

COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA EN EL DISEÑO DE DISPOSITIVOS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS DE SATÉLITES

Julio Molina
jmolina@abae.gob.ve

RESUMEN: Este documento proporciona criterios fundamentales de compatibilidad electromagnética para el diseño y materialización de satélites, que permitirán evaluar los puntos claves, tolerancias y materiales a considerar durante el diseño preliminar del satélite. Se evaluaron diferentes publicaciones y textos los cuales suministraron los diferentes conceptos y contenidos plasmados en la publicación. Además se explican varios problemas típicos en conjunto con las soluciones a los mismos acerca de emisiones irradiadas y conducidas y de susceptibilidad irradiada y conducida. Junto a algunos ejemplos de los diferentes esquemas de puesta de tierra que son comunes en satélites.

PALABRAS CLAVE: *Compatibilidad electromagnética (EMC), emisión conducida, susceptibilidad conducida, emisión irradiada, susceptibilidad irradiada, descarga electrostática (ESD).*

ABSTRACT: This document provide the EMC basic criteria for the design and assembly of satellites, this criteria will allow to evaluate the key points, tolerances and materials to consider during the pre-design phase of the satellite. Reading several publications and text books that provided different definitions and contents printed on this publication. Also several typical problems are explained together with the solutions to them about radiated and conducted emissions; and susceptibility radiated and conducted. Together with some examples of the different laying grounding schemes that is common in satellites

KEYWORDS: Electromagnetic compatibility (EMC), conducted emission, conducted susceptibility, radiated emissions, radiated susceptibility, electrostatic discharge (ESD).

1 INTRODUCCIÓN

La compatibilidad electromagnética (EMC por sus siglas en inglés); es la característica de un equipo o sistema de funcionar satisfactoriamente dentro de su entorno electromagnético sin introducir perturbaciones electromagnéticas intolerables a ningún otro equipo o sistema.

En equipos y sistemas espaciales se requiere no causar interferencias a nivel de intersistemas, evitando la susceptibilidad por emisiones generadas desde otros

subsistemas, equipos o ambientes electromagnéticos. Es también esencial que no exista ninguna interferencia a nivel de intrasistema o el equipo en sí mismo, ya que se podría decir que un equipo es un sistema compuesto por diferentes elementos cuya operación podría originar un caos electromagnético en el ambiente en el cual funciona.

Los primeros indicios de problemas de compatibilidad electromagnética datan de principios del siglo XX, con el uso de radios domésticos los cuales eran sensibles a motores eléctricos conectados a la misma línea de energía eléctrica.

A medida que la tecnología ha progresado y mejorado, haciendo más complejos y más pequeños los equipos electrónicos en sus diversas variantes funcionales: comunicaciones, robótica, biomedicina sensores y sistemas espaciales tales como satélites y transbordadores, más problemas de compatibilidad electromagnética son expuestos. Con esta gran preocupación fue necesario el desarrollo de diversas normas militares y comerciales y recomendaciones que establecieran una pauta a seguir durante el diseño de nuevas tecnologías.

En la actualidad es obligatorio seguir y cumplir con los estándares nacionales e internacionales de compatibilidad electromagnética al momento de diseñar cualquier equipo eléctrico, electrónico y electromecánico para uso, comercial, militar o científico.

En la República Bolivariana de Venezuela [1], existen instituciones que consolidan y han estipulado las normas y reglamentos asociadas al área electromagnética, entre las cuales tenemos, COVENIN, CONATEL y actualmente Fundación Instituto de Ingeniería (FII), la cual además se ha destacado por desarrollar laboratorios cuyo objetivo es garantizar los estándares adecuados a las necesidades de la industria tecnológica del país.

Actualmente con la creación de Centro de Investigación y Desarrollo Espacial (CIDE), se incluye un laboratorio de EMC que permitirá realizar los ensayos pertinentes a los satélites a ser diseñados y ensamblados, verificando que los estándares y requerimientos de diseño de sistemas espaciales sean cumplidos.

2 EJEMPLOS DE PROBLEMAS DE EMC

En condiciones domésticas y/o civiles hay gran mayoría de experiencias con problemas de interferencia electromagnética, ya sea por telefonía móvil, recepción de TV, líneas de alta tensión, etc. Todos estos problemas derivan del mal funcionamiento o mal uso de los equipos.

Los problemas de EMC en sistemas espaciales son muy escasos, debido a que en los centro de diseño y manufactura se toma en consideración y con mucho cuidado todas las tolerancias especificadas en la diferentes normas y regulaciones. Los problemas de ESD son prevenidos tomando en cuenta una puesta a tierra.

3 ESPECIFICACIONES DE EMC

Los requerimientos de diseño de EMC para cada sistema espacial derivan y dependen del tipo de misión a ejecutar. Por ejemplo una carga útil que esté compuesta por un magnetómetro muy sensible, que será usado para medir el campo magnético ambiental de un planeta, tiene como limitaciones el uso de magnetos o material magnético permeable en el ensamblaje o integración de su estructura[2].

Los métodos de prueba para hacer cumplir las especificaciones de diseño, están explícitos en la norma militar DoD MIL-STD-461 y ECSS-E-ST-20-07C de la Agencia Espacial Europea (ESA). La cual establece los límites y tolerancias para los ensayos equipos eléctricos, electrónicos y electromecánicos, sistemas y subsistemas. Además de especificar los arreglos y configuraciones, técnicas utilizadas para la medición, adquisición de los datos y resultados.

A continuación se representan los diferentes fenómenos encontrados en área del estudio de compatibilidad electromagnética:

3.1 COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA (EMC)

El término de *Compatibilidad Electromagnética* o EMC engloba cuatro categorías o áreas del electromagnetismo, las cuales se clasifican según:

- Emisión Irradiada (RE)
- Emisión Conducida (CE)
- Susceptibilidad Irradiada (RS)
- Susceptibilidad Conducida (CS)

3.2 INTERFERENCIA ELECTROMAGNÉTICA (EMI)

La *Interferencia Electromagnética* o EMI (por sus siglas en inglés), son las emisiones desde un dispositivo o sistema que interfieren con la operación normal de otros dispositivos o sistemas.

3.3 INTERFERENCIA DE RADIO FRECUENCIA (RFI)

Interferencia de Radio Frecuencia o RFI, es una terminología de EMI que especifica los campo eléctricos de Radio Frecuencia (RF), que comprenden la banda de 3 kHz hasta 3000 GHz.

En la Tabla 1 se describe la clasificación de las diferente bandas de frecuencias.

Tabla 1: Espectro de Radio Frecuencias

Símbolo	Descripción	Frecuencias
VLF	Very Low Frequency	3 a 30 kHz
LF	Low Frequency	30 a 300 kHz
MF	Medium Frequency	300 a 3000 kHz
HF	High Frequency	3 a 30 MHz
VHF	Very High Frequency	30 a 300 MHz
UHF	Ultra High Frequency	300 a 3000 MHz
SHF	Super High Frequency	3 a 30 GHz
EHF	Extremely High Frequency	30 a 300 GHz
THF / THz	Terahertz Frequency	300 a 3000 GHz

3.4 DESCARGA ELECTROSTÁTICA (ESD)

La *Descarga Electrostática* o ESD es el elemento de mayor ocurrencia en el ámbito de la electricidad y electrónica. Es causado cuando dos o equipos o sistemas que tienen cargas electrostáticas a diferente potencial se acercan o hacen contacto. Se pueden generar dos efectos cuando el ESD ocurre:

1. El efecto de la descarga por medio de una chispa, que genera una irradiación eléctrica y campos magnéticos.
2. Y el efecto de una descarga de corriente conducida a través del equipo o sistema. Esta descarga puede alcanzar hasta cientos o incluso miles de amperes fluyendo en el punto del ESD en un corto periodo.

3.5 PULSO ELECTROMAGNÉTICO (EMP)

Pulso Electromagnético EMP, es una intensa onda electromagnética, producida por una detonación nuclear. Se caracteriza por la ocurrencia de campos eléctricos y magnéticos extremos en muy cortos periodos.

Su primera incidencia fue conocida en 1943 cuando los equipos electrónicos para el monitoreo de las primeras explosiones atómicas fueron destruidos por el EMP generado.

4 FUNDAMENTOS DE EMC

A continuación se describe los fundamentos, bases y consideraciones en el área de compatibilidad electromagnética.

4.1 PROBLEMAS BÁSICOS DE EMC

Los aspectos en común de los problemas de EMC coinciden en [3]:

1. Una fuente que produce emisiones.
2. Un receptor que recibe emisiones.
3. Un medio de transferencia o transporte entre el transmisor y el receptor.

Aislado los problemas fundamentales de EMC, se puede definir que la interferencia ocurre cuando la señal recibida causa una mal función en el receptor de igual manera.

4.2 EJEMPLOS DE SOLUCIONES

1. El primer paso a seguir es claramente la reducción de la emisión del transmisor, debido a que siempre se toma como la causa del problema, sin embargo en algunos casos no es posible hacerlo.
 - (a) Citando un ejemplo la comunicación de un satélite con la estación terrena; tenemos que la principal función de un transmisor de telemetría es generar una señal de radio frecuencia (RF), y enviarla a la Tierra por medio de la antena del satélite. La potencia de transmisión está sujeta a el presupuesto del enlace, las operaciones del satélite y los sistemas terrenos. Por lo tanto la solución de modificar las emisiones de RF no son viables.
 - (b) En cambio la Unidad de Distribución de Potencia (PDU) que posee un convertidor DC/DC, que se encarga de regular y distribuir las demandas de tensión de los subsistemas. Emite RF en su operación regular, entonces sería una medida tratar de reducir las

emisiones desde PDU, incluso si el re diseño lo hacen ligeramente menos eficiente.

2. Como una segunda solución común se puede considerar modificar el medio de acoplamiento entre el transmisor y el receptor, simplemente aumentando la distancia entre ellos físicamente, resolviendo el problema efectivamente en muchos casos.
 - (a) Un ejemplo de esta solución se materializó con el satélite *Ulysses*, cuya carga útil era un magnetómetro encargado de medir el ambiente magnético alrededor de las regiones polares del Sol. El sensor fue montado en un mástil a 5,6 m del cuerpo de la satélite para evitar la interferencia magnética.
3. Finalmente como tercera solución, se podría hacer al receptor inmune o menos susceptible a la interferencia del transmisor, siendo esto casi siempre posible.
 - (a) Como ejemplo de esto hay filtros en las interfaces de las unidades electrónicas de la nave espacial para eliminar la interferencia conducida por medio de los pulsos y las señales de potencia del cableado.

4.3 CONSIDERACIONES DE EMC

Como bondad importante, los requerimientos de EMC deben ser tomados en cuenta como una parte integral desde la fase de concepto, especificaciones generales, diseño, manufactura y fases de pruebas de cualquier sistema espacial .

Los puntos críticos de EMC, deben ser adoptados desde el momento que los requerimientos de la misión son definidos y especificados.

De igual manera tal y como se administran los presupuesto del Suministro Eléctrico de Potencia (EPS), y están atados a la demanda de cada subsistema del satélite como por ejemplo el Sistema de Control de Órbita y Posicionamiento (AOCS). Este presupuesto de consumo esta ligado al desempeño de todo el sistema en cuanto a EMC se refiere.

4.4 LÍMITES DE DE SEGURIDAD DE EMC

Estos límites son definidos según la diferencia entre los sistemas de susceptibilidad y los sistemas de emisión [4].

Por ejemplo los dispositivos electrónicos deben operar satisfactoriamente ante las transmisiones de RF de telemetría de las antenas del satélite enviadas a la tierra.

Para ello el diseñador del subsistema ha de haber calculado el peor caso del campo eléctrico de emisión desde el transmisor a cualquier punto del satélite a un valor 1 V/m. Sin embargo, en la especificaciones de susceptibilidad para otros dispositivos electrónicos el diseñador deberá imponer un requerimiento tal que las unidades no sean susceptibles a campos eléctricos de 10 V/m. Entonces tenemos que un margen de seguridad de 20 dB (x10) entre las especificaciones de emisión y susceptibilidad .

Este margen se reflejará de la siguiente manera;

1. Cálculos inciertos por parte del diseñador,
2. Que quizás son muchas las fuentes de interferencia desde muchos equipos a nivel de sistemas,
3. Un subsistema o equipo con con una mala o crítica operación.

Generalmente, el valor del límite entre la susceptibilidad y la emisión es de al menos 6 dB (x2), pero podría ser el caso de 20 dB, para la garantizar la seguridad en sistemas críticos tales como mecanismos de despliegue pirotécnicos como por ejemplo el arreglo solar (Solar Array).

5 CATEGORÍAS DE EMC

Anteriormente ya se había comentado acerca de que en EMC se puede enmarcar en dos principales áreas "Irradiación" y "Conductividad", cada área se despliegan en "Emisión" y "Susceptibilidad" [3] y [4].

A su vez está división se sigue ramificando, apuntando a los diferentes elementos que generan los efectos de emisión y aquellas unidades las cuales son afectadas por susceptibilidad, en la Figura 1 se puede mostrar la estructuración de las categorías.

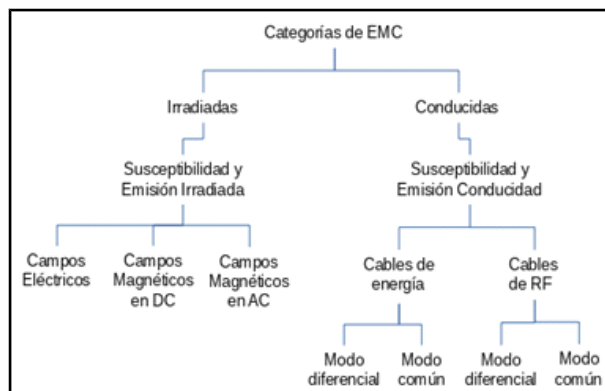


Figura 1: Categorías de EMC

5.1 EMISIONES IRRADIADAS (RE)

Las emisiones irradiadas son campos eléctricos y magnéticos en AC y DC, los cuales son emitidos desde las unidades de los subsistemas; o desde los conectores de los cables que conectan los subsistemas [5].

5.1.1 CAMPOS ELÉCTRICOS

Son ondas de radios generadas por transmisores RF o señales irradiadas desde los cables de los dispositivos electrónicos y los terminales asociados a las antenas como las guías de onda. Estos campos forman una irradiación RF senoidal en voltios por metro (V/m) sobre un rango de frecuencia de 3 kHz a 3000 GHz. Sin embargo en la mayoría de los sistemas espaciales solo se opera en un rango de frecuencia de 15 kHz a 30 GHz.

Las emisiones de RF son medidas en analizador de espectros usando una amplia diversidad de antenas para recoger u absorber las emisiones. El equipo bajo prueba y las antenas de prueba han de estar en un recinto blindado conocido como una cámara anecoica para, para evitar la reflexión e interferencia externa de señales de RF.

Soluciones o mitigación de los campos eléctricos [6]:

1. Implementar una puesta a tierra par el equipo o subsistema bajo prueba.
2. Seleccionar las tecnologías analógicas y digitales más lentas en cuanto a frecuencia de operación se refiere, que cubran los requerimientos de la misión. Particularmente sobre las interfaces de los circuitos entre los subsistemas y dispositivos electrónicos.
3. Establecer un blindaje efectivo de todo el cableado, terminales y conectores entre ambos dispositivos o unidades. Esto puede ser hecho colocando cables apantallados y de conectores con cubierta o protección tales como: cables coaxiales, cables trenzados, blindaje totalmente trenzado y colocarlos como un bulto de cables, en la Figura 2 se muestran algunos ejemplos de estos tipos de cables.
4. Realizar un blindaje efectivo y puesta a tierra de todos los dispositivos electrónicos haciendo un encapsulado en chasis metálicos. La apertura de agujeros en el chasis deberían ser minimizadas, y los hoyos de los tornillos de apertura del chasis deberían estar lo más cerca posible.
5. Los paneles o partes de metal que van pegados o acoplados, deberían tener por lo

mínimo 10 mΩ de resistencia entre las partes que los unen.



Figura 2: Cables con blindaje trenzado

5.1.2 CAMPOS MAGNÉTICOS EN DC

Son campos magnéticos en DC continuos, que usualmente son medidos en pT (Pico Tesla) hasta 1 m de distancia. Estos no varían con el tiempo y son producidos por unos magnetos permanentes o corrientes DC fluyendo en cualquier circuito. Su magnitud es importante, y debería ser minimizada en misiones científicas cuya carga útil dependa de magnetómetros.

Mitigación de Campos Magnéticos en DC:

1. Minimizando el uso de materiales ferromagnéticos y con permeabilidad magnética.
2. Reduciendo la corriente DC y minimizando el área de circuito cerrado en las cuales fluye.

Estas soluciones son de difícil implementación debido al uso de; transformadores, inductores, relés y material ferromagnético. En algunos casos el uso de aleación de material tipo "Mu-Metal" conlleva a la solución en aplicaciones críticas. En otros casos generalmente se envuelve la unidad o dispositivo con una bobina en que produce una densidad de flujo magnético AC, reduciendo el campo hasta cero.

5.1.3 CAMPOS MAGNÉTICOS EN AC O CAMPOS B

Estos son campos magnéticos variante en el tiempo (AC) y que son producidos por circuitos inductivos tales como transformadores, inductores y cables o circuitos en los cuales fluye la corriente alterna. Estos son medidos igualmente en pT (Pico Tesla) hasta 1 m de distancia. Los campos magnéticos son mayormente establecidos en el rango de frecuencia de 50 Hz hasta 100 kHz. Por encima de los 100 kHz, lo

campos eléctricos tienden a ser más importantes que los campos magnéticos.

Métodos de reducción de los campos magnéticos en AC:

- Reduciendo la magnitud de la corriente AC en los equipos.
- Reduciendo el área de circuito cerrado alrededor de donde fluye la corriente AC.
- El apantallamiento magnético con materiales Mu-metal, puede algunas veces ser efectivo, pero solo a frecuencias menores a un 1 kHz.
- Debido a que el campo magnético tiende a ser muy direccional, simplemente se puede mover o rotar la fuente de la interferencia.

5.2 SUSCEPTIBILIDAD IRRADIADA (RS)

Las unidades, dispositivos o subsistemas pueden causar una mal función o ser susceptible a la presencia de irradiaciones de campos eléctricos o magnéticos en AC o en DC .

Esos campos y señales externas pueden ser captadas sobre las conexiones y el cableado entre subsistemas o incluso en el cableado interno de las unidades electrónicas. Estas señales inducidas pueden producir señales conducidas en los dispositivos o cables que pueden causar que la funcionalidad de los circuitos fallen momentáneamente. Incluso hay casos extremos donde las interfaces eléctricas pueden ser permanentemente dañadas.

Las pruebas de susceptibilidad son lo totalmente inverso a las pruebas de emisión. Los generadores de señales, como lo muestra la se utilizan para realizar un barrido sobre el rango de frecuencias requerido, esto aunado a la variedad de antenas que se usan en las pruebas para irradiar el equipo bajo prueba (EUT por sus siglas en inglés), o el sistema espacial a probar. Es una prioridad medir el campo eléctrico del EUT, y luego el equipo debe ser conmutado a su modo más sensible para detectar cualquier susceptibilidad.

5.3 EMISIONES CONDUCCIDAS (CE)

Son generalmente divididas en emisiones desde la línea de potencia y emisiones desde la línea de señales, y además se categorizan en señales de *Modo Diferencial* o *Modo Común* tal como se muestra en la Figura 1.

Los circuitos y componentes ruidosos dentro del subsistema pueden causar emisiones conducidas presentes en ambas líneas de energía del satélite. Estas emisiones pueden además ser conducidas a través del

chasis y el encapsulado entre el cableado de las unidades.

El monitoreo de las señales conducidas se puede hacer directamente a través de sensores de tensión o corriente, mostrando los resultados por medio de una osciloscopio o un analizador de espectros.

La diferencia entre el *Modo Diferencial* y el *Modo Común*, es ejemplificada en la Figura 3. Donde una señal es enviada desde el emisor del subsistema 1 pasando por un medio y recibida por el subsistema 2.

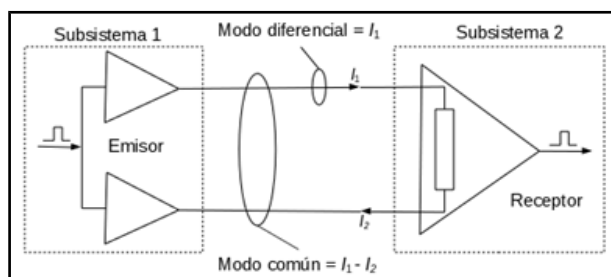


Figura 3: Señales en modo común y diferencial

Las señales analógicas y digitales son transmitidas entre los subsistemas sobre dos cables, sin embargo hay una interfaz en común presente que es igualmente inducida sobre ambos cables como se puede visualizar en la Figura 3. Este término se denomina *ruido de modo común*. La señal enviada sobre un cable es diseñada para ser complementaria a la otra, es como por ejemplo el envío de una señal digital o "1" lógico, viajando por una línea mientras que el "0" lógico se transmite por la segunda línea.

Siguiendo la Figura 3, el *diferencial de corriente* puede ser medido usando una pinza amperimétrica alrededor de la línea con corriente de I_1 o I_2 . La *corriente de modo común*, es medido con una pinza amperimétrica alrededor de ambos cables, con ello equivale a simple suma algebraica de ambas corrientes ($I_1 - I_2$).

Si habláramos en términos de tensión (V) aplican los mismos métodos de medición en tanto en *modo común* como en *modo diferencial*.

5.4 SUSCEPTIBILIDAD CONDUCTIDA (CS)

Las unidades o subsistemas pueden causar una mala operación o ser susceptibles a la presencia de señales conducidas sobre la estructura o en el cableado del satélite.

Estas señales externas pueden aplicar o generar picos de tensión o corriente que son inyectados

directamente en el cableado entre los subsistemas o directamente sobre los pines de conexión entre los diferentes dispositivos. Además estas señales pueden causar una mal función del subsistema, que se solventa con un simple reinicio; pero en casos extremos las diversas interfaces eléctricas llegan a dañarse completamente.

Las pruebas de susceptibilidad conducida son todo lo inverso contrario a las prueba de emisión conducida. Los generadores de señal, lo cuales son usados para hacer el barrido de frecuencias, son usados como fuente o emisores de señal.

Estas señales son amplificadas mediante pinzas amperimétricas, amplificadores y transformadores conectadas directamente al equipo o satélite bajo prueba. Las señales aplicadas son generalmente medidas con un osciloscopio antes de que el equipo este encendido y operativo, en su modo mas sensible para detectar cualquier susceptibilidad.

6 DESCARGA ELECTROSTÁTICA (ESD)

Al igual que las emisiones y susceptibilidad, está categorizado en dos áreas: irradiadas y conducidas. Los efectos que generan el ESD se pueden caracterizar de la siguiente manera:

1. Cuando un ESD se genera, siempre hay una "chispa", por ejemplo, relámpagos. La descarga de la chispa ocurre entre dos partes del satélite; por ejemplo como el cuerpo humano con la perilla de la puerta.
2. El efecto de esta chispa puede generar una muy grande pero de extrema corta duración, explosión de emisiones irradiadas magnéticas y eléctricas sobre un gran ancho de banda de frecuencias. Esto es fácilmente comprobable escuchando un radio y sintonizándolo en las diferentes frecuencias, durante un tormenta eléctrica. Si cualquier equipo o cableado están cerca de la descarga de la chispa, los campos generados inducirán corrientes y tensiones en los cables de los equipos o dispositivos.

La importancia para evitar el ESD ha progresado significativamente junto con el auge de los nuevos componentes eléctricos y electrónicos. Los tubos de vacío tenía una extrema inmunidad a los ESD, sin embargo la nueva tecnología como los semiconductores es muy sensible a este efecto.

Descargas de hasta 3,5 kV pueden ocurrir desde los dedos de un ingeniero, y son de tan corta duración que no pueden ser sentidos ni vistos. Sin embargo estas descargas fácilmente pueden destruir semiconductores,

las cuales son susceptibles a tensiones tan menores como 50 V.

7 SOFTWARE DE PRUEBAS DE EMC

Las pruebas de EMC deben ser realizadas en un recinto blindado compuesto por una jaula de Faraday, en su exterior y en su interior por material absorbente de poliuretano, este recinto es mejor conocido como cámara anecoica. La cámara anecoica tiene como función principal evitar la interferencia externa de señales de radio frecuencia, garantizando la fuga y reflexión de las señales emitidas desde el interior durante las pruebas de EMC.

Dichas pruebas realizadas con antenas y equipos de medición y de adquisición de datos, pueden ser controlados desde un cuarto de control por medio de un software de prueba conocido como EMC32 propietario de Rohde & Schwarz. Dicho software también puede ser usado para simular algunas pruebas antes de ser montadas y configuradas.

Otro simulador importante de EMC es EMCoS, el cual es además una herramienta de Diseño Asistido por Ordenador (CAD), que permite diseñar e importar modelos electrónicos, eléctricos y electromecánicos; simular un ambiente electromagnético, analizar y visualizar los resultados de las pruebas de EMC.

8 ESQUEMAS DE PUESTA A TIERRA

Hay puntos críticos o preguntas que deben ser establecido durante la fase inicial de diseño de cualquier satélite[2] y [7].

- ¿Qué tipos de de señales digitales o analógicas conmutan entre los subsistemas del satélite, entre subsistemas y la carga útil, y cuál es la tasa de transmisión de datos y los requerimientos de ancho de banda para esas señales?.
- ¿Cuánta potencia es suministrada al satélite por el subsistema de potencia a las diferentes partes del satélite y de la carga útil y qué forma?. Por ejemplo, hay suministros directos y niveles principales de tensión en formas reguladas y no reguladas, o convertidas y reguladas, o suministradas y distribuidas a niveles de tensión bajos y altos.

El esquema de puesta a tierra de un satélite define como todas las señales digitales, analógicas y de energía son distribuidas y sobre un punto o puntos de referencia del satélite. Usualmente es llamado "tierra" o "común" .

Hay tres esquemas de puesta a tierra comunes usados en satélites:

- Esquema de puesta a tierra de punto-único (SPG).
- Esquema de puesta a tierra multipunto (MPG).
- Esquema híbrido SPG/MPG.

8.1 ESQUEMA DE PUESTA A TIERRA DE PUNTO-ÚNICO SPG

Un ejemplo de un esquema SPG, se muestra en la Figura 4, donde define la relación entre dos subsistemas por medio de un solo punto común de referencia a tierra.

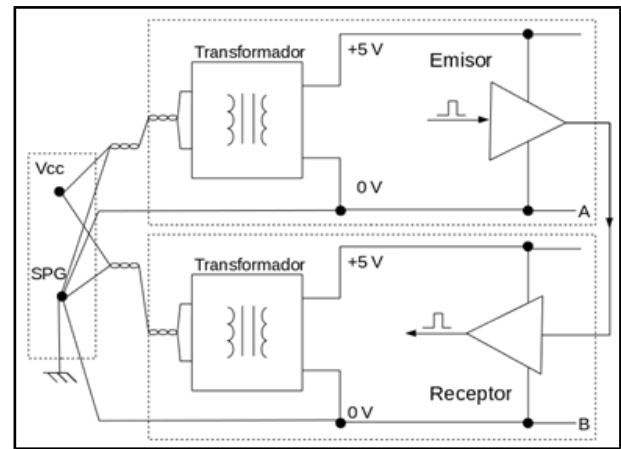


Figura 4: Esquema SPG

8.2 ESQUEMA DE PUESTA A TIERRA MULTIPUNTO SPG

En un esquema MPG todo el cableado de señales y de potencia retorna a un plano de tierra común. Este plano de tierra tiene muy baja inductancia entre dos puntos cualesquiera de la superficie y de las corrientes que fluyen, incluso a frecuencias muy altas, no producirá ruido significativo por encima del potencial de tierra en cualquier parte de este plano.

El plano de tierra es un conductor plano, delgado y ancho, preferiblemente hecho de cobre niquelado. Sin embargo podría de cualquier material o superficie conductiva, como el del panel de aluminio utilizado para muchas plataformas de satélites.

Pueden haber mucho planos de tierra en los diferentes subsistemas del satélite, solo hay que tener mucho cuidado de no cruzar, los subsistema de baja potencia que manejan pocos mili-amperios con los de alta potencia tales como los transformadores DC.

8.3 ESQUEMA DE PUESTA A TIERRA HÍBRIDO SPG/MPG

Es muy común en cualquier satélite adaptar un esquema de puesta a tierra híbrido, para tomar ventaja de las bondades de ambas configuraciones. Por ejemplo, una estrategia típica aplicando el esquema MPG sería separar las señales digitales de baja corriente por diferentes planos. Y las señales analógicas de alta potencia conducirías por un esquema SPG.

Esto da una gran ventaja para el desempeño óptimo de los subsistemas, creando un eficaz aislamiento y eliminación de los lazos de puesta a tierra para los subsistemas de alta frecuencias y el cableado de los sistema de potencia usando el esquema SPG. En la Figura 5 se muestra un ejemplo del esquema híbrido de puesta a tierra.

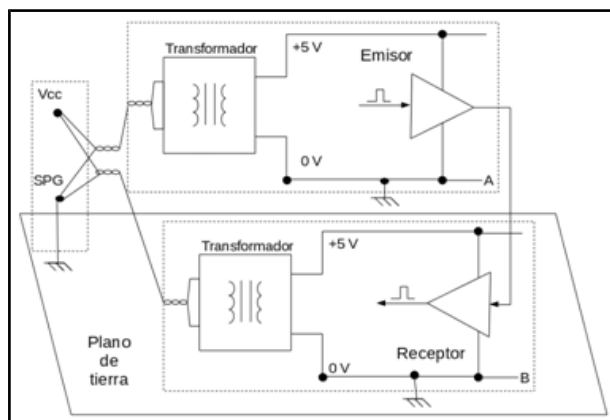


Figura 5: Esquema híbrido SPG/MPG

9 CONCLUSIONES

Es notoriamente fácil aplicar métodos de análisis, para campos eléctricos y magnéticos, pero es muy difícil determinar resultados certeros cuando la fase de diseño se materializa. Debido a que la naturaleza de las interferencias en el dominio del tiempo y de la frecuencia es de complicada precisión. Es por ello que durante la fase de diseño se consideran todas las pruebas de calificación y compatibilidad pertinentes antes del desarrollo final del satélite.

Hay una gran número de normas y estándares tales como DoD MIL-STD-461F de Estados Unidos y ECSS-E-ST-20-07C Europeo, que especifican las tolerancias en el diseño y prueba de los diferentes equipos, subsistemas y componentes a probar.

Además hay métodos de análisis por simulación, utilizando software como EMC32 o EMCoS, que permiten crear una base datos de los EUT, verificar los resultados de las pruebas antes de su montaje o ensamblaje final y que en conjunto con los equipos de medición, posibilita la creación de ambiente virtual que proporciona resultados muy cercanos a la realidad.

El área de compatibilidad electromagnética comprende una gran cantidad de estudios, regulaciones y manuales, que deben ser considerados durante el diseño de los componentes y sistemas electrónicos de satélites, de esta forma la probabilidad de tener un mal funcionamiento en las operaciones a nivel de intrasistemas e intersistemas sería muy baja.

10 REFERENCIAS

- [1] L. Rodríguez et al., "Creación del laboratorio de Compatibilidad Electromagnética (EMC) y Determinación de Parámetros de Antena (APM) para el Instituto de Ingeniería", 2009.
- [2] P. Fortescue et al, "Spacecraft Systems Engineering", England, Wiley, 2004, pp. 531-546.
- [3] DoD, "MIL-STD-461F: Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment", 2007.
- [4] ECSS, "ECSS-E-ST-2007C: Space Engineering, Electromagnetic Compatibility", 2012.
- [5] JAXA, "JERG-2-241: Design Standard EMC", 2012.
- [6] A. Fernández et al, "La Compatibilidad Electromagnética en el Diseño de los Equipos Electrónicos".
- [7] K. Armstrong, "Fundamentals of EMC Design: Our Products Are Trying To Help Us".