencia a ceder electrones arriba y los que tienen mayor tendencia a aceptarlos abajo. La diferencia en las posiciones que se ocupan en esta tabla es un indicativo que permite, grosso modo, predecir la polaridad y la magnitud de la carga que tomará cada uno de los materiales. Sin embargo existen excepciones dentro de

esta tabla, ya sea de la polaridad asumida (seda-vidrio-zinc, por ejemplo) o con la magnitud de la carga.

- Resistividad superficial: "se define para un material homogéneo como la resistencia existente entre dos bordes opuestos de una lámina cuadrada de espesor infinitesimal" [3], y es una medida independiente de las magnitudes del cuadro. Se expresa en  $[\Omega/\text{Sq}]$ . De acuerdo a su resistividad superficial se cataloga a los materiales en los siguientes tipos [3]:

- 1) Conductores: Se consideran materiales conductores aquellos que tengan una resistividad superficial menor a  $10^5 \Omega/\text{Sq}$ . Cuando un material conductor adquiere una carga esta se distribuye uniformemente en la superficie del conductor, si entra en contacto con otro conductor la carga se distribuye, si se conecta a tierra los electrones se transfieren con facilidad, neutralizando la carga.
- 2) Disipadores de estática: Se consideran materiales disipadores de estática aquellos que tengan una resistividad superficial entre  $10^5$  y  $10^{12} \Omega/\text{Sq}$ . El movimiento de electrones sucede dentro de estos materiales pero a un ritmo menor que en materiales conductores, sin embargo la carga se puede transmitir a tierra o a un conductor.
- 3) Aislantes: Se consideran materiales aislantes aquellos cuya resistividad superficial sea mayor a  $10^{12} \Omega/\text{Sq}$ . Como la resistividad de los materiales es tan alta el movimiento de los electrones está considerablemente reducido, pudiéndose generar altas y permanentes cargas en su superficie por efecto triboeléctrico. Un material aislante no se puede cargar por inducción.

- Tiempo de caída: Se define como "el tiempo en el cual el voltaje debido a una carga electrostática se reduce a un 10% del valor inicial (o a otro valor fijado)".

Con estas tres propiedades se puede predecir aproximadamente el comportamiento electrostático de los materiales, así como tomar las medidas pertinentes para evitar la ESD o mitigar sus efectos.

## 2.3 DAÑOS POR ESD

Se define daño por ESD como: "El cambio a un artículo causado por una ESD que produce que este sea incapaz de alcanzar uno o más parámetros específicos" [4], esto puede ocurrir en cualquier punto del ciclo del

producto, desde la manufactura hasta el uso. Se debe considerar que todo dispositivo o tecnología puede sufrir daños por ESD.

A continuación se presentan algunos de los modos en los que la ESD puede afectar a un dispositivo [2]:

- 1) Las transferencias súbitas de carga entre dos cuerpos pueden generar picos de corrientes de hasta varios amperios que pueden dañar el dispositivo, además pueden generar un incremento de la temperatura que puede producir fusiones de los materiales conductores.
- 2) El contacto entre un cuerpo cargado con un componente puede, dependiendo de la diferencia de potencial entre diferentes partes del cuerpo y del dispositivo, dar lugar a perforaciones en las capas dieléctricas.
- 3) Sin entrar en contacto un cuerpo cargado que se acerque a un dispositivo puede dañarlo induciendo en este último corrientes de suficiente intensidad para causarle daños.
- 4) Por acoplamiento capacitivo el pulso ESD puede dar lugar a corrientes en diferentes partes del circuito que pueden dañarlo.
- 5) Los súbitos pulsos de corrientes del ESD pueden dar lugar a la aparición de voltajes a lo largo de una pista. Estos voltajes pueden causar funcionamientos inadecuados de dispositivos.
- 6) Una ESD que dure unos pocos nanosegundos genera una emisión de radiación electromagnética en una amplia gama de frecuencias. Esta señal puede ser captada por cualquier elemento metálico de algún circuito afectando su funcionamiento, pudiendo en caso de afectar microprocesadores rápidos devenir en errores de software, pérdidas o alteraciones de datos.

Estos daños pueden ser dependientes de la potencia (casos 1,3 y 4) o dependientes del voltaje (casos 3 y 5).

Se puede clasificar el daño por ESD por sus efectos sobre dispositivos electrónicos en cuanto a su manifestación en el tiempo en tres categorías [2], [4]:

- 1) Falla Catastrófica: Se considera que existe este tipo de falla cuando, después de estar expuesto a un evento de ESD, un dispositivo no funciona total o parcialmente.
- 2) Defecto Latente: Se considera que existe un defecto latente cuando “se presenta un funcionamiento defectuoso después de un período de operación normal, que puede ser atribuido a un evento de ESD previo” [4].

- 3) Daños Acumulativos: El daño por ESD se puede producir también por sucesivas aplicaciones se niveles inferiores al umbral de daño del componente, así aunque un pulso pequeño de ESD no afecte significativamente el componente, una acumulación sucesiva de estos lo puede dañar.

Salta a la vista que aunque las Fallas Catastróficas pueden ser detectadas durante las pruebas de funcionamiento en tierra, los Defectos Latentes podrían no aparecer durante las mismas, corriéndose el riesgo de enviar al espacio un vehículo con dispositivos cuya vida útil está disminuida que, tomando en cuenta lo prácticamente imposible de hacer reparaciones en órbita, pueda comprometer el cumplimiento de la misión asignada, generando en el mejor de los casos sustanciales pérdidas económicas.

Además, una superficie cargada puede atraer partículas materiales contaminantes que son difíciles de eliminar y en el caso de dispositivos electrónicos podrían afectar su funcionamiento.

Con el objeto de disminuir los costos causados por fallas originadas por ESD o contaminación asociada a este fenómeno, que pueden ir desde la sustitución de un dispositivo hasta la pérdida de la misión e incluso vidas humanas, es de suma importancia el establecer programas de control de ESD en las instalaciones donde se manufacturan los dispositivos, así como en aquellas donde se ensamblan, integran, prueban y se lanzan a órbita vehículos espaciales.

## 2.4 SENSIBILIDAD DE DISPOSITIVOS FRENTE A LA ESD

En la industria se han desarrollado diversos modelos para establecer la sensibilidad ante la ESD de un dispositivo. Estos modelos buscan simular los diversos orígenes de la ESD. Se usa la unidad [V] para expresar la sensibilidad de un componente frente a la ESD, independientemente que sea este susceptible de daño por potencia o por voltaje.

En la industria aeroespacial se destacan tres [2], [5], [6]:

- 1) Modelo del Cuerpo Humano (HBM, por sus siglas en inglés): El ser humano es la principal fuente de ESD sobre componentes tanto en la manufactura, transporte, manipulación e instalación de componentes. El HBM busca simular la ESD generada por la manipulación o el acercamiento de un ser humano a un objeto sensible a descarga ESD (ESDS, por sus siglas en inglés). Esto lo hace simplificando el cuerpo humano como un circuito de parámetros concentrados formado por un condensador C, una resistencia R y una inductancia L conectados en serie (Fig.2).

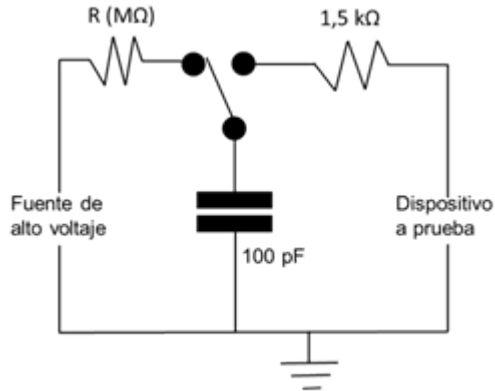


Figura 2. Circuito de prueba de sensibilidad ante ESD con el modelo HBM. [5]

La inductancia es de micro fracciones de Henrio por lo que es generalmente despreciada, la capacitancia del cuerpo humano varía con el tamaño de la persona, su vestido, su calzado, etc. Su valor oscila entre 50 y 500 pF, aunque según estudios el 80% de las personas tienen  $C < 100\text{pF}$ . Por otro lado la resistencia del cuerpo humano, que se ve afectada con la humedad, sales y aceites sobre la piel, el área de contacto con la piel, entre otros, varía entre los valores de 10 a 100000  $\Omega$ , aunque se encuentra típicamente en el orden de los 1 a 5 k $\Omega$ . Tomando en cuenta lo mencionado, el circuito que simula el cuerpo humano en el HBM tiene una  $C=100\text{pF}$  y una  $R=1,5\text{ k}\Omega$ . Este circuito produce una onda de descarga de forma triangular (Fig. 3), típica de la descarga del cuerpo humano.

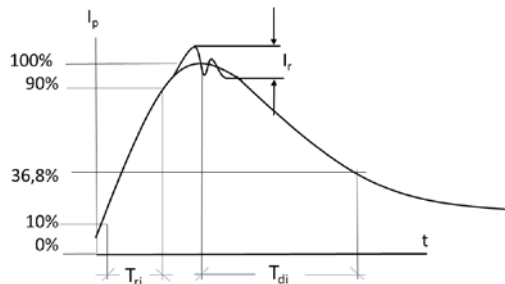


Figura 3. Onda de descarga típica de modelo HBM [2]

Es importante recalcar que aunque este circuito no supone el "peor de los casos posibles" en la mayoría de las situaciones será útil para estimar la sensibilidad de un dispositivo frente a la ESD. El procedimiento de pruebas para realizar la clasificación por sensibilidad frente a ESD de un dispositivo se puede revisar en [6]. En la tabla 2 se presenta la clasificación de sensibilidad a ESD de acuerdo al HBM.

Tabla 2. Clasificación de sensibilidad frente ESD de acuerdo al modelo HBM [5]

Clase	Rango de Voltaje (V)
0	<250
1A	250-500
1B	500-1000
1C	1000-2000
2	2000-4000
3A	4000-8000
3B	>8000

- 2) Modelo de Dispositivo Cargado (CDM, por sus siglas en inglés): Aunque en menor medida que el cuerpo humano, los dispositivos también pueden generar eventos de ESD. Al igual que el ser humano los componentes se pueden cargar por el efecto triboeléctrico y la magnitud de la carga adquirida depende de factores como los materiales del dispositivo, el tipo de cápsula que lo contiene, la velocidad del movimiento, etc. Para describir la descarga ESD originada por un dispositivo cargado se usa un circuito como el de la Fig. 4.

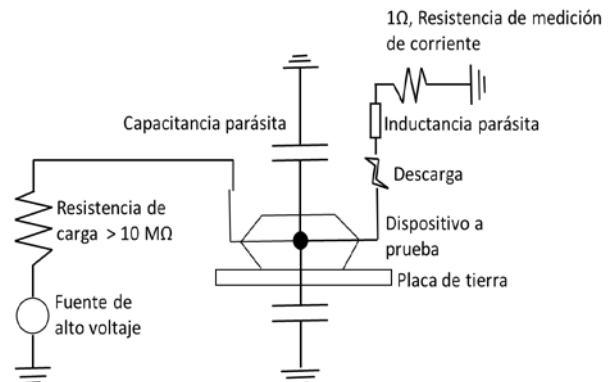


Figura 4. Circuito de prueba de sensibilidad ante ESD con el modelo CDM. [5]

La forma típica de la onda de descarga en CDM es una sinusoidal amortiguada con tiempos de subidas del orden de nanosegundos y duración total  $< 10\text{nS}$  (Fig. 5).

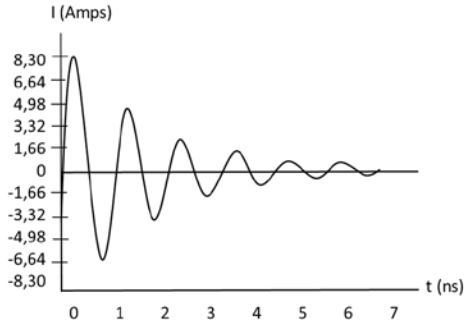


Figura 5. Onda de descarga típica de modelo CDM [2]

Aunque la capacidad de almacenamiento de energía es mayor en HBM que en CDM, en este último el pulso es más rápido pudiendo ocasionar que la densidad de la potencia sobrepase el umbral de daño. En la Tabla 3 se presenta la clasificación de sensibilidad a ESD de acuerdo al CDM.

Tabla 3. Clasificación de sensibilidad frente ESD de acuerdo al modelo CDM [5]

Clase	Rango de Voltaje (V)
C0	<125
C1	125-250
C2	250-500
C3	500-1000
C4	1000-2000
C5	>2000

- 3) Modelo de Máquina (MM, por sus siglas en inglés): El MM intenta simular la descarga causada por un objeto conductor o una herramienta o dispositivo con anclaje metálico. Sirve para simular fuentes de estática tales como carritos, vehículos o cualquier conductor aislado (Fig.6).

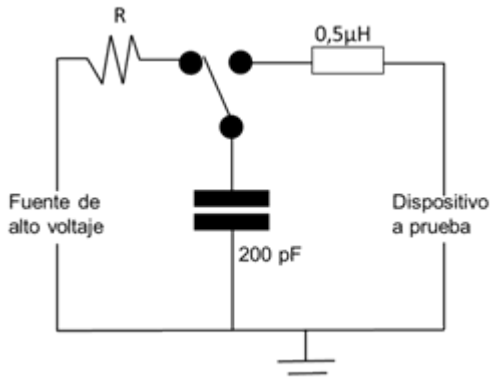


Figura 6. Circuito de prueba de sensibilidad ante ESD con el modelo MM. [5]

La forma de la onda (Fig. 7) de descarga se asemeja a la del CDM.

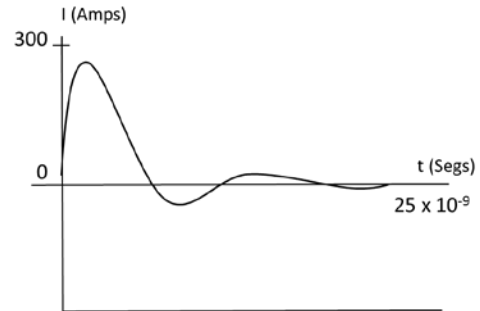


Figura 7. Onda de descarga típica de modelo MM [2]

En la tabla 4 se presenta la clasificación de sensibilidad a ESD de acuerdo al MM.

Tabla 4. Clasificación de sensibilidad frente ESD de acuerdo al modelo MM [5]

Clase	Rango de Voltaje (V)
M0	<25
M1	25-100
M2	100-200
M3	200-400
M4	400-800
M5	>800

Para que un componente este completamente caracterizado en cuanto a su sensibilidad frente a la ESD debe estar clasificado por estos tres modelos, así un componente puede ser por ejemplo clases 1B, M1, C3. En cualquier caso esta clasificación debe ser tomada como una referencia y no como valores absolutos, dada la gran cantidad de variables que intervienen en un evento de ESD.

### 3 PREVENCIÓN Y CONTROL DE LA ESD EN LA INDUSTRIA AEROSPAZIAL

En este aparte se pretende presentar una introducción al control de ESD en instalaciones de Ensamblaje e Integración (A&I, por sus siglas en inglés), analizando los principios básicos de control de ESD y la elaboración de un Programa de Control de ESD para instalaciones donde se manejen componentes ESDS.

#### 3.1 Principios de Control de ESD

Existen seis principios fundamentales sobre los que se apoya cualquier programa de control de ESD en instalaciones de manufactura de componentes ESDS o, como en el caso que se trata, de ensamblaje e integración donde se manipulen componentes ESDS.

Sobre estos principios las distintas agencias espaciales (NASA, ESA, CAST, etc.) han desarrollado sus normas y procedimientos relativos a la ESD, tanto para uso a lo interno de sus instalaciones, como para las instalaciones de sus proveedores externos. Se presentan estos principios a continuación [7]:

### 3.1.1 Diseño protegido contra ESD

El primer principio es "Diseñar productos y ensamblajes para ser tan resistentes a los efectos de ESD como sea razonablemente posible". Esto implica el uso de dispositivos menos sensibles o el uso de protecciones. Este principio no es especialmente importante a nivel de instalaciones de A&I, puesto que el diseño de partes, componentes y ensamblajes recae sobre otros hombros.

### 3.1.2 Definición del nivel de control necesario

A partir de la sensibilidad a la ESD de los componentes electrónicos que se manipulan en una instalación, que es información que suministra el diseñador o el fabricante, se establece el nivel de protección requerido en la misma. En instalaciones de A&I de vehículos espaciales el nivel que se estima es el más alto (0,C0), esto para garantizar la calidad de los productos y la versatilidad de las instalaciones.

### 3.1.3 Identificación y definición las Áreas con Protección Electroestáticas

Se define Área con Protección Electroestática (EPA, por sus siglas en inglés) a "Una locación definida equipada con los materiales, herramientas y equipos necesarios para controlar la electricidad estática hasta niveles que minimicen el daño a artículos ESDS" [1]. Las EPAs pueden ser áreas permanentes en una instalación o un área temporal localizada.

En las instalaciones de A&I de vehículos espaciales se considera que el establecimiento de una EPA en toda la instalación (Sala de AIT) con un mismo nivel de protección contra ESD ofrece mejores resultados en términos de entrenamiento de personal, implementación y control del plan de ESD, costos y simplicidad, esto en contraposición a la práctica de establecer distintas EPAs a lo largo de la instalación, cada una con un nivel de protección contra ESD.

### 3.1.4 Reducción de la generación de cargas electrostáticas

Dentro de una EPA se deben tomar medidas para mantener la generación de cargas electrostáticas dentro de valores que no afecten a los artículos ESDS que se manipulen en ella. En principio se deben eliminar de la EPA tantos procesos y materiales generadores de estática como sean posibles, especialmente aislantes fácilmente cargables como plásticos comunes. Se debe también mantener los materiales conductores y disipadores de estática al mismo potencial electrostático. Además se deben usar materiales especiales

disipadores de estática en las superficies de los bancos de trabajo, el suelo, carritos transportadores, etc. De igual manera el personal debe estar conectado a tierra a través de muñequeras o calzado. El objetivo es limitar la formación y/o acumulación de cargas electrostáticas en las EPAs, sin embargo es imposible eliminarlas totalmente.

### 3.1.5 Disipación y/o neutralización de las cargas

En vista de que a pesar de que se tomen las medidas mencionadas la carga electrostática finalmente va a ser generada una adecuada conexión a tierra y el uso de materiales conductores o disipadores de estática es fundamental. En el caso de que exista la necesidad ineludible de usar materiales aislantes, tomando en cuenta que en estos no pueden dispersar la carga con conexión a tierra, la ionización puede considerarse como una solución.

### 3.1.6 Protección de los productos

Se deben proteger los artículos ESDS tanto en el traslado fuera de las EPAs, como en la manipulación dentro de las mismas. Una manera de protegerlos es mantenerlos con una conexión a tierra adecuada que disipe cualquier carga. Otra manera es usando empaques que sean de materiales conductores o disipadores y de poca capacidad de generación de carga, ya sea para almacenamiento o transporte. Estos empaques deben estar identificados en un lugar fácilmente visible con los símbolos de la Fig.8.

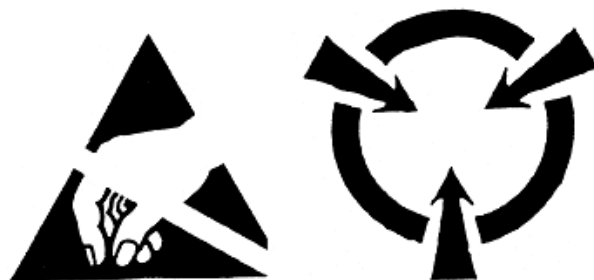


Figura 8. Señalización de artículos ESDS [3]

## 3.2 MEDIDAS DE CONTROL DE ESD EN INSTALACIONES DE A&I

En las instalaciones de A&I se deben mantener unas condiciones y prácticas que permitan proteger los artículos ESDS de daños. Se podrían dividir estas precauciones como medidas de control ambiental y medidas de control de cargas eléctricas.

### 3.2.1 Medidas de control ambiental

Una Sala de AIT, un salón AIT debe ser una EPA, debe cumplir las siguientes condiciones para garantizar la calidad de los productos con respecto a la ESD [2], [8]:

- **Identificación:** Una EPA debe estar provista de rótulos que identifiquen claramente la zona (Fig.9), de manera que el personal que entre tome las medidas pertinentes. Se recomienda a la entrada de una EPA, por ejemplo la Sala de AIT, la colocación de carteles que indiquen las medidas que se deben tomar dentro de la misma. A la entrada de la Sala de AIT debe haber una barra de tierra que debe ser tocada por el personal antes de entrar, inmediatamente a esto se debe tocar un dispositivo que mida la resistencia humana, para garantizar que la persona no representa una amenaza de ESD.



Figura 9. Señalización de una EPA

- **Limpieza:** La Sala de AIT debe ser un "Cleanroom" de clase 100000 y, en los espacios donde se realicen soldaduras de clase 10000.
- **Humedad:** El control de humedad es una de las medidas más importantes que deben ser tomadas en un área protegida contra ESD. La mayor parte de los cuerpos tiende a absorber humedad, así, a medida que aumenta la humedad en el aire aumenta la conductividad de los mismos, puesto que se forma una capa de humedad sobre sus superficies externas que las hace más conductoras. A mayor conductividad se favorece el desplazamiento de cargas sobre la misma superficie, a otros cuerpos y, eventualmente a tierra, neutralizándose de esta manera la carga. Además, a menor humedad en el aire, el mismo aire seco crea cargas electrostáticas al moverse sobre superficies aislantes. Una Sala AIT debe mantener la humedad relativa del aire entre 40% y 60% [1].
- **Temperatura:** La temperatura parece tener alguna incidencia en la disminución de la resistencia de los componentes al ESD, así a mayores temperaturas las fallas se pueden dar a voltajes menores a los esperados. De cualquier modo en una Sala de AIT la temperatura debe estar en el rango de 20+/- 5°C.
- **Toma de Tierra:** Se distinguen dos tipos de toma a tierra, tierra débil y tierra fuerte. La tierra débil es una conexión a tierra con una impedancia alta

para limitar el flujo de corriente a valores seguros para los operadores (<5mA), se estima que la resistencia de una tierra débil está alrededor de 1MΩ. Por otro lado una tierra fuerte debe garantizar el tránsito de la carga sin impedimentos hasta o desde tierra, el valor típico de una tierra fuerte es de un máximo de 1Ω. Periódicamente se debe revisar que la toma a tierra del laboratorio este en buen estado. Se considera que una conexión a tierra de una sola pica clavada en el suelo es insuficiente, se recomienda sistema en triángulo de varias planchas de cobre enterradas en un medio adecuado.

### 3.2.2 Medidas de control de cargas estáticas

El control de cargas estáticas en una EPA se realiza siguiendo tres principios: Control de generación de cargas electrostáticas, drenaje o neutralización de cargas electrostáticas y protección de los productos. A continuación se amplían estos temas [2], [3], [8]:

#### 3.2.2.1 Medidas de control de generación de cargas electrostáticas

Los movimientos, las ropas, el cabello pueden ser fuentes de carga electrostática. Las principales medidas que se toman para evitar la generación de cargas electrostáticas son el entrenamiento, en el que el operador internalice las correctas prácticas dentro de una EPA, y el uso de vestimentas tales como batas y guantes antiestáticos, dediles de plástico antiestático, etc., que sean capaces de disipar la carga que se haya podido generar. En la actualidad existen diferentes tejidos especiales que se caracterizan por generar poca electricidad estática y por disiparla con facilidad. Algunos de estos tejidos consiguen sus propiedades antiestáticas o conductoras por tratamientos químicos o por el entretejido de fibras conductoras, respectivamente. El algodón presenta un buen comportamiento frente a la generación de carga electrostática, sin embargo, normalmente desprende pequeñas fibras, situación que podría comprometer el nivel de limpieza requerido en un Sala de AIT. En las batas está contraindicado el uso de bolsillos tanto por ser estos un lugar de acumulación de impurezas, como por ser un representar un punto potencial para la generación de cargas estáticas por el roce entre dos tejidos, las manos, etc. Para manipular componentes se exige el uso de guantes o dediles de materiales disipadores de estática. El estado de las vestimentas antiestáticas debe ser monitoreado periódicamente puesto que las propiedades de las mismas podrían degenerarse con el tiempo. Se deben evitar los materiales aislantes y accesorios dentro del Sala de AIT a los estrictamente necesarios.

#### 3.2.2.2 Drenaje a tierra o neutralización

La conexión a tierra es sumamente importante en el control de la ESD. Todos los materiales conductores o disipadores de estática, así como el personal deben estar conectados a tierra o, en su defecto, conectados entre sí formando una superficie equipotencial. Se

recomienda hacer esta conexión en dos etapas: en la primera etapa se conectan todos los componentes del banco de trabajo y el personal a un "Punto Común de Tierra", que debe estar identificado. La segunda etapa consiste en conectar este "Punto Común de Tierra" a la descarga a tierra del aparato o la instalación.

Las muñequeras anti-estáticas (Fig. 10) son el principal método de conexión a tierra del personal que labora en un banco de trabajo con protección ESD. Estas muñequeras constan de dos partes, la muñequera y el cable con el que se conectan al Punto Común de Tierra.



Figura 10. Muñequera antiestática

Estas muñequeras deben, por seguridad, tener una resistencia de  $1\text{ M}\Omega$  (tierra débil), de tal manera que si se produce una descarga accidental la corriente que atraviese el cuerpo humano no produzca daños. Con respecto a las muñequeras se debe garantizar que la conexión a tierra cumpla con los requerimientos exigidos en todo momento, para garantizar esto existen sistemas de monitoreo continuo, que emiten una señal (un zumbido, por ejemplo) cuando la conexión a tierra no cumple con las necesidades. Se debe tomar en cuenta también que el vello humano puede interrumpir la conexión con la tierra, así una persona que lo tenga en abundancia en sus brazos deberá usar cremas antiestáticas.

Otra vía de drenaje es el suelo, a través del calzado. En el calzado se debe poner atención a dos factores: la capacidad de generación de carga por el contacto suela-piso, que depende de los materiales de ambas superficies, y la resistencia de la suela, la que debe garantizar que los electrones puedan circular con facilidad hacia el suelo, pero, similar a las muñequeras, debe tener un valor lo suficientemente alto como para limitar la corriente que pudiera atravesar el cuerpo humano a valores seguros. El uso de calzado conductor es de carácter obligatorio para el personal que labore en una Sala de AIT, y existen además suelas removibles que deben ser usadas por visitantes. En cualquier caso está totalmente prohibido el acceso al Sala de AIT con calzados de suelas hechas con materiales aislantes. Igualmente las ruedas de los equipos mecánicos de soporte (MGSE, por sus siglas en inglés) deben permitir

el flujo de las cargas hacia el suelo, por lo que están prohibidos los materiales aislantes para su fabricación.

El suelo es un elemento importante para el drenaje de las cargas electrostáticas y debe seguir los mismos principios que el calzado: poca capacidad de generación de cargas electrostáticas y una resistencia que a la vez de permitir el flujo de electrones, limite la corriente que podría pasar por el cuerpo humano ( $1\text{ M}\Omega$ ). Se debe mantener el suelo limpio, libre de contaminantes que puedan afectar sus propiedades, además está prohibido el uso de productos tales como barnices, ceras u otros que puedan crear capas aislantes en las superficies.

La ionización es un método de corrección y no de prevención. Se usa cuando no es posible eliminar efectivamente las cargas mediante la puesta a tierra, por lo que se erige como una solución para la neutralización de zonas cargadas en superficies aislantes. Consiste en hacer pasar una corriente de aire cargada con iones de ambas polaridades que sean capaces de disminuir el riesgo de ESD neutralizando las cargas en superficies aislantes. Se recomienda también el uso de ionización en los almacenes de las batas, ropas, etc., de uso en la Sala de AIT.

Los bancos de trabajo deberán estar diseñados y construidos de manera que limiten la generación de cargas electrostáticas y que sean capaces de drenar las que se generen, incluyendo esto materiales, conexiones a tierra, instrumentos, etc. (Fig.11).

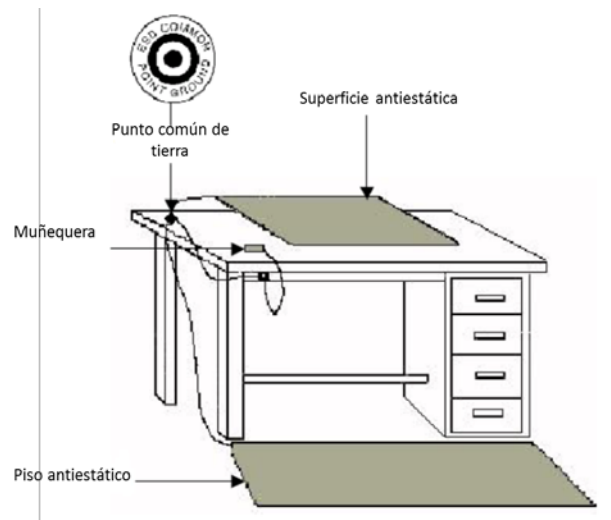


Figura 11. Banco de trabajo antiestático típico [2]

De igual manera los asientos, taburetes, carros transportadores y similares deben estar construidos de materiales antiestáticos y tener conexión a tierra.

Algunas situaciones como el roce de artículos ESDs con maquinarias tales como cintas transportadoras, el uso de pantallas de video, el movimiento de partes robóticas entre otras pudieran generar cargas electrostáticas. La principal medida contra esto es la conexión a tierra de las maquinarias. En el caso de las pantallas de video o cualquier artefacto



o material que sea generador de cargas estáticas y deba por fuerza estar en el Sala de AIT se debe mantener una distancia de mínimo 30 cm de artículos ESDS.

### 3.2.2.3 Medidas de control de ESD en el almacenado y manejo de productos

La manipulación de objetos ESDS fuera de una EPA está totalmente prohibida. Para almacenar y trasladar objetos ESDS fuera de una EPA deben estar protegidos por un empaque diseñado para tales fines. Estos empaques proporcionan aislamiento de los componentes que contengan frente a campos externos, los protege de descargas eléctricas directas y minimizan la generación de cargas electrostáticas por efecto triboeléctrico. Estas bolsas o contenedores deben estar identificadas en un lugar plenamente visible con las señales de objetos ESDS (Fig. 8) y se recomienda su desecho tras varios usos.

## 3.3 PLAN DE CONTROL DE ESD

La Gerencia de una instalación de A&I debe preparar un Programa de Control de ESD dentro de la misma. En el sector aeroespacial el principal objetivo de este programa es garantizar la calidad de los productos, esto para evitar fallas que pueden causar desde incremento de los costos hasta la pérdida de la misión o vidas humanas.

Un programa de control de ESD debe contemplar las siguientes líneas de acción [2]:

- Auditoría previa: Es el primer paso para el establecimiento de un programa de control de ESD. En esta auditoría se determina el problema que representa la ESD en la instalación. El principal factor que se toma en cuenta es la sensibilidad frente a la ESD de los artículos que se manejen dentro de la instalación.
- Adopción de medidas adecuadas: Una vez conocidas las necesidades de protección contra la ESD de una instalación se procede a definir las medidas y el nivel de estas que deben aplicarse en ella.
- Elaboración de procedimientos de operación: Todos los procedimientos que se realicen con componentes ESDS deben redactarse detalladamente de manera que no existan ambigüedades en lo que se debe hacer tanto en situaciones normales como en situaciones extraordinarias. Estos procedimientos deben ser estudiados por todo el personal puesto que su cumplimiento es de estricto cumplimiento.
- Formación de personal: Al ser el personal el principal generador de cargas electrostáticas en el Salón de AIT, es fundamental el establecimiento de un programa de

entrenamiento para la manipulación de componentes ESDS. Este programa debe contemplar la repetición periódica de los cursos con el objetivo de mantener al día al personal, enriquecer con la experiencia el entrenamiento y evitar que se diluya la atención que se presta a la prevención de la ESD.

- Definición de un plan de seguimiento: Se deben establecer métodos para comprobar que las medidas que se implantan en el Salón de AIT para la prevención de la ESD están cumpliendo su cometido.
- Auditorías periódicas: Se deben realizar auditorías a las instalaciones cada seis meses, con el objetivo de verificar que las medidas que se toman se cumplan y que garanticen la calidad de los productos de la instalación.

## 4 CONCLUSIONES

La naturaleza de la industria aeroespacial no deja prácticamente espacio al error, puesto que es imposible reparar los productos una vez estén en órbita y sus costos son altísimos. Es pues de suma importancia garantizar la calidad de los productos y procedimientos en tierra. La ESD representa un problema en las instalaciones de ensamblaje e integración que de no ser controlada, además de incrementar los costos, puede comprometer la calidad de los productos y con esto el éxito de las misiones.

Venezuela construye actualmente una instalación de Diseño, Ensamblaje, Instalación y Pruebas de Pequeños Satélites (CIDE), en el marco del Plan de la Patria 2013-2019, en la que es indispensable la elaboración y aplicación de un Programa de Control de ESD, para garantizar la calidad de los productos allí se generen. Este trabajo tiene la intención de ser un modesto aporte en este sentido.

Las tareas de evaluación de riesgos de ESD, selección y aplicación de medidas de mitigación, elaboración de procedimientos y de un programa de entrenamiento para el personal son fundamentales desde los mismos inicios del proyecto.

La filosofía de trabajo dentro de instalaciones de A&I debe tener como base el absoluto respeto a los procedimientos y normas establecidas, dejando por supuesto caminos para mejorarlos usando el aprendizaje obtenido con la experiencia, extendiéndose esta política no solo al control de ESD sino a todas las operaciones que se realicen en las instalaciones.

El entrenamiento, formación, disciplina y mística de trabajo del personal, la aplicación, cumplimiento estricto, la constante vigilancia, evaluación y mejora de las medidas de protección contra la ESD serán los garantes de la calidad de los productos de las instalaciones del CIDE con respecto a la ESD, y piezas fundamentales en

el rompecabezas que implica el diseño, ensamblado, integración y pruebas de un vehículo espacial.

## 5 REFERENCIAS

- [1] *Electrostatic Discharge Control*, NASA-STD-8739.7, 1997.
- [2] E. Montero, *El Laboratorio de Electrónica: Descarga Electrostática (ESD)*, Cádiz: Universidad de Cádiz.
- [3] *Electrostatic discharge control handbook for protection of electrical and electronic parts, assemblies and equipment (Excluding electrically initiated explosives devices)*, MIL-HDBK-263B, 1994.
- [4] *Fundamentals of Electrostatic Discharge-An Introduction to ESD*, ESD Association, Rome (NY), 2013.
- [5] *Fundamentals of Electrostatic Discharge-Device Sensitivity and Testing*, ESD Association, Rome (NY), 2013.
- [6] *Test method standard for microcircuits*, MIL-STD-883, 2013.
- [7] *Fundamentals of Electrostatic Discharge-Principles of ESD Control-ESD Control Program Development*, ESD Association, Rome (NY), 2013.
- [8] *Fundamentals of Electrostatic Discharge-Basic ESD Control Procedures and Materials*, ESD Association, Rome (NY), 2014.