

El diseño contra las descargas electrostáticas

Artículo cedido por Cemdal



www.cemdal.com



Autores: Francesc Daura Luna, Ingeniero Industrial. Director de la Consultoría CEMDAL, Representante de Austria Mikro Systeme (AMS AG) para España y Portugal.

www.cemdal.com
fdaura@cemdal.com

La descarga electrostática es un fenómeno natural que se descubrió por primera vez alrededor del año 600 antes de Cristo. La carga electrostática se produce cuando dos materiales de diferentes resistencias dieléctricas, como la lana y el vidrio, se frotan entre sí. Cuando uno de los materiales está suficientemente cargado, puede producirse un arco o chispa hacia otro objeto con una menor resistencia a tierra. La descarga electrostática (ESD) y sus efectos son una de las principales fuentes de interferencias electromagnéticas (EMI) en los equipos electrónicos. La alta frecuencia y la muy alta tensión del impulso de descarga estática pueden dañar o destruir los componentes electrónicos. Una ESD también puede bloquear el correcto funcionamiento de un equipo electrónico. El ancho de banda de una ESD típica puede llegar a 1 GHz. La ESD debida a una persona cargada estáticamente puede llegar a los 35 kV.

Los diseñadores de circuitos integrados (CI) y los diseñadores de equipos electrónicos deben tomar medidas preventivas contra las ESD. Los campos electromagnéticos radiados debidos a las ESD pueden alterar o dañar los equipos o los circuitos adyacentes, sin pasar por los dispositivos de protección en los terminales de entrada de los equipos o las patillas de los CI.

La energía electromagnética de una ESD se propaga por dos rutas: a través de superficies conductoras o por el espacio en forma de energía impulsiva interferente, es decir, a través de las capacidades parásitas en el equipo. La influencia de las ESD se puede reconocer al comprobar que el equipo electrónico funciona erróneamente .o se queda bloqueado al recibir la ESD. Algunas veces, al desaparecer la ESD, el equipo se recupera por sí mismo y sigue funcionando bien y en otras es necesario intervenir manualmente para recuperar su correcto funcionamiento. Otras veces, una ESD causa la destrucción de un componente interno que obliga a su sustitución.

Como portadoras de carga electrostática, las personas representan el mayor peligro para los equipos electrónicos. Los técnicos electrónicos son conscientes del proceso de carga electrostática que tiene lugar mientras se trabaja con componentes semiconductores.

Al desembalar los componentes semiconductores, una persona puede tocar las patillas de los CI y puede causar un daño irreparable. Las interferencias de los equipos electrónicos también pueden ser causadas por descargas electrostáticas.

Las descargas y la generación de interferencias

Cuando dos objetos están en contacto, uno tiende a atraer los electrones del otro, de modo que en cada uno se desarrolla un nivel de tensión de carga diferente. Los objetos acumulan carga por el efecto triboeléctrico o por inducción. El efecto triboeléctrico es un proceso mecánico por el cual se transfiere carga eléctrica debido al movimiento relativo de las superficies en contacto. La transferencia de carga depende de la cantidad de contacto, la suavidad de la superficie, la humedad, la presión de contacto, las propiedades triboeléctricas de los materiales en frotamiento y la velocidad del movimiento relativo. La tensión a la que una persona o un equipo se puede cargar depende en gran medida de su capacidad.

La carga por inducción es el resultado de la exposición de un objeto sin conexión a tierra a un campo electrostático (o campo eléctrico). La diferencia de tensión (o diferencia de potencial) entre dos objetos inducirá una corriente, transfiriendo la carga suficiente para igualar las tensiones. Esta rápida transferencia de carga es una descarga electrostática.

La energía de las EMI asociadas a una ESD puede llegar a tener una frecuencia superior a 1 GHz (usualmente unos 300 MHz), dependiendo del nivel de tensión, la humedad relativa, la velocidad de aproximación y

la forma del objeto cargado. A tales frecuencias, los cables en los equipos o las pistas en las tarjetas de circuito impreso (TCI) se convierten en antenas receptoras bastante eficientes. Por lo tanto, las ESD tienden a inducir altos niveles de EMI en los equipos electrónicos, tanto analógicos como digitales. La distribución espectral de las ESD depende de la forma de onda de la corriente, la geometría del conductor, etc, además de la tensión de carga.

Características de las EMI debidas a las ESD

La acción de las EMI no tiene una relación directa proporcional a la carga de un objeto. Después de una ESD, el campo electromagnético que aparece en la proximidad de la fuente de la ESD, aparece como un fuerte impulso con alto dV/dt con un tiempo muy corto cuando la tensión es relativamente baja, pero se convierte en una oscilación amortiguada de gran duración de tiempo a medida que aumenta la tensión. Hasta una tensión de descarga de unos 6 kV, la gama de EMI se extiende proporcionalmente a la tensión de descarga, pero cuando la tensión de la descarga excede los 10 kV, las EMI disminuyen. La razón por la que las EMI no siempre son proporcionales a la tensión de descarga es porque el tiempo de subida de la corriente de descarga se alarga con el aumento de la separación del arco. Además, el espectro de frecuencias a cierta distancia de separación del arco se concentra en las regiones de baja frecuencia con el aumento de la separación del arco (aumentando la tensión de descarga).

El problema del campo eléctrico en una ESD se puede estudiar analíticamente con un simple modelo de antena dipolo. El arco de una ESD se puede modelar como un dipolo, dependiente del tiempo, situado por encima de un plano de masa infinito. Los campos radiados dependen de dos factores: de la magnitud del transitorio de corriente y del tiempo de subida. Un factor puede ser más

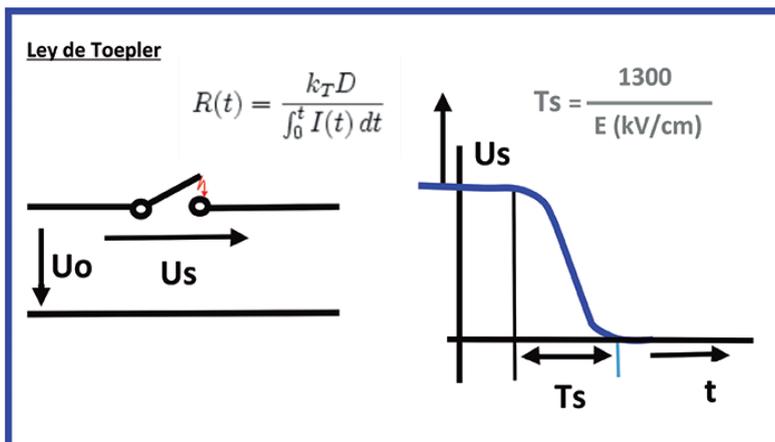


Figura 1. Cerrando un interruptor debido a una descarga electrostática al aire.

dominante que el otro, dependiendo de si el punto de observación se encuentra en la región del campo cercano o del campo lejano del arco de la ESD (Campo cercano: $d < \lambda/2\pi$, Campo lejano: $d > \lambda/2\pi$, siendo λ la longitud de onda de la frecuencia de la EMI y d la distancia entre la ESD y la antena de medida).

Los campos eléctricos tienden a excitar antenas de alta impedancia y circuitos sensibles a la tensión. Por lo tanto, este acoplamiento no deseado se puede reducir manteniendo la impedancia baja de cualquier posible antena receptora. Esto puede mejorar la captación de campos magnéticos ya que los campos magnéticos pueden penetrar los blindajes de baja impedancia con mayor eficacia que los campos eléctricos. También pueden excitar aberturas y ranuras en los blindajes al igual que los campos eléctricos. Los campos magnéticos son los mejor recibidos por las antenas de baja impedancia, especialmente por los bucles de un circuito. Por lo tanto, evitar los bucles puede ser una buena guía de diseño. Pero puede ser difícil lograrlo porque los bucles son a menudo difíciles de reconocer.

El campo magnético cercano (como en el campo eléctrico), depende directamente de la forma de onda de la corriente de la ESD. Por lo tanto, se puede esperar tener altos campos magnéticos asociados con los niveles más altos de corriente. El campo magnético lejano depende de la variación de la corriente con el tiempo (di/dt) como en el caso del campo eléctrico. Por lo tanto, la baja tensión y el tiempo de subida rápido de las ESD causan la mayoría de las

EMI en los equipos cercanos.

El generador de descargas electrostáticas

Las EMI son causadas por los cambios rápidos de tensión y de corriente, como cuando un interruptor provoca una rápida transición desde su estado abierto a su estado cerrado (conducción). Este tipo de evento también puede ocurrir cuando un dedo cargado se acerca a un teclado de ordenador, por ejemplo. Antes de que el dedo toque el teclado, se produce una descarga en el aire.

La ley de Toepler (1906) establece que la resistencia de un arco eléctrico en cualquier momento es inversamente proporcional a la carga que ha circulado a través del arco (Figura 1). En la fórmula, $I(t)$ es la corriente de la descarga de arco en el tiempo t , D es la distancia entre los electrodos y k_T es una constante igual a 4×10^{-3} . En la

misma figura, la fórmula del tiempo de conmutación T_s se deriva de la anterior ley de Toepler y establece que la intensidad del campo presente en el instante del proceso de conmutación determina en gran medida el tiempo efectivo de conmutación. Cuanto mayor sea la intensidad de campo, más corto será el tiempo de conmutación T_s . Las intensidades de campo que se producen antes de la descarga al aire pueden ser muy altas.

Nuestro ejemplo es el de un dedo que se mueve rápidamente hacia un objeto. La medida del tiempo de conmutación de las ESD humanas determina que está en el rango de los 100 ps a 30 ns. La Figura 2 representa las tres secciones del circuito de una ESD: la fuente de la descarga, que es el cuerpo humano; la zona del interruptor, que es la zona de descarga entre el dedo y el equipo bajo prueba (EBP); y la carga que es el EBP. La frecuencia máxima de los transitorios de tensión U_x y de intensidad I_x está determinada por T_s . Por lo tanto, el EBP se ve afectado por la frecuencia más alta definida por T_s .

La carga electrostática humana

El ejemplo más común de una ESD implica a una persona que camina sobre una alfombra sintética. La persona se carga bajo ciertas condiciones. ¿Cómo sucede esto? La pregunta puede ser contestada estudiando como la gente camina sobre una alfombra. La actividad puede ser descrita como un sistema electrónico que consta de cuatro componentes:

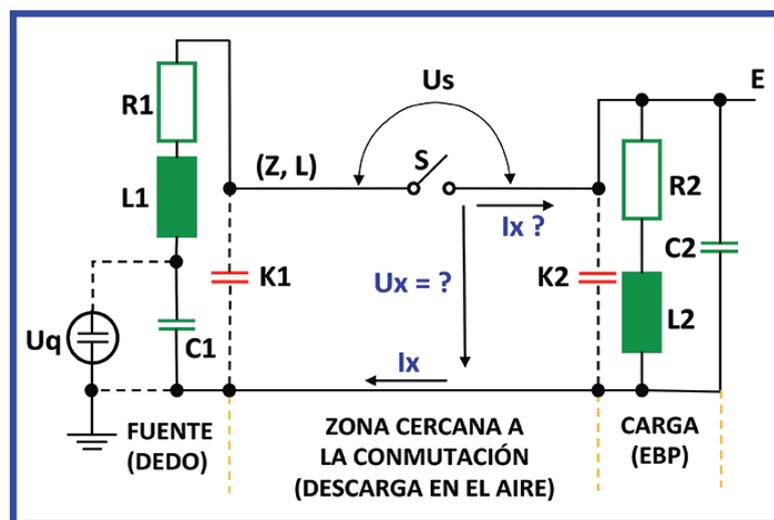
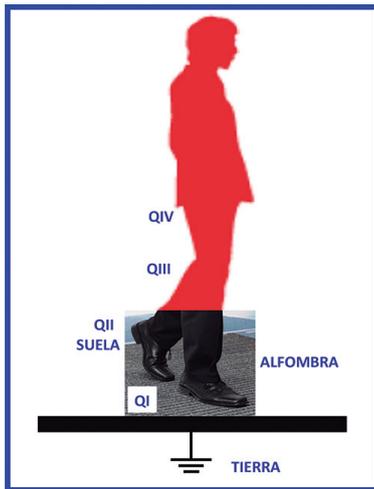


Figura 2. Circuito y propagación de una ESD. EBP: Equipo Bajo Prueba

Figura 3. El proceso de carga del cuerpo humano . QI a QIV: cargas.



- El cuerpo humano, incluyendo las suelas de los zapatos. El cuerpo puede ser considerado como un conductor eléctrico. Normalmente, la resistencia entre dos puntos seleccionados al azar en el cuerpo de una persona está por debajo de los 100 MΩ.
- La suela exterior del zapato, que es un buen aislante. La resistencia de cuero es de aproximadamente 0,1 a 100 GΩ y para la goma es de unos 1000 GΩ.
- La alfombra, que es también bastante buen aislante. Dependiendo del material, una alfombra puede tener varios valores de impedancia.
- Un suelo conductor, conectado a tierra, que se usa como referencia para medir las diferencias de potencial.

Cuando una persona camina por encima de una alfombra, se frota dos materiales diferentes entre ellos y la superficie inferior de la suela del

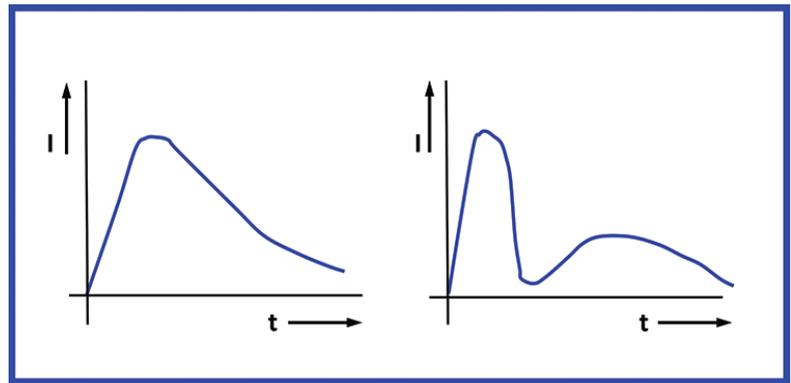


Figura 5. Diferentes formas de onda de la corriente de descarga de una persona.

zapato se carga. Esto está representado por QII en la Figura 3. Esta carga se transfiere hacia el resto del cuerpo (cargas QIII y QIV). Cuando una parte del cuerpo toca un conductor conectado a tierra, parte de la carga se descarga; por ejemplo la carga QIV fluye inmediatamente. Después de varios pasos, una carga de hasta el 10-6 Culombios (o más) puede acumularse en función de la resistencia de los zapatos y de la alfombra. Con una capacidad media de un "sistema" persona / alfombra / tierra de alrededor 10 pF, se puede generar una tensión de 4-5kV (en condiciones de baja humedad de 20% se puede llegar a los 35 kV). Las personas sólo sentimos una descarga cuando el nivel de tensión es de aproximadamente 3 kV o más. En las personas, el proceso de descarga se compone de un número de cargas individuales. La Figura 4 muestra un ejemplo de las tensiones generadas por una persona caminado en una alfombra.

Las ESD generadas por diferentes personas generan diferentes corrientes de descarga. El tiempo de subida

de estas corrientes de descarga se sitúa entre 100 ps y 30 ns. Un análisis de los resultados obtenidos a partir de las mediciones aporta lo siguiente:

- La resistencia de la piel es de aproximadamente 150 Ω.
- La capacidad humana es de aproximadamente 150 pF.
- Típicamente las personas se cargan con tensiones de hasta 15 kV a partir de la amplitud de la corriente y la capacidad humana.

La forma de onda de la descarga puede ser muy diferente de persona a persona y también entre diferentes medidas. Unos ejemplos extremos de forma de onda se muestran en la Figura 5. Se han medido tiempos del entorno de 1 ns a 100 ps en una sola descarga. Se debe tener en cuenta que los impulsos provocados por las ESD sobre equipos pueden diferir de un objeto a otro, debido a que los circuitos de descarga varían bastante (Figura 6). Son posibles capacidades en el rango de los 100 pF hasta varios nF y tensiones relativas entre 1 kV y 300 kV.

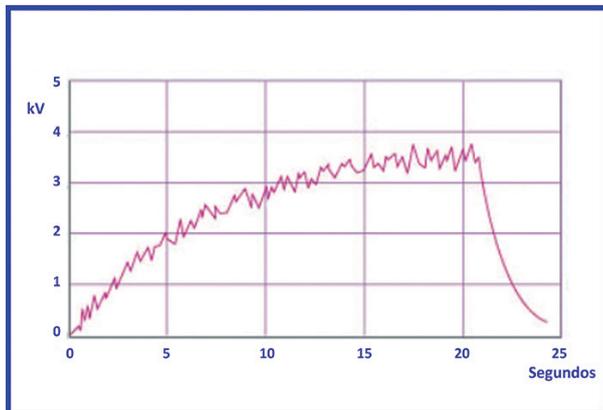


Figura 4. Tensión de carga de una persona caminando por una alfombra.

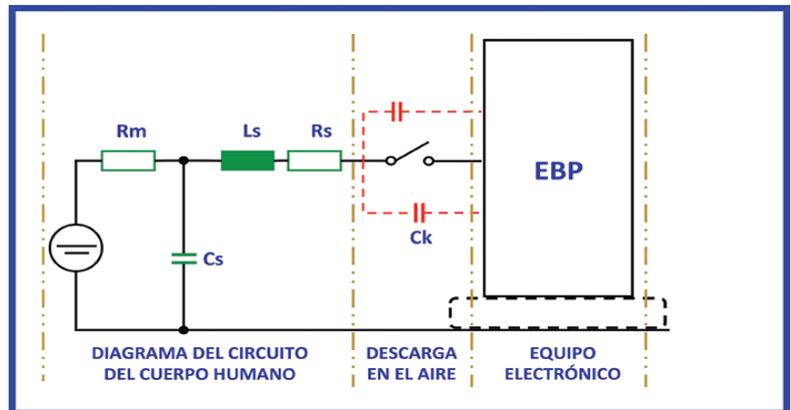


Figura 6. Diagrama del circuito de descarga.

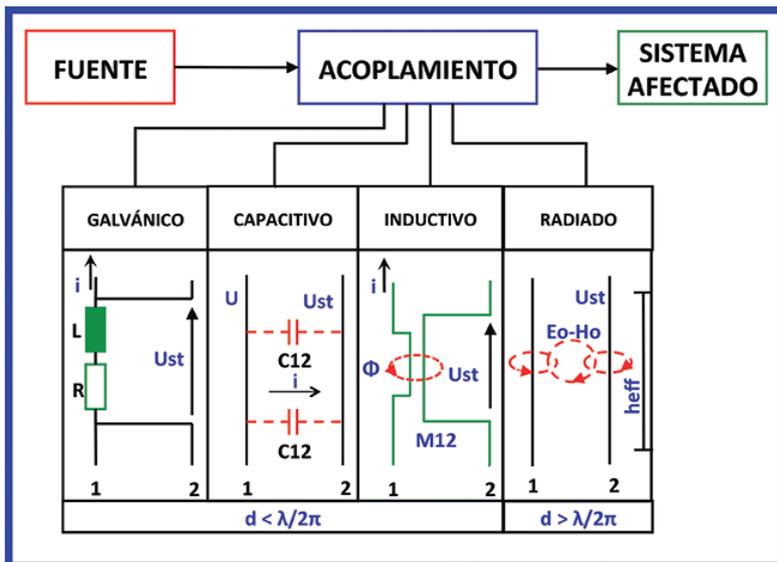


Figura 7. Posibles tipos de caminos de acoplamiento entre dos circuitos.

La resistencia de descarga es de alrededor de 1Ω . El transportador de la carga y el circuito electrónico son a menudo parte de un mismo sistema. Un simple diagrama representativo de un circuito no puede representar adecuadamente a todos los tipos de descargas de los equipos.

Efectos de las ESD en los equipos electrónicos

La Figura 7 ilustra cómo los caminos de acoplamiento transitorios de ESD pueden tener varias configuraciones. La experiencia ha demostrado que cuando se produce una ESD, el colapso del campo eléctrico y la corriente de descarga juegan el papel dominante para dañar el equipo.

Los campos debidos a las corrientes de ESD pueden penetrar en los equipos directamente, o excitar aberturas, costuras, rejillas de ventilación, cables de entrada y salida, y similares, y de circuitos electrónicos internos susceptibles. A medida que las corrientes de descarga circulan por dentro del equipo excitan muchas antenas que encuentran por su camino. La eficiencia de la radiación de estas antenas depende principalmente de su tamaño. Las longitudes de onda de las frecuencias resultantes de una ESD pueden ir desde centímetros a cientos de metros.

En el campo cercano de una ESD, a una distancia de unas pocas decenas de centímetros, el principal tipo

de acoplamiento puede ser capacitivo (campo eléctrico) o inductivo (campo magnético), dependiendo de las impedancias de la fuente de la ESD y de su receptor. En el campo lejano, existe acoplamiento por radiación (campo electromagnético).

El funcionamiento del circuito será incorrecto si las tensiones y / o las corrientes inducidas por las ESD exceden los niveles de señal (exceden el margen de ruido) en el circuito electrónico. En los circuitos de alta impedancia las corrientes tienen baja intensidad y las señales son niveles de tensión. En este caso domina el acoplamiento capacitivo y el principal problema serán las tensiones inducidas. En los circuitos de baja impedancia las señales son corrientes,

por lo que dominará el acoplamiento inductivo y las corrientes inducidas por las ESD provocarán la mayoría de los problemas. Los dos mecanismos principales de destrucción son: el fallo térmico en dispositivos debido al calor creado por la corriente de la ESD y la ruptura dieléctrica debido a las tensiones inducidas por las ESD. Ambos mecanismos de destrucción puede ocurrir en un solo dispositivo. Por ejemplo, la ruptura dieléctrica puede desencadenar un alto flujo de corriente, lo que provocará un fallo térmico.

Dado que las tensiones y las corrientes necesarias para causar destrucción son uno o dos órdenes de magnitud mayores que los valores necesarios para causar mal funcionamiento, la destrucción es más probable cuando hay un acoplamiento por conducción; es decir, el arco debido a la ESD debe hacer conexión directamente con las líneas del circuito. El acoplamiento por radiación normalmente sólo causa mal funcionamiento.

Descripción general de la Norma IEC 61000-4-2

La norma IEC 61000-4-2 es la norma que más se aplica en los equipos electrónicos de tipo doméstico e industrial. Otros sectores como en la automoción, el militar y la aeronáutica usan otras normas más adaptadas a sus necesidades. Por ejemplo: ISO 10605, SAEJ1113, ANSI C63.16, MIL-STD-883 y MIL-STD464.

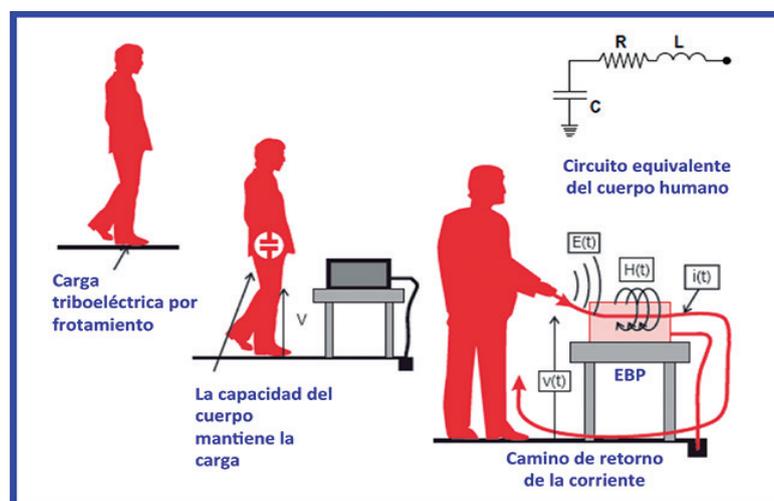


Figura 8. Descarga de una persona cargada sobre el equipo bajo prueba (EBP).

Las pruebas propuestas en la norma IEC 61000-4-2 replican a una persona cargada electrostáticamente descargándose sobre un equipo en un sistema en un entorno no controlado (Figura 8). El propósito de la prueba de nivel del sistema es garantizar que los productos acabados pueden sobrevivir a su operación normal. En general se supone que el usuario del producto no va a tomar ninguna precaución para disminuir el nivel de ESD sobre el producto.

La norma IEC 61000-4-2 define cuatro niveles estándar de protección ESD, usando dos metodologías de prueba diferentes. La descarga por contacto implica la descarga de una ESD directamente desde la pistola de ensayo de ESD tocando el dispositivo bajo prueba. Este es el método preferido de prueba. Sin embargo, la norma prevé una metodología de prueba alternativo conocido como descarga al aire para los casos en los que las pruebas de descarga por contacto no sean posibles. En la prueba de descarga al aire, la pistola de ensayo de ESD se acerca al dispositivo bajo prueba hasta que se produce una descarga. En la norma se definen los niveles de manera que cada nivel se considera equivalente (Figura 9). Así, una descarga por contacto de Nivel 4 de 8 kV se considera equivalente a una descarga al aire de 15 kV.

Protecciones contra las ESD

Hay varias formas de minimizar los efectos de las EMI generadas por las ESD en los equipos electrónicos: prevenir las ESD por completo, pre-

venir el acoplamiento de EMI en los circuitos y aumentar la inmunidad inherente a las EMI en los equipos a través de buenas técnicas de diseño.

Solo es factible la prevención completa de las ESD si el equipo se utiliza en un entorno en el que se pueda controlar las ESD. Pero en los equipos utilizados en cualquier entorno sin control de las ESD, es necesario aplicar técnicas de diseño para mejorar la inmunidad del equipo. Una de las técnicas de diseño más común es incorporar circuitos de protección (varistores, TVS, etc) entre los puntos críticos del equipo tales como las entradas y la conexión a tierra. Estos circuitos se activan sólo cuando la tensión inducida por la ESD excede un límite determinado, proporcionando caminos de baja impedancia alternativos por los que la carga estática puede circular de forma segura hacia tierra. Los circuitos de protección pueden incluir más de un componente para desviar la corriente, con un escalado equilibrado entre velocidad de activación y capacidad de absorción de energía. También son importantes los dispositivos de protección dentro de los CI para evitar su propia destrucción. Con el fin de prevenir el mal funcionamiento del equipo, tal como un bloqueo o una presentación incorrecta de datos, los equipos electrónicos deben tener medidas de protección adicionales.

Reducción de problemas de ESD

Para la reducción de los problemas debidos a las ESD hay varias soluciones que se pueden aplicar en

los equipos electrónicos. El objetivo principal es facilitar que la vía de retorno de cualquier ESD llegue a tierra a través del camino más corto posible. Cualquier parte metálica del equipo debe estar bien conectada a masa y la masa debe conectarse a la tierra de seguridad. Usualmente esto se realiza referenciando las masas y la tierra a la salida negativa de la fuente de alimentación.

Se debe evitar que cualquier ESD atraviese las tarjetas de circuito impreso (TCI) antes de llegar a tierra acortando el camino de descarga a tierra y desviando la corriente de la ESD a tierra justo en el conector de entrada de la señal. Con el filtrado de los cables de E/S con TVS ("Transient-voltage-suppressor") y usando una ferrita y un pequeño condensador (1 a 10 nF) en cada línea y también en la entrada de alimentación, podremos evitar los problemas de ESD en las TCI. La Figura 10 muestra este circuito básico de protección contra las ESD. El circuito de protección no debe afectar a la forma de onda de la señal. La tensión de umbral del TVS debe ser algo mayor que la tensión máxima de la señal para no afectarla. La energía de absorción del TVS puede variar dependiendo de la energía del transitorio a limitar. Para ESD, con TVS de 600W puede ser suficiente. Observar que la corriente debida a la ESD va disminuyendo en cada etapa. La corriente que llega al CI es absorbida por sus propias protecciones internas. Esta protección debe colocarse lo más cerca posible del conector de E/S.

Para facilitar el retorno a tierra de cualquier ESD capturada por los cables de un equipo, tenemos que reducir la inductancia de este retorno al máximo. Para realizar el análisis general de las conexiones de masa y de tierra es conveniente preparar un esquema de la arquitectura general de estas conexiones de masa y tierra para poner en evidencia como deseamos que estas conexiones queden diseñadas. Es el diseñador quien debe asegurar la definición de los caminos de retorno de las ESD a masa y finalmente a tierra.

Como ayuda al comportamiento general del equipo contra las ESD también es aconsejable procurar una baja impedancia de los planos de masa de las TCI. Debemos evitar el

DESCARGA POR CONTACTO		DESCARGA AL AIRE	
NIVEL	Tensión [kV]	NIVEL	Tensión [kV]
1	2	1	2
2	4	2	4
3	6	3	8
4	8	4	15
X	Especial	X	Especial

Figura 9. Niveles de prueba de ESD según la norma IEC 61000-4-2. El nivel X tiene que ser determinado en la especificación del equipo.

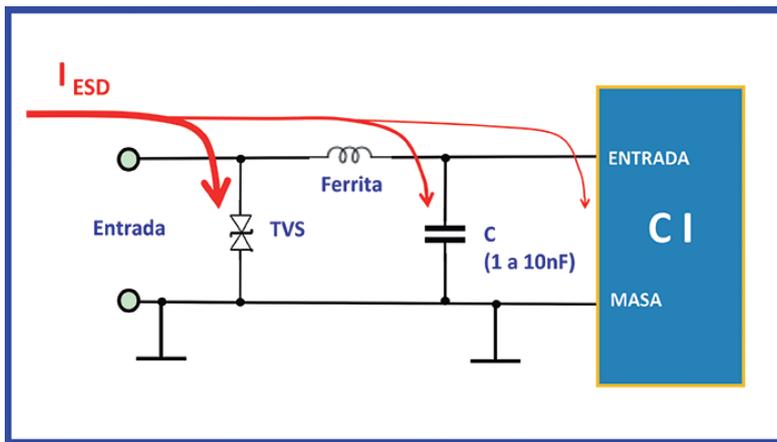


Figura 10. Protección contra las ESD con un TVS, una ferrita y un condensador. La corriente debida a la ESD va disminuyendo en cada etapa. La corriente que llega al circuito integrado es absorbida por sus propias protecciones internas. Ferrita con 200Ω impedancia en el intervalo de 50 MHz a 1 GHz.

uso de TCI de 2 capas y como mínimo usar 4 capas. Cuando el plano de masa queda muy agujereado por las vías necesarias cuando tenemos una alta densidad de componentes, es aconsejable aumentar el número de capas para añadir más planos de masa para así reducir su impedancia. Ello aumenta la inmunidad general de la TCI.

Otro aspecto que ayuda contra las ESD es asegurar que todas las uniones necesarias para configurar el chasis metálico del equipo completo tengan buena conductividad, pudiendo ser necesario el aumentar del número de elementos de fijación (tornillos, remaches, juntas). Esto ayuda a que las ESD circulen rápidamente a tierra evitando su paso a través de las TCI.

Otro aspecto a considerar es el fortalecimiento de los circuitos sensibles, tales como las patillas de "reset" (reinicio), interrupciones y entradas de control críticos. No debemos dejar ninguna patilla de los CI al aire. Todas las patillas de entrada no usadas las debemos conectar a masa o a positivo según convenga por su lógica de actuación. En las salidas conectadas a un cable que sale de la TCI, se puede añadir una resistencia de bajo valor de 10 a 100 Ω.

Por último, el firmware en el microcontrolador puede ayudar a garantizar el buen funcionamiento del equipo si es capaz de detectar y corregir errores de la siguiente manera:

- En el flujo del programa: tenemos que repetir la rutina de inicialización de los periféricos y puertos de

E/S del microcontrolador dentro de nuestro principal ciclo de programa, para evitar que sus funciones cambien durante la ejecución del programa debido a las ESD.

- Entradas y salidas de datos: Al igual que antes, tenemos que repetir su rutina de inicialización varias veces, si el ciclo principal es largo en tiempo. Tal vez 1, 2 o 3 veces dentro del ciclo principal.
- Comprobar que en todas las entradas los valores recogidos son razonables para nuestra aplicación. Algunos códigos recibidos podrían ser claramente erróneos. Si se detecta un error, se debe provocar un "reset" blando (reinicio por software).

- Memoria RAM / EEPROM (datos): todas las posiciones no utilizadas deben ser inicializadas con 00H. Memoria FLASH (programa): todas las posiciones no utilizadas debe ser inicializados con 00H o con instrucciones RET o NOP.
- En las comunicaciones, comprobar la paridad, la estructura y hacer una "checksum" (suma de comprobación). Si se detecta un error, hacer un "reset" blando (reinicio por software).
- Utilizar el circuito de perro guardián (vigilancia) ("watch-dog") interno en el microcontrolador. Si se desea aumentar la protección puede ser conveniente añadir un segundo circuito "perro guardián" externo con un tiempo algo mayor al tiempo asignado al interno.

Conclusiones

Las ESD pueden destruir componentes y generar interferencias electromagnéticas que pueden provocar mal funcionamiento y bloqueos en los equipos electrónicos. En el diseño de un nuevo equipo, se debe considerar que debe cumplir con la normativa y consecuentemente aplicar las protecciones necesarias. La norma más utilizada es la IEC 61000-4-2. Se deben proteger todas las líneas de E/S y configurar una buena arquitectura de conexionado de masas y tierra. El firmware adecuado también puede ayudar a mejorar la inmunidad contra ESD. ☑

REFERENCIAS

- Michel Mardiguian, "Electrostatic discharge, Understand, Simulate and Fix ESD Problems", *Interference Control Technologies*, 1986
- J.Balcells / F.Daura / R.Pallàs / R.Esparza, *Interferencias Electromagnéticas en Sistemas Electrónicos*, Boixareu Editores, 1992.
- Henry W. Ott, *Electromagnetic Compatibility engineering*, 2009, John Wiley & Sons
- Tarak Nah Bhar, "Electrostatic Discharge (Esd) Generated Electromagnetic Interference (EMI)", *ITEM1990*
- Martin Lutz, Leo P. Makowsky, "How to Determine Equipment Immunity to ESD", *ITEM 1993*
- Neils Jonassen, "Charging by Walking", *InCompliance Magazine*, 2103

