



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Análisis y diseño para compatibilidad
electromagnética
de un cohete experimental:
caso de estudio Xitle II**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniera Aeroespacial

P R E S E N T A

Ximena Zepeda Sandoval

DIRECTOR DE TESIS

Mtro. José Leonardo Garcés Medina



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2026



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado ANÁLISIS Y DISEÑO PARA COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA DE UN COHETE EXPERIMENTAL: CASO DE ESTUDIO XITLÉ II que presenté para obtener el título de INGENIERA AEROESPACIAL es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

XIMENA ZEPEDA SANDOVAL
Número de cuenta: 318259284

Yo sólo soy memoria y la memoria que de mí se tenga.

Elena Garro

*A mis padres y hermana
Quienes me enseñaron a mirar el mundo con curiosidad*

Agradecimientos

Agradezco de manera especial al Dr. Moisés Espinosa-Espinosa, Técnico Académico Asociado del Departamento de Física de la Facultad de Ciencias, por su apoyo durante la realización de las pruebas en la cámara semianecoica, así como por las orientaciones técnicas que contribuyeron de forma significativa a este trabajo.

Expreso también mi sincero agradecimiento al Mtro. José Leonardo Garcés Medina, por introducirme y guiarme en el ámbito de la compatibilidad electromagnética y del diseño eléctrico-electrónico, así como por su constante asesoría académica a lo largo del desarrollo de esta tesis.

Asimismo, agradezco a Propulsión UNAM por acompañarme durante mi formación, y por su contribución fundamental a mi desarrollo personal, profesional y como ingeniera.

Agradezco personalmente a Natalie Roldán, Paola Pérez, Carlos Andrade, Claudio Morales, Óscar Baños, Santiago Arroyo, Elías Basaldua y Fabían Sanchez, por acompañarme durante mi vida universitaria, brindarme retroalimentación tanto personal como académica y hacer más llevadera la vida en la Facultad. También, un agradecimiento especial a Santiago Márquez por acompañarme en muchas de las actividades relacionadas a esta tesis y siempre motivarme para seguir escribiendo.

Finalmente, quiero expresar un agradecimiento muy especial a Jorge Zepeda y Guillermina Sandoval, por darme todas las herramientas, apoyo y amor a lo largo de mi vida; así como a Daniela Zepeda, quien me inspiró a ver el mundo con curiosidad.

Índice general

1	Introducción	10
1.1	El rol de la compatibilidad electromagnética en el diseño de sistemas	10
1.2	Efectos de la interferencia electromagnética en sistemas aeroespaciales	11
1.3	Motivación	11
1.4	Objetivos y alcance del estudio	12
2	Marco teórico	13
2.1	Fundamentos de la compatibilidad electromagnética	13
2.1.1	Concepto de “eléctricamente largo”, campo cercano y campo lejano	14
2.1.2	Línea de transmisión	16
2.1.3	Corriente en modo diferencial y modo común	17
2.1.4	Tipos de acoplamiento electromagnético	18
2.1.5	Blindaje electromagnético	19
2.1.6	Definición de interferencia electromagnética (EMI) y compatibilidad electromagnética (EMC)	20
2.1.7	Jerarquía de nivel	21
2.2	Marco regulatorio y normatividad aplicable	21
2.2.1	Normatividad relacionada con la compatibilidad electromagnética	22
2.2.2	Regulación en la industria aeroespacial	26
2.2.3	Infraestructura nacional para pruebas EMC	29
2.3	Historia y antecedentes de la coherencia en México	29
3	Descripción del entorno electromagnético del cohete Xitle II	32
3.1	Características de la coherencia experimental	33
3.1.1	Descripción de los subsistemas de un cohete experimental	34
3.2	Ambiente electromagnético de la coherencia experimental	36
3.3	Descripción de los subsistemas de Xitle II	38
3.4	Ambiente electromagnético de Xitle II	46
3.4.1	Influencias electromagnéticas externas	47
3.4.2	Influencias electromagnéticas internas	48
4	Metodología para el diseño de compatibilidad electromagnética	50
4.1	Consideraciones generales en metodologías de diseño en sistemas aeroespaciales	50
4.2	Metodología propuesta para coherencia experimental	51
4.2.1	Nivel componente	52
4.2.2	Nivel subsistema	54
4.2.3	Nivel integración	57
4.3	Metodología aplicada: arquitectura del sistema del vehículo Xitle II	58
4.3.1	Bahía de aviónica	58
4.3.2	Sistema de monitoreo y actuación	73
4.3.3	Estación terrena	80
5	Determinación de pruebas de compatibilidad electromagnética	89
5.1	Propuesta de metodología para cohetes experimentales de alta potencia	89
5.2	Protocolo de pruebas y metodología de ensayos	91
5.2.1	Consideraciones generales del ensayo	91

5.2.2	Instrumentación y recursos	92
5.2.3	Criterios de calidad del ensayo	93
5.3	Ensayos de emisiones electromagnéticas: campo cercano y campo lejano	94
5.3.1	Ensayos de emisiones en campo cercano	94
5.3.2	Ensayos de emisiones en campo lejano	98
6	Resultados y discusión	101
6.1	Resultados de pruebas de campo cercano	101
6.1.1	Resultados de mediciones de campo magnético	103
6.1.2	Resultado de mediciones de campo eléctrico	104
6.2	Resultados de pruebas de campo lejano	105
6.2.1	Configuración de la prueba	105
6.2.2	Resultados de emisiones radiadas	106
6.3	Discusión	107
6.3.1	Criterio de análisis de las emisiones señaladas	108
6.3.2	Análisis individual de las emisiones señaladas	108
7	Conclusiones	118
7.1	Validación de las hipótesis de diseño mediante resultados experimentales	119
A	Glosario de abreviaturas	122

Índice de figuras

2.1	Representación conceptual de corrientes en modo diferencial (DM) y modo común (CM) . . .	17
2.2	Reflexiones múltiples en un blindaje delgado. La onda electromagnética incidente se propaga a lo largo de la coordenada z y atraviesa un material conductor de espesor h . Dentro del blindaje, parte de la onda se refleja repetidamente entre las superficies antes de ser transmitida o absorbida (Ott, 2009).	20
2.3	Propulsión UNAM en Spaceport America Cup (SAC) 2024 antes de lanzar el Xitle II	31
3.1	Ejemplificación simple del entorno electromagnético del cohete Xitle II: radiocomunicaciones terrestres, sistemas GPS y RF externos	32
3.2	Partes del cohete experimental Komodo AP, lanzado y recuperado por Propulsión UNAM en 2023	35
3.3	Distribución general de subsistemas en un cohete experimental del equipo Waterloo Rocketry (Rocketry, 2024).	35
3.4	A la derecha: placa de adquisición de datos a bordo del cohete. A la izquierda: estación de monitoreo, a la derecha: Placa de adquisición de datos	36
3.5	Representación de las partes internas de un cohete experimental (en la imagen, el Komodo AP antes de su lanzamiento en octubre de 2023).	36
3.6	Cámara de combustión del motor "Catigador V2"	39
3.7	Tanque de oxidante del motor el "Catigador V2"	40
3.8	Estación de llenado de N_2O para el motor "Castigador V2"	40
3.9	Ensamble final del motor "Castigador V2"	41
3.10	Ensamble general del cohete Xitle II	43
3.11	Computadora de vuelo SRAD	43
3.12	Ensamble de celda de carga para el monitoreo de la masa del oxidante en el "Castigador V2"	44
3.13	Estación terrena que ayuda a visualizar los datos en tiempo real	45
3.14	Representación funcional del entorno electromagnético del sistema Xitle II	46

3.15	Vista de la bahía de aviónica del <i>Xitle II</i> . Se muestran las fuentes de alimentación DC y los módulos de transmisión de datos.	48
3.16	Esquema del sistema de monitoreo y actuación.	49
3.17	Diagrama funcional de la estación terrena. Se incluyen los módulos de transmisión y recepción que interactúan con el vehículo en tiempo real.	49
4.1	Diagrama ilustrativo sobre la metodología propuesta	51
4.2	Ejemplo de envolvente espectral de los armónicos generados por una señal digital periódica (adaptado de (Electronics Stack Exchange, 2020)).	53
4.3	Análisis para la implementación y elección de un componente	54
4.4	Ejemplo de la segmentación funcional de una PCB orientada a compatibilidad electromagnética, donde se separan bloques de alta velocidad, lógica digital, memoria y circuitos de baja frecuencia para reducir acoplamientos electromagnéticos (adaptado de Ott, 2009, p. 623). . .	55
4.5	Trayectoria del retorno de corriente en un plano de referencia: (A) a baja frecuencia el retorno sigue el camino de menor resistencia, mientras que (B) a alta frecuencia sigue el camino de menor inductancia, concentrándose debajo de la traza de señal (adaptado de Ott, 2009, p. 122). .	56
4.6	Diagrama de bloques general de la bahía de aviónica	59
4.7	Diagrama funcional general de la computadora de vuelo ASYB.	60
4.8	Diagrama de bloques que representa los subsistemas y el tipo de alimentación que requiere cada uno de ellos en la Bahía de aviónica	62
4.9	Distribución interna de señales, planos de tierra y alimentación en la computadora ASYB. . .	63
4.10	Foto de la computadora de vuelo ASYB durante el vuelo del cohete KomodoAP 2023	63
4.11	Distribución de puertos y conectores de la computadora comercial RRC3.	64
4.12	Computadora comercial RRC3	66
4.13	Distribución de puertos y conectores del rastreador comercial Featherweight GPS Tracker. . .	66
4.14	Rastreador comercial	67
4.15	Distribución de puertos y conectores de la Azurita.	69
4.16	Foto de la "Azurita"	69
4.17	Esquema de la bahía de aviónica completa mostrando la disposición de equipos y antenas. . .	70
4.18	Foto de la bahía de aviónica	71
4.19	Esquema general del sistema de monitoreo y actuación del cohete Xitle II.	73
4.20	Distribución funcional de la placa de adquisición de datos.	75
4.21	Distribución funcional de la placa de actuación.	77
4.22	Placa de actuadores cara superior	78
4.23	Placa de actuadores cara inferior	78
4.24	Diagrama integrador del subsistema de monitoreo y actuación. Se observan las dos placas principales y sus conexiones con sensores, válvulas y la estación terrena.	79
4.25	Diagrama general de la estación terrena del vehículo Xitle II, compuesta por el subsistema Propulsión UNAM y el subsistema Featherweight Altimeters.	80
4.26	Diagrama general de la Raspberry Pi 5	81
4.27	Diagrama general del controlador de la pantalla LCD	82
4.28	Esquema funcional de la placa transmisora de la estación terrena.	83
4.29	Placa transmisora de la estación terrena.	83
4.30	Esquema funcional de la placa receptora de la estación terrena.	84
4.31	Placa receptora de la estación terrena.	84
4.32	Módulo regulador conmutado comercial LM2596 empleado en la estación terrena.	85
4.33	Foto del interior de la estación terrena.	86
4.34	Diagrama de bloques de la estación terrena COTS.	86
4.35	Diagrama de bloques de la estación terrena, mostrando la interconexión de sus módulos principales.	87
5.1	Flujo básico para la elección de una prueba de compatibilidad electromagnética	90
5.2	Sonda de campo magnético 7405-901	95
5.3	Sonda de campo eléctrico 7405-904	96
5.4	Ejes coordenados	97
5.5	A la izquierda, medición con la sonda de campo magnético en el eje Z según el sistema coordinado, a la derecha los resultados de la medición	97

5.6	Vista general de la cámara semianecoica utilizada para los ensayos de emisiones radiadas en campo lejano, mostrando la disposición del equipo bajo prueba y la instrumentación de medición.	98
5.7	Terminación de la salida RF del rastreador comercial mediante una carga de $50\ \Omega$, utilizada para evitar transmisiones intencionales durante los ensayos de emisiones radiadas.	99
6.1	Verificación cruzada de frecuencia entre instrumentos. A la izquierda se muestra la medición en dominio temporal obtenida mediante osciloscopio ($f_{osc} = 91,3\text{ MHz}$). A la derecha se presenta la medición en dominio frecuencial realizada con el analizador de espectros ($f_{AE} = 92\text{ MHz}$). La diferencia observada es consistente con la resolución instrumental empleada ($RBW = 3\text{ MHz}$).	102
6.2	Resultados de emisiones radiadas en campo lejano conforme a EN 55022 CPQP a 3 m.	106
6.3	Resultados de emisiones radiadas en campo lejano conforme a EN 55022 señaladas	107
6.4	Medición física del cable coaxial que conecta la computadora de vuelo con la antena Moxón	109
6.5	Medición del reloj principal de la Raspberry Pi Pico mediante osciloscopio.	110
6.6	Componente espectral asociada al reloj de la Raspberry Pi Pico observada en el analizador de espectros con la sonda de campo eléctrico	110
6.7	Componente espectral correspondiente al tercer diamante en 320.80 MHz durante la prueba de emisiones radiadas.	112
6.8	Módulo regulador Mini 560 Step Down. Se observa la bobina de potencia y la disposición compacta del nodo de conmutación, principales fuentes de ruido de alta frecuencia.	113
6.9	Medición de campo cercano magnético realizada con la sonda ETS-Lindgren 7405-901 sobre el subsistema Azurita, donde se observa un máximo espectral en 915.72 MHz.	114
6.10	Medición en analizador de espectros donde se identifica la emisión centrada en aproximadamente 92 MHz.	115
6.11	Señal temporal medida en osciloscopio en las proximidades de la memoria flash.	116

Índice de cuadros

2.1	Zonas electromagnéticas y sus acoplamientos más comunes	16
2.2	Puertos de señal I/O – Niveles de inmunidad según la norma IEC 60601-1-2	23
2.3	Inmunidad a RF inalámbrica según la norma IEC 60601-1-2:2014	24
2.4	Clases de comportamiento funcional definidas en ISO 11452-1:2005	24
2.5	Niveles de prueba según la norma IEC 61000-4-2	25
2.6	Especificaciones generales del generador ESD según IEC 61000-4-2	25
2.7	Parámetros de la forma de onda de corriente de descarga por contacto definidos en IEC 61000-4-2	25
2.8	Niveles de prueba de descarga electrostática según la norma IEC 60601-1-2:2014	26
2.9	Resumen de límites de EMI/EMC según MIL-STD-461E	27
2.10	Resumen de niveles de prueba EMC según ECSS-E-ST-20-07C	28
3.1	Clasificación de motores según el impulso total (NAR)	33
3.2	Categorías en Spaceport America Cup.	34
3.3	Válvulas y mecanismos del sistema de oxidante	41
3.4	Parámetros clave del motor híbrido Castigador V2	41
3.5	Datos técnicos del vehículo Xitle II	42
4.1	Componentes principales de la bahía de aviónica	61
4.2	Parámetros eléctricos y funcionales de los subsistemas de la computadora de vuelo ASYB	61
4.3	Parámetros eléctricos y electromagnéticos de la computadora comercial RRC3 – Rocket Recovery Controller 3.	65

4.4	Parámetros eléctricos y electromagnéticos del rastreador comercial Featherweight GPS Tracker.	67
4.5	Parámetros eléctricos y electromagnéticos de la computadora de vuelo Azurita.	68
4.6	Parámetros eléctricos y funcionales de los subsistemas de la placa de adquisición de datos . .	74
4.7	Parámetros eléctricos y funcionales de los subsistemas del sistema electrónico.	76
4.8	Parámetros eléctricos y electromagnéticos de la Raspberry Pi 5.	81
4.9	Parámetros eléctricos y electromagnéticos del sistema de visualización LCD.	82
4.10	Parámetros eléctricos y electromagnéticos del módulo transmisor.	82
4.11	Parámetros eléctricos y electromagnéticos del módulo receptor.	83
4.12	Parámetros eléctricos y electromagnéticos del regulador LM2596.	84
5.1	Características técnicas típicas de la sonda ETS-Lindgren 7504-901	92
5.2	Características técnicas típicas de la sonda ETS-Lindgren 7405-904	93
5.3	Especificaciones de la sonda de campo cercano magnético 901B del set ETS-Lindgren 7405. .	95
5.4	Especificaciones de la sonda de campo cercano 904B del set ETS-Lindgren 7405.	96
6.1	Picos dominantes identificados en mediciones de campo cercano magnético (sonda 7405-901) en notación ingenieril.	103
6.2	Picos dominantes identificados en mediciones de campo cercano eléctrico (sonda 7405-904) en notación ingenieril.	104
6.3	Configuración y modo de operación de los subsistemas durante la prueba de campo lejano conforme a EN 55022 CPQP a 3 m.	105
6.4	Valores estimados de los “diamantes” resultantes en la prueba EN 55022 a 3 metros (notación ingenieril).	108
6.5	Parámetros eléctricos del regulador conmutado Mini 560 Step Down.	113
6.6	Parámetros relevantes del transceptor LoRa RFM95W en la banda ISM de 915 MHz.	114

Índice de ecuaciones

2.1	Ley de Gauss para el campo eléctrico	13
2.2	Ley de Gauss para el campo magnético	13
2.3	Ley de Faraday	13
2.4	Ley de Ampère-Maxwell	13
2.5	Impedancia compleja en función de la frecuencia	14
2.7	Campo eléctrico radiado en la región de campo lejano	15
2.8	Campo magnético radiado en la región de campo lejano	15
2.9	Relación de magnitud entre campos eléctrico y magnético en el campo lejano	16
2.10	Impedancia característica de una línea de transmisión (caso general)	16
2.11	Impedancia característica de una línea de transmisión (caso ideal)	16
2.12	Corriente en modo diferencial	17
2.13	Corriente en modo común	17
2.14	Corriente por acoplamiento capacitivo entre conductores	18
2.14	Corriente entre dos conductores	18
2.15	Ley de inducción de Faraday que describe la inductancia mutua	18
2.16	Modelo de acoplamiento por impedancia común entre dos circuitos	19
2.17	Voltaje inducido por campo eléctrico incidente en un conductor lineal	19
2.18	Efectividad total de blindaje	20
3.1	Impulso total	33
6.3	Diferencia de frecuencia entre señal AE y oscilador	101
6.4	Longitud de onda de la señal	108

6.5 Longitud resonante de un conductor (múltiplos de cuarto de onda) 109

6.6 Longitud de cuarto de onda 109

6.7 Longitud de media onda 109

Capítulo 1

Introducción

1.1. El rol de la compatibilidad electromagnética en el diseño de sistemas

Entorno electromagnético y fuentes de interferencia

Para realizar sus funciones, los sistemas eléctricos y electrónicos deben manejar señales eléctricas de diversa naturaleza y características. Por ejemplo, una señal de audio típicamente se representa como una señal analógica de voltaje cuyo contenido espectral está limitado a frecuencias por debajo de 20 kHz. En comparación, una señal de radiofrecuencia implica campos electromagnéticos con componentes espectrales de frecuencias superiores. Este contraste ejemplifica perfectamente cómo es que un sistema puede requerir múltiples señales con características diversas que necesitan coexistir en un mismo entorno.

La coexistencia de estas señales dentro de un sistema o en su entorno inmediato puede dar lugar a fenómenos de acoplamiento indeseado, en los cuales parte de la energía de una señal afecta negativamente a otra. Estos efectos adversos se conocen como interferencia electromagnética EMI. Es importante señalar que la EMI involucra tanto emisores como receptores, es decir, componentes o subsistemas que generan campos electromagnéticos no deseados, así como aquellos susceptibles de ser afectados. Cuando estos efectos superan los umbrales de tolerancia y comprometen la integridad de las señales, podemos decir que el sistema carece de compatibilidad electromagnética.

La EMI puede originarse a partir de múltiples fuentes: ya sea internas, generadas por el propio sistema o externas al sistema que pueden ser conocidas o desconocidas. Dado que siempre existirá un cierto nivel de acoplamiento no deseado, lo que se busca para que un sistema sea electromagnéticamente compatible es minimizar sus efectos adversos sobre el sistema, garantizando su funcionamiento confiable bajo condiciones reales de operación.

Para hacer frente a estos problemas de interferencia electromagnética, se recurre a la compatibilidad electromagnética EMC, entendida como el estado en el cual un dispositivo o sistema puede operar satisfactoriamente en su entorno electromagnético sin introducir perturbaciones en otros elementos del mismo entorno. Se debe tener claro que la interferencia electromagnética no puede desaparecer, sin embargo, podemos lograr que sus niveles no interfieran negativamente en el funcionamiento del sistema.

La EMC adquiere una importancia creciente conforme los sistemas electrónicos aumentan en complejidad. En estos casos, tanto su funcionamiento interno como factores externos pueden conducir a fallas que se deben prevenir con medidas adecuadas desde la fase de diseño como las metodologías que propone Ott, Weston y Garcés. La implementación de técnicas de EMC no solo mejora la robustez de los sistemas, sino que también contribuye a su durabilidad y confiabilidad operativa (Ott, 2009; Weston, 2016).

Dado que la EMC es un requisito esencial en numerosos sectores como la industria médica, automotriz, espacial o agrícola, su impacto se extiende a cualquier disciplina que involucre sistemas que generen o reciban campos electromagnéticos (Sevgi, 2009).

En el caso particular del sector aeroespacial, la implementación adecuada de técnicas de EMC permite reducir significativamente el riesgo de fallas catastróficas. Esto resulta especialmente crítico debido a que el entorno

electromagnético del espacio aéreo y espacial es altamente dinámico, y las condiciones de operación imponen severas restricciones al diagnóstico y corrección de fallas en tiempo real. Así, el diseño preventivo desde etapas tempranas se vuelve imprescindible para preservar la funcionalidad de todos los sistemas involucrados en una misión (Leach & Alexander, 1995).

1.2. Efectos de la interferencia electromagnética en sistemas aeroespaciales

La compatibilidad electromagnética (EMC) representa un área fundamental dentro de la ingeniería de sistemas, ya que garantiza la operación confiable y libre de interferencias de los subsistemas electrónicos que coexisten en un mismo entorno. Sin embargo, en la práctica, suele ser subestimada durante las primeras etapas del proceso de diseño, donde el enfoque se centra principalmente en la funcionalidad individual de los dispositivos, dejando en segundo plano las interacciones electromagnéticas entre ellos, lo que puede derivar en problemas de desempeño o fallas en etapas avanzadas del desarrollo. Existen antecedentes documentados que reflejan la gravedad de los problemas relacionados con EMI en entornos aeroespaciales. Por ejemplo, durante pruebas de la misión Saturno de la NASA, se presentaron eventos de interferencia debido a la gran cantidad de transmisores a bordo; algunos receptores registraron comandos erróneos que simulaban una orden de apagado de motor (Leach & Alexander, 1995). De forma similar, en 1993 se reportó un incidente en un vuelo operado por un DC-10, cuyo piloto automático fue interferido por un reproductor de CD. La anomalía obligó a realizar un aterrizaje manual para evitar una colisión (Leach & Alexander, 1995). En la industria aeroespacial, los sistemas tienden a ser altamente complejos y suelen desempeñar funciones críticas. Por lo tanto, se espera que operen sin fallas de ningún tipo, dado que los errores pueden comprometer no solo el éxito de la misión, sino también la seguridad de las personas o bienes involucrados, dependiendo del contexto.

Estos casos son un ejemplo de cómo la EMC es importante a la hora de desarrollar un sistema eléctrico-electrónico. Asegurar que los sistemas sean electromagnéticamente compatibles no solo implica que se cumpla con los requerimientos funcionales, sino que garantiza la integridad operativa bajo condiciones reales. De este modo, el diseño bajo criterios de EMC permite construir sistemas más robustos y funcionales.

1.3. Motivación

Esta investigación se distingue por documentar un caso real de diseño de sistemas eléctricos y electrónicos, particularmente en el contexto del desarrollo de subsistemas para vehículos experimentales dentro del contexto nacional. Se pretende proponer una metodología de diseño para lograr la compatibilidad electromagnética en la coherencia experimental, una temática escasamente explorada en el entorno académico y tecnológico del país. En este sentido, el trabajo no solo contribuye al desarrollo del conocimiento en el área, sino que tiene el potencial de sentar un precedente para futuras investigaciones y desarrollos tanto en instituciones educativas como en iniciativas del sector aeroespacial nacional.

Además, el planteamiento de una metodología de diseño para diseñar sistemas electromagnéticamente compatibles donde se busca constituir una guía para que estudiantes y equipos de coherencia qué desarrollan este tipo de tecnología. A través de la sistematización de criterios de diseño, análisis y control de interferencia electromagnética, con esto se pretende facilitar la implementación de buenas prácticas desde etapas tempranas del desarrollo, favoreciendo la confiabilidad y el desempeño de los sistemas electrónicos.

Finalmente, la estructura del plan propuesto presenta un carácter adaptable que permite su aplicación en distintos contextos tecnológicos a nivel académico. Si bien ha sido desarrollado para un vehículo experimental específico, su fundamento en principios de ingeniería de sistemas permite su escalabilidad hacia otras disciplinas, siempre que se consideren las particularidades del entorno electromagnético y los requisitos operativos de cada aplicación. De este modo, el trabajo contribuye no solo al ámbito de la coherencia experimental, sino también al desarrollo de soluciones más robustas y transferibles en el campo de la ingeniería.

1.4. Objetivos y alcance del estudio

Objetivo general

Desarrollar y validar una metodología de diseño para la compatibilidad electromagnética en sistemas de aviónica de cohetes experimentales, mediante el diseño, implementación y análisis de una arquitectura aplicada al vehículo Xitle II, con el fin de obtener un sistema electromagnéticamente compatible y transferible a futuros desarrollos de coherencia experimental.

Objetivos específicos

- Revisar bibliografía relacionada con la compatibilidad electromagnética (EMC) aplicada a sistemas aeroespaciales y coherencia experimental.
- Definir una metodología de diseño de compatibilidad electromagnética en los sistemas involucrados en el Xitle II, basada en principios de ingeniería de sistemas y buenas prácticas de EMC.
- Identificar y caracterizar los requerimientos, especificaciones y entorno electromagnético del caso de estudio: el cohete experimental de propulsión híbrida Xitle II.
- Aplicar la metodología propuesta en el diseño de la computadora de vuelo del cohete Xitle II.
- Aplicar la metodología propuesta en los subsistemas que comprenden el entorno electromagnético del cohete Xitle II, desde la perspectiva de diseño de subsistemas para la integración de componentes comerciales.
- Evaluar el desempeño electromagnético del sistema mediante pruebas, análisis y comparación con los requerimientos establecidos.
- Analizar los resultados para validar la metodología propuesta y establecer recomendaciones para su aplicación en futuros proyectos.

Alcance del estudio

El presente trabajo se enfoca en el análisis, diseño, implementación y evaluación de la compatibilidad electromagnética en la bahía de aviónica del cohete experimental Xitle II. En particular, el estudio aborda los sistemas electrónicos en la bahía de aviónica, incluyendo módulos de adquisición de datos, sistemas de comunicación, fuentes de alimentación y distribución eléctrica, así como el cableado y la integración física de dichos subsistemas.

El trabajo abarca la caracterización del entorno electromagnético interno y externo relevante para la bahía de aviónica, la identificación de fuentes potenciales de interferencia, y la aplicación de técnicas de mitigación de EMI mediante criterios de diseño, selección de componentes, disposición física y estrategias de implementación de referencias, blindaje, etc.

Es importante señalar que otros subsistemas del vehículo, tales como el sistema de propulsión, la estructura mecánica y los sistemas de recuperación, no forman parte del objeto directo de estudio. No obstante, estos se describen como parte del entorno del sistema, en la medida en que pueden actuar como fuentes de perturbaciones electromagnéticas o como rutas de acoplamiento de interferencia hacia la bahía de aviónica.

En consecuencia, el presente trabajo no aborda el diseño ni el análisis detallado del desempeño de dichos subsistemas, sino únicamente su interacción electromagnética con la bahía aviónica. Esta delimitación permite enfocar el estudio en la integridad funcional de los sistemas electrónicos, sin perder de vista la naturaleza sistémica del vehículo completo.

Adicionalmente, el presente trabajo parte del supuesto de que la aplicación sistemática de criterios de diseño basados en compatibilidad electromagnética permite desarrollar subsistemas electrónicos más robustos y confiables en el contexto de la coherencia experimental.

Es importante considerar que, aunque el uso de laboratorios y equipo de medición facilita la validación del desempeño electromagnético, la implementación de buenas prácticas de diseño puede realizarse incluso en entornos con recursos limitados. Por tanto, la metodología propuesta busca ser una herramienta accesible y adaptable, orientada a mejorar la calidad y reproducibilidad de los sistemas electrónicos desarrollados en proyectos de coherencia experimental.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Fundamentos de la compatibilidad electromagnética

Antes de abordar los conceptos que definen la interferencia (EMI) y compatibilidad electromagnética (EMC), es esencial repasar los fundamentos del fenómeno electromagnético en sí mismo. Un campo electromagnético es la manifestación de cargas eléctricas en movimiento, es decir, cuando existen corrientes eléctricas. Como establece (Hayt & Buck, 2012), el movimiento de cargas produce inevitablemente campos magnéticos y, de manera recíproca, cualquier campo magnético variable genera una fuerza electromotriz capaz de mover cargas eléctricas. Esta relación física fundamental se formaliza en las leyes del electromagnetismo clásico.

Estos dos campos, el campo eléctrico $\vec{E}$ y el campo magnético $\vec{H}$, no existen de forma aislada, sino que interactúan continuamente entre sí cuando varían en el tiempo. Dicha interacción mutua da lugar a la propagación de ondas electromagnéticas, las cuales constituyen el mecanismo básico mediante el cual la energía electromagnética se transmite de un punto a otro en el espacio.

El comportamiento de un campo electromagnético no solo depende de su fuentes, sino también de las propiedades del medio en el cual se propaga. Dos parámetros fundamentales describen esta interacción, la permitividad eléctrica ε y la permeabilidad magnética μ . La permitividad es la capacidad de un medio para almacenar energía eléctrica bajo un campo eléctrico, mientras que la permeabilidad magnética describe la respuesta del medio ante la presencia de un campo magnético. Estas propiedades determinan la velocidad de propagación de la onda electromagnética y la relación entre los campos eléctricos y magnéticos, influyendo directamente en los fenómenos de reflexión, absorción y transmisión de energía electromagnética.

La propagación y la interacción de los campos electromagnéticos se describen formalmente mediante las ecuaciones de Maxwell. Este conjunto de cuatro ecuaciones constituye la base teórica que permite comprender el origen de las interferencias electromagnéticas en sistemas eléctricos y electrónicos. En su forma diferencial, dichas ecuaciones se expresan como:

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (2.1)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.2)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.4)$$

Las ecuaciones (2.1) y (2.2) describen el comportamiento de los campos eléctricos y magnéticos en presencia de cargas y establecen la inexistencia de monopolos magnéticos. Las dos últimas ecuaciones muestran explícitamente cómo un campo magnético variable induce un campo eléctrico y cómo un campo eléctrico variable genera un campo magnético. Asimismo, establecen que la densidad de corriente eléctrica, representada por $\vec{J}$, actúa como fuente de campo magnético de acuerdo con la ley de Ampère-Maxwell, tal como se expresa en la ecuación (2.4). Estos mecanismos son la base física de la propagación de ondas electromagnéticas y explica cómo las corrientes y voltajes variables involucrados en variables en un sistema electrónico pueden convertirse en fuentes de interferencia electromagnética (Hayt & Buck, 2012).

En sistemas electrónicos, los componentes interactúan constantemente tanto en el dominio temporal como espacial. Estas interacciones generan múltiples fenómenos electromagnéticos inherentes al circuito, incluyendo acoplamientos no deseados, reflexiones de señal e interferencias internas. Para comprender y analizar estos fenómenos resulta esencial introducir el concepto de impedancia.

La impedancia Z representa la oposición total que ofrece un circuito eléctrico al paso de la corriente e incorpora tanto una componente resistiva como una reactiva. Se expresa matemáticamente como:

$$Z = R + jX \quad (2.5)$$

Donde R representa la resistencia a la corriente de DC y X la reactancia asociada a los efectos inductivos y capacitivos del circuito a las corrientes de AC. A bajas frecuencias, el comportamiento del sistema suele estar dominado por la resistencia; sin embargo, conforme la frecuencia aumenta, las reactancias adquieren un papel predominante y modifican de manera significativa el comportamiento electromagnético del sistema.

La impedancia es importante cuando se analizan los trayectos que siguen las corrientes eléctricas en un circuito. Toda corriente debe circular desde su fuente hacia una carga y regresar a su origen, cerrando el circuito. El camino de retorno no se define únicamente por la mínima resistencia, sino por la mínima impedancia total. A altas frecuencias, debido a la presencia de reactancia, la corriente no sigue trayectorias delimitadas, sino que sigue el camino de menor impedancia.

Henry Ott analiza este fenómeno en detalle y señala que cualquier discontinuidad en el plano de referencia incrementa la impedancia del trayecto de retorno, lo que conduce a la formación de bucles de corriente más grandes y, en consecuencia, a un aumento de la susceptibilidad a interferencias electromagnéticas (Ott, 2009). De manera similar, Weston destaca que incluso trayectorias físicamente cortas pueden volverse problemáticas a altas frecuencias si no se garantiza la continuidad eléctrica del camino de retorno (Weston, 2016).

En este contexto, los planos de tierra o de referencia cumplen un doble papel fundamental en el comportamiento electromagnético de los sistemas electrónicos:

1. Proporcionan una camino de retorno definido para las corrientes.
2. Actúan como elementos de mitigación de interferencia electromagnética al reducir su impedancia efectiva.

A bajas frecuencias, los planos de referencia pueden aproximarse al comportamiento de un conductor ideal, proporcionando trayectorias de baja impedancia para las corrientes de retorno. No obstante, a frecuencias elevadas, el comportamiento electromagnético del plano está determinado por la distribución espacial de dichas corrientes y por la continuidad de sus trayectorias de retorno.

La presencia de discontinuidades o una inadecuada disposición de las señales puede forzar a las corrientes de retorno a desviarse de sus trayectorias naturales, generando *loops* de corriente, incrementando el acoplamiento electromagnético y dañando la integridad de la señal. Por lo tanto, el uso de planos de tierra no garantiza por sí mismo un diseño electromagnéticamente adecuado, sino que es necesario un control cuidadoso de su implementación y de la ubicación de las señales que interactúan con ellos.

2.1.1. Concepto de “eléctricamente largo”, campo cercano y campo lejano

Eléctricamente largo

En la práctica, la naturaleza ondulatoria de los campos electromagnéticos, así como su longitud de onda asociada, implica que el tamaño físico de cualquier estructura conductora influye directamente en su interacción

electromagnética. En el contexto de la EMC, un conductor, trayectoria o estructura se considera eléctricamente largo cuando su dimensión característica L es comparable o mayor a una fracción de la longitud de onda λ de la señal electromagnética que transporta o incide sobre él (Ott, 2009).

La relación a la cual se hace referencia es:

$$L \geq \frac{\lambda}{10} \quad (2.6)$$

Cuando se cumple esta condición, comienzan a manifestarse fenómenos característicos como radiación, reflexión y resonancia. Bajo estas circunstancias, la estructura deja de comportarse como un conductor ideal y debe analizarse como una línea de transmisión o incluso como una antena (Ott, 2009; Weston, 2016).

Entendemos entonces que, para longitudes en pistas, trayectorias, etc, si se tienen valores mayores a esta relación, el conductor debe ser tratado y estudiado como una línea de transmisión o una antena, la cual presentará fenómenos de radiación y reflexión (Weston, 2016).

Campo cercano $r \ll \lambda$

El campo cercano se define como una distancia mucho menor que el valor de longitud de onda del sistema $r \ll \lambda$, regularmente se manejan valores de campo cercano alrededor de la siguiente relación $r < \frac{\lambda}{2\pi}$. En esta región los campos eléctricos $\vec{E}$ y magnéticos $\vec{H}$ no se encuentran en fase, ni se comportan como onda plana. La energía no se propaga; se almacena temporalmente y busca regresar a la fuente. ((Weston, 2016))

En campo cercano se presenta el acoplamiento inductivo y capacitivo. Este comportamiento es importante en sistemas como circuitos impresos, cableado compacto, etc.

Adicionalmente, en esta región los términos de campo presentan diferentes tasas de decaimiento con la distancia, donde pueden aparecer componentes que decrecen como $\frac{1}{r^3}$ y $\frac{1}{r^2}$, asociados al carácter reactivo del campo cercano.

Campo lejano $r \gg \lambda$

En esta región la fuente de energía electromagnética se encuentra a una distancia mucho mayor que la longitud de onda ($r \gg \lambda$), y la energía se propaga a través del espacio libre en forma de onda electromagnética. Podemos entender entonces que los términos de campo que decrecen como $\frac{1}{r^3}$ y $\frac{1}{r^2}$ se vuelven despreciables, y el comportamiento de los campos electromagnéticos puede modelarse como una onda plana transversal, donde los campos $\vec{E}$ y $\vec{H}$ son ortogonales entre sí y a la dirección de propagación. Las expresiones matemáticas que definen el comportamiento en campo lejano se presentan a continuación.

$$\vec{E}_{\text{far}}(r, \theta, t) \approx \frac{jkp}{4\pi\epsilon_0 c} \cdot \frac{1}{r} \cdot \hat{\theta} \cdot \sin \theta \cdot e^{j(\omega t - kr)} \quad (2.7)$$

$$\vec{H}_{\text{far}}(r, \theta, t) \approx \frac{jkp}{4\pi c^2} \cdot \frac{1}{r} \cdot \hat{\phi} \cdot \sin \theta \cdot e^{j(\omega t - kr)} \quad (2.8)$$

Donde:

- $\vec{E}_{\text{far}}, \vec{H}_{\text{far}}$: Campos eléctrico y magnético radiados (V/m y A/m),
- $p = q \cdot d$: Momento dipolar (C · m),
- $k = \omega/c$: Número de onda (rad/m),
- ω : Frecuencia angular (rad/s),
- r : Distancia radial desde la fuente (m),
- θ : Ángulo respecto al eje del dipolo (rad),

- ε_0 : Permitividad del vacío,
- c : Velocidad de la luz (m/s),
- j : Unidad imaginaria ($j^2 = -1$),
- $\hat{\theta}, \hat{\phi}$: Vectores unitarios en coordenadas esféricas.

En esta región, los campos están en fase y su magnitud cumple ((Coordinación de Electromagnetismo, Facultad de Ciencias, UNAM, 2024)):

$$|\vec{E}_{\text{far}}| = \eta_0 \cdot |\vec{H}_{\text{far}}|, \quad \text{con } \eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \approx 377 \, \Omega^1 \quad (2.9)$$

donde η_0 corresponde a la impedancia característica del espacio libre.

Zona de transición $\frac{\lambda}{2\pi} < r < \lambda$

Por lo anterior, parece ser que no existe un límite bien definido entre el campo cercano y el campo lejano, sin embargo en la zona de transición los campos electromagnéticos no pueden ser descritos exclusivamente por fenómenos reactivos o radiados

A continuación se presenta un resumen del tipo de acoplamiento típico en cada zona

Cuadro 2.1: Zonas electromagnéticas y sus acoplamientos más comunes

Zona electromagnética	Rango típico de distancia	Acoplamientos más comunes
Campo cercano	$r < \frac{\lambda}{2\pi}$	Capacitivo e inductivo
Zona de transición	$\frac{\lambda}{2\pi} < r < \lambda$	Capacitivo, inductivo e impedancia común
Campo lejano	$r > \lambda$	Radiado

2.1.2. Línea de transmisión

Una línea de transmisión es una estructura eléctricamente larga formada por dos o más conductores que guía la propagación de una onda electromagnética y se puede expresar con parámetros distribuidos. A diferencia de los circuitos de parámetros concentrados, en una línea de transmisión la resistencia R , la inductancia L , la capacitancia C y la conductancia G se encuentran distribuidas a lo largo de la longitud del conductor, lo cual se vuelve relevante cuando las dimensiones físicas son comparables con la longitud de onda de la señal (Ott, 2009).

Una magnitud fundamental que caracteriza el comportamiento de una línea de transmisión es su impedancia característica Z_0 , la cual determina la relación entre el voltaje y la corriente de la onda que se propaga a lo largo de la línea. En el caso general, considerando pérdidas, la impedancia característica se expresa como:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (2.10)$$

Para una línea de transmisión ideal sin pérdidas, donde $R = 0$ y $G = 0$, la expresión anterior se simplifica a:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.11)$$

Estas expresiones permiten analizar fenómenos como reflexiones, desacoplo de impedancias y propagación de interferencia electromagnética en cables, pistas de circuitos impresos y arneses de interconexión, aspectos fundamentales en el diseño bajo criterios de compatibilidad electromagnética (Ott, 2009).

¹La constante η_0 corresponde a la impedancia característica del espacio libre.

2.1.3. Corriente en modo diferencial y modo común

Las corrientes que circulan por un par de conductores pueden descomponerse en dos componentes fundamentales: corriente en modo diferencial y corriente en modo común. Esta descomposición es especialmente relevante en compatibilidad electromagnética, ya que ambos modos presentan mecanismos de acoplamiento y emisión distintos (Ott, 2009; Weston, 2016).

La **corriente en modo diferencial** corresponde a la componente de corriente asociada a la transmisión útil de la señal. En este modo, la corriente fluye por el conductor de ida y regresa por el conductor de retorno con igual magnitud y sentido opuesto. Matemáticamente, para un par de conductores con corrientes I_1 e I_2 , la corriente en modo diferencial se define como:

$$I_{DM} = \frac{I_1 - I_2}{2} \quad (2.12)$$

Este modo es el deseado en la transmisión de señales, ya que el campo electromagnético generado tiende a confinarse alrededor del par de conductores, reduciendo la radiación (Weston, 2016).

Por otro lado, la **corriente en modo común** corresponde a una componente indeseada en la que las corrientes en ambos conductores fluyen en el mismo sentido respecto a una referencia común, típicamente el plano de tierra o la estructura del sistema. La corriente en modo común se define como:

$$I_{CM} = \frac{I_1 + I_2}{2} \quad (2.13)$$

La corriente en modo común es particularmente crítica desde el punto de vista de la compatibilidad electromagnética, ya que suele circular por trayectorias de retorno de alta impedancia y grandes áreas de bucle, lo que incrementa significativamente la radiación electromagnética. Henry Ott señala que incluso pequeñas corrientes en modo común pueden generar niveles elevados de emisión radiada, convirtiéndose en una de las principales fuentes de interferencia electromagnética en sistemas electrónicos prácticos (Ott, 2009).

La presencia de desbalances geométricos, discontinuidades en el plano de referencia o acoplamientos asimétricos favorece la conversión de corriente en modo diferencial a modo común. Asimismo, valores no ideales de rechazo en modo común CMRR en los dispositivos electrónicos pueden facilitar la conversión y propagación de corriente en modo común, lo que hace indispensable su control en el diseño de sistemas bajo criterios de compatibilidad electromagnética.

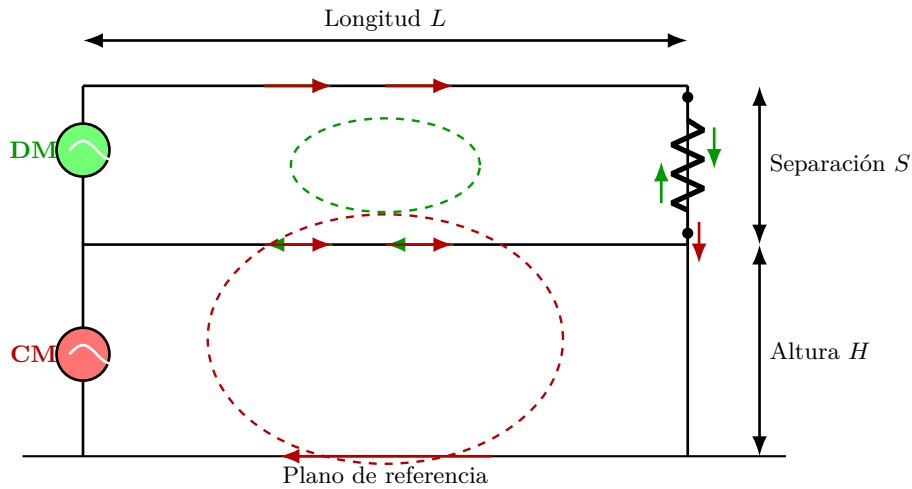


Figura 2.1: Representación conceptual de corrientes en modo diferencial (DM) y modo común (CM)

2.1.4. Tipos de acoplamiento electromagnético

1. Acoplamiento Capacitivo

Se produce cuando dos conductores están lo suficientemente cerca como para que una variación de voltaje en uno induzca una corriente en el otro a través de un campo eléctrico. Este fenómeno es común en cables o pistas de circuitos impresos. Una forma de reducir el acoplamiento capacitivo es mantener baja la impedancia del receptor o poder mantener en un nivel bajo la capacitación entre los agentes. ((Ott, 2009))

$$I_c = C_{12} \frac{dV}{dt} \quad (2.14)$$

Donde:

I_c es la corriente acoplada

C_{12} es la capacitancia mutua entre conductores.

$\frac{dV}{dt}$ es la variación de voltaje en el conductor que emite el campo

2. Acoplamiento Inductivo

Ocurre cuando un campo magnético variable generado por la corriente en un conductor induce una corriente en un conductor adyacente. Este tipo de acoplamiento es frecuente en transformadores y en situaciones donde cables o componentes están próximos entre sí, permitiendo la transferencia de energía sin conexión directa.

$$V_{ind} = M \frac{dI}{dt} \quad (2.15)$$

Donde:

V_{ind} es el voltaje inducido

M es la inductancia mutua entre los conductores

$\frac{dI}{dt}$ es la razón de cambio de la corriente en el conductor fuente

Este tipo de acoplamiento se presenta especialmente en cables que transportan señales en entornos electromagnéticamente ruidosos, como aquellos donde varias líneas de señal o alimentación se agrupan sin blindaje o control de trayectorias de retorno. Las perturbaciones pueden alterar el comportamiento normal del sistema, propagándose a través de cables hacia otros módulos o dispositivos conectados.

El fenómeno se intensifica cuando los conductores tienen trayectorias de retorno largas, formando lazos de área significativa. En estos casos, la inducción mutua puede ser considerable y debe mitigarse reduciendo el área de bucle, usando pares trenzados o ubicando el retorno junto a la señal. ((Ott, 2009))

3. Acoplamiento por impedancia común

Este tipo de acoplamiento ocurre cuando existe una conexión eléctrica directa entre dos circuitos que comparten una misma ruta de retorno, la cual presenta una impedancia significativa. Este fenómeno puede entenderse como una forma de acoplamiento por conducción, ya que involucra el flujo de corriente a través de una trayectoria común, como líneas de alimentación o planos de referencia.

Cuando múltiples corrientes circulan por una ruta compartida, se genera una caída de voltaje. Este efecto puede modelarse como un divisor de voltaje, donde la impedancia común introduce una perturbación proporcional a la suma de las corrientes involucradas, dando lugar a EMI en señales adyacentes.

Este fenómeno es relevante en sistemas eléctricos o electrónicos que integran múltiples subsistemas interconectados físicamente a través de cables o planos de tierra o alimentación, y puede presentarse tanto en modo común como en modo diferencial ((Soni, 2023)).

(Ott, 2009) formaliza este fenómeno mediante la siguiente expresión:

$$V_{L1} = V_{S1} + Z_G(I_1 + I_2) \quad (2.16)$$

²Ley de inducción de Faraday que describe la inductancia mutua

Donde:

V_{L1} es el voltaje medido en la carga del circuito 1.

V_{S1} es el voltaje de la fuente del circuito 1.

Z_G es la impedancia común compartida.

I_1 e I_2 son las corrientes de los circuitos 1 y 2, respectivamente.

Este acoplamiento es crítico cuando existe una tierra de alta impedancia, cuando circulan corrientes elevadas en un conductor común o en presencia de circuitos con márgenes de ruido muy bajos.

4. Acoplamiento Radiado

Se puede entender como una forma de transferencia sin contacto donde la energía electromagnética viaja a través del espacio libre desde una fuente emisora hacia un receptor, principalmente en la región de campo lejano previamente definida, donde la propagación se describe como una onda electromagnética transversal.

Este fenómeno se vuelve relevante cuando las dimensiones de los conductores se vuelven comparables a una fracción significativa de la longitud de onda de una señal, propiciando que su comportamiento sea comparable al de una antena. Según (Weston, 2016), cuando un conductor de longitud l se encuentra expuesto a un campo eléctrico uniforme E , el voltaje inducido entre sus extremos se aproxima mediante:

$$V_{ind} = E \cdot l \quad (2.17)$$

Donde:

V_{ind} es el voltaje inducido en el conductor.

E es la intensidad de campo eléctrico incidente sobre el conductor.

l es la longitud efectiva del conductor expuesto al campo.

Desde un punto de vista físico, este mecanismo de acoplamiento puede modelarse como un *dipolo eléctrico* cuando el campo incidente es predominantemente eléctrico, ya que el conductor desarrolla una diferencia de potencial entre sus extremos. De manera análoga, cuando el campo incidente es principalmente magnético, el acoplamiento puede representarse como un *loop*, en la cual el flujo magnético variable que atraviesa el área del lazo induce una corriente conforme a la ley de Faraday.

Esta interpretación permite visualizar la geometría de las estructuras conductoras involucradas en el sistema como dipolos eléctricos y *loops* conductores, cuya longitud, área de lazo y orientación permiten relacionar, de manera cualitativa, la magnitud de la energía que se puede acoplar de forma radiada.

2.1.5. Blindaje electromagnético

El blindaje electromagnético es una de las técnicas más utilizadas para la mitigación de interferencia electromagnética en sistemas eléctricos y electrónicos. Su principio de funcionamiento se basa en la interposición de una barrera conductora o magnética entre una fuente de interferencia y un receptor susceptible, con el objetivo de reducir la energía electromagnética que logra atravesar dicha barrera. Esta reducción se produce como resultado de la reflexión de la onda incidente en la superficie del blindaje y de la atenuación que sufre la porción de la onda que logra penetrar en el material (Ott, 2009).

Cuando una onda electromagnética incide sobre un blindaje metálico, parte de su energía es reflejada debido a la discontinuidad de impedancias entre el medio incidente y el material del blindaje, mientras que la fracción transmitida se atenúa exponencialmente conforme se propaga a través del espesor del material como consecuencia de las pérdidas óhmicas asociadas a las corrientes inducidas. Henry Ott señala que la efectividad total del blindaje puede expresarse como la suma de tres contribuciones fundamentales: la pérdida por absorción, la pérdida por reflexión y un término de corrección que toma en cuenta el efecto de reflexiones múltiples dentro del material, como se muestra en la ecuación (2.18) (Ott, 2009). En dicha expresión, A

representa la pérdida por absorción, R la pérdida por reflexión y B el factor de corrección asociado a las reflexiones múltiples en blindajes delgados. Todos los términos se expresan en decibeles.

De este modo, la efectividad total de blindaje S se expresa en decibeles como:

$$S = A + R + B \text{ dB} \quad (2.18)$$

En el caso de blindajes suficientemente gruesos, el término de corrección por reflexiones múltiples puede despreciarse, ya que la onda electromagnética se atenúa de manera significativa antes de alcanzar nuevamente la segunda interfaz del material. Sin embargo, cuando el blindaje es delgado en comparación con la profundidad de penetración, las reflexiones internas adquieren relevancia y deben ser consideradas explícitamente en el análisis.

La Figura 2.2 ilustra el fenómeno de reflexiones múltiples en un blindaje delgado. En esta situación, la onda transmitida en la primera interfaz se refleja repetidamente entre las superficies internas del material antes de emerger por el lado opuesto. Como se observa, parte de la energía es transmitida en cada reflexión, lo que reduce la efectividad total del blindaje con respecto a la estimada únicamente a partir de las pérdidas por reflexión y absorción (Ott, 2009).

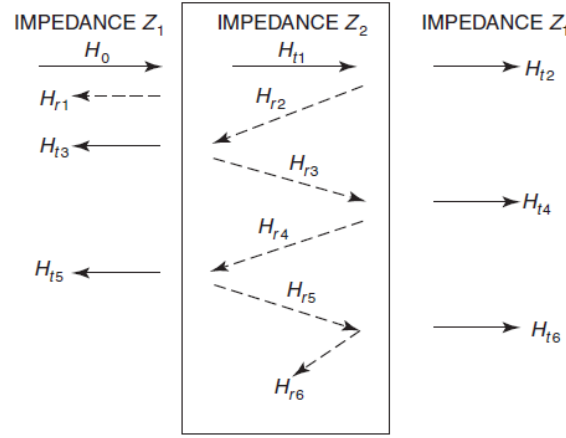


Figura 2.2: Reflexiones múltiples en un blindaje delgado. La onda electromagnética incidente se propaga a lo largo de la coordenada z y atraviesa un material conductor de espesor h . Dentro del blindaje, parte de la onda se refleja repetidamente entre las superficies antes de ser transmitida o absorbida (Ott, 2009).

Ott destaca que, para campos eléctricos y ondas planas, la mayor parte de la onda incidente es reflejada en la primera interfaz del blindaje, por lo que el efecto de las reflexiones múltiples internas puede despreciarse en la mayoría de los casos. En contraste, para campos magnéticos de baja impedancia, una fracción significativa de la onda penetra inicialmente en el blindaje, lo que hace que el efecto de las reflexiones múltiples sea relevante y deba ser considerado para estimar correctamente la efectividad del blindaje (Ott, 2009).

Este análisis explica que la efectividad de un blindaje no depende únicamente del material empleado, sino también del tipo de campo incidente, de la frecuencia de operación y del espesor del blindaje en relación con la profundidad de penetración.

2.1.6. Definición de interferencia electromagnética (EMI) y compatibilidad electromagnética (EMC)

Como se mencionó anteriormente, los sistemas eléctricos y electrónicos presentan diversas características que dan lugar a la generación de ondas electromagnéticas con propiedades variables. En este contexto, resulta fundamental precisar algunos conceptos clave.

Retomando la naturaleza de estos sistemas, es importante reconocer la presencia de señales electromagnéticas no deseadas que pueden afectar su funcionamiento, conocidas como interferencia electromagnética (EMI), por sus siglas en inglés (Ott, 2009).

De manera complementaria, la compatibilidad electromagnética (EMC) se define como “la capacidad de un dispositivo, equipo o sistema para funcionar satisfactoriamente en su entorno electromagnético sin introducir perturbaciones electromagnéticas intolerables en dicho entorno” (Ott, 2009).

Por este motivo es necesario crear un sistema electromagnéticamente compatible, entendemos a la EMC, como la capacidad de un sistema eléctrico o electrónico para operar correctamente en un entorno electromagnético sin generar perturbaciones que afecten a otros sistemas y a sí mismo. ((Ott, 2009))

Es importante precisar que la interferencia electromagnética no se puede eliminar en su totalidad, sin embargo, es posible hacer que sus niveles de emisión no sean significativos y los sistemas puedan operar correctamente. Se deben crear sistemas poco susceptibles a interferencias electromagnéticas. Entendemos a la susceptibilidad como la capacidad de un sistema, aparato o circuito a responder a energía electromagnética no deseada ((Ott, 2009)). Esperamos entonces que los sistemas diseñados sean inmunes a las perturbaciones.

2.1.7. Jerarquía de nivel

En el diseño de sistemas eléctricos y electrónicos, es fundamental comprender las características y funciones de cada una de sus partes. Sin embargo, para aplicar una metodología de diseño efectiva bajo criterios de EMC es necesario establecer claramente los distintos niveles jerárquicos involucrados.

En el contexto de la compatibilidad electromagnética, se recomienda estructurar la estrategia de mitigación de EMI considerando diferentes niveles de integración. Un sistema electrónico puede estar conformado por tarjetas de circuito impreso, cableado, conectores, una estructura física que los contiene, etc. Cada uno de estos elementos presenta distintos tipos acoplamiento electromagnético

En este sentido, se identifican tres niveles principales de intervención:

1. **Componente:** Corresponde típicamente a una tarjeta de circuito impreso, la cual integra múltiples señales; analógicas, digitales, de potencia o RF. En este nivel es crítico analizar las características espectrales de las señales, la geometría y la disposición de planos de referencia.
2. **Subsistema:** Agrupa varios componentes interconectados; PCBs, fuentes, módulos de comunicación, etc. Alojados dentro de una misma unidad funcional. Aquí cobran relevancia las interacciones entre subsistemas como la gestión de referencias compartidas.
3. **Sistema:** Representa la integración total del conjunto de subsistemas dentro de una carcasa, gabinete o instalación. En este nivel, se evalúa la efectividad de las medidas de blindaje, la continuidad de referencias y la mitigación de interferencia ya sea radiada o conducida entre subsistemas.

El diseño por jerarquía de nivel en compatibilidad electromagnética permite abordar la mitigación de EMI de manera estructurada, desde el nivel de circuito impreso hasta la integración de sistemas completos, como se describe en (Ott, 2009), (Weston, 2016) y (Garcés & Silva, 2018).

““latex

2.2. Marco regulatorio y normatividad aplicable

El diseño de sistemas electrónicos para plataformas aeroespaciales, incluyendo cohetes experimentales, requiere garantizar la compatibilidad electromagnética EMC mediante la aplicación de normas y estándares que aseguren la integridad funcional de los subsistemas y su adecuada coexistencia electromagnética dentro de un mismo entorno.

En el presente trabajo, enfocado en el diseño y análisis de EMC implementado en la bahía de aviónica del cohete experimental Xitle II, la normatividad se aborda con un enfoque aplicado. Es importante destacar que el objetivo central no es la certificación formal del sistema bajo una norma específica, sino la validación de una **metodología de diseño EMC**.

En este contexto, los ensayos de compatibilidad electromagnética no se emplean como un proceso de cumplimiento normativo estricto, sino como una herramienta experimental para corroborar que la metodología propuesta es consistente, reproducible y aplicable a sistemas reales.

Debido a la naturaleza experimental del proyecto y a la ausencia de normativas específicas ampliamente adoptadas para coherencia experimental académica, se adopta un enfoque híbrido que integra:

- Normas aeroespaciales como referencia conceptual y de alto nivel.
- Normas internacionales de otros sectores como lo son el industrial, médico, automotriz, etc. Usando estas como base metodológica para ensayos y criterios de diseño.

Este enfoque permite trasladar prácticas consolidadas de ingeniería EMC al contexto de la coherencia experimental, donde la disponibilidad de infraestructura y estándares específicos es limitada.

La implementación de medidas para lograr la compatibilidad electromagnética, incluyendo aquellas sustentadas en diseños teóricos, debe verificarse experimentalmente mediante ensayos estandarizados. Una prueba de compatibilidad electromagnética tiene como objetivo evaluar si un equipo bajo prueba (*Equipment Under Test*, EUT) cumple con los límites de emisión electromagnética establecidos por una norma y, de manera complementaria, si posee la inmunidad necesaria para operar correctamente en presencia de perturbaciones electromagnéticas externas.

De manera general, una prueba de EMC se realiza configurando el EUT en un estado de operación representativo de su uso normal, conectándolo mediante cableado típico y alimentándolo bajo condiciones controladas. El equipo se coloca en un entorno de medición normalizado —como una cámara semianecoica, una cámara anecoica o un área de prueba en campo abierto— y se utilizan instrumentos calibrados, tales como analizadores de espectro, receptores EMI, antenas y redes de estabilización de impedancia (LISN) para los EUT que son alimentados con la red eléctrica, según el tipo de ensayo.

Las pruebas se dividen principalmente en dos categorías:

1. **Ensayos de emisiones:** evalúan la energía electromagnética generada por el equipo.
2. **Ensayos de inmunidad:** verifican la capacidad del sistema para operar sin degradación ante perturbaciones externas.

Los procedimientos que involucran las configuraciones geométricas, distancias de medición, rangos de frecuencia y criterios de aceptación están definidos de manera precisa en las normas aplicables, lo que garantiza la repetibilidad de los resultados entre distintos laboratorios.

A partir de esta clasificación general, la normatividad se organiza en función del tipo de fenómeno evaluado: emisiones radiadas, emisiones conducidas, inmunidad radiada, inmunidad conducida, descargas electrostáticas, criterios de instalación y diseño EMC, y normas de gestión EMC aplicables a sistemas aeroespaciales.

2.2.1. Normatividad relacionada con la compatibilidad electromagnética

La compatibilidad electromagnética es un concepto ampliamente estudiado y aplicado, no solo en la industria aeroespacial. Sus orígenes, estudio y aplicación están estrechamente relacionados con la robustez de los sistemas. Por ello, existen regulaciones, normas y estándares en diversos sectores como la industria, los equipos médicos, los equipos comerciales, etc. Es importante conocer cada una de estas normativas para poder abordar con precisión el diseño y la corrección de fallas en sistemas eléctricos o electrónicos.

Normas para emisiones radiadas y conducidas

CISPR 11: Equipos industriales, científicos y médicos – Características de perturbación por radiofrecuencia La norma CISPR 11, publicada por la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC), establece los requisitos de EMC relacionados con las emisiones de radiofrecuencia generadas por equipos de uso industrial, científico y médico (ISM). Su propósito es asegurar que dichos equipos no generen interferencias electromagnéticas perjudiciales en redes eléctricas, sistemas de comunicación o dispositivos electrónicos cercanos.

Este estándar se aplica tanto a emisiones intencionales como a emisiones no intencionales originadas por el funcionamiento interno de equipos electrónicos, incluyendo osciladores, fuentes conmutadas o microcontroladores. CISPR 11 clasifica los equipos en Clase A (uso en entornos industriales y comerciales) y Clase B (uso en entornos cotidianos).

La norma establece límites específicos para emisiones conducidas en el rango de 150 kHz a 30 MHz, y para emisiones radiadas entre 30 MHz y 1 GHz. Además, define métodos de medición normalizados para evaluar estas perturbaciones.³

EN 55022: Equipos de tecnología de la información: Límites y métodos de medición de perturbaciones radioeléctricas La norma EN 55022 establece los límites y métodos de medición de emisiones electromagnéticas generadas por equipos de tecnología de la información (*Information Technology Equipment*, ITE). Esta norma es la adopción europea del estándar CISPR 22 y fue ampliamente utilizada como referencia para la evaluación de emisiones conducidas y radiadas en equipos electrónicos comerciales.

Uno de los métodos de ensayo más comunes definidos en la EN 55022 es la medición de emisiones radiadas mediante el procedimiento *CPQP* (*Continuous Peak Quasi-Peak*), realizado a una distancia normalizada de 3 m entre el EUT y la antena receptora. En este método, el equipo bajo prueba se coloca sobre una mesa no conductora, a una altura especificada, y se mide el nivel de campo eléctrico radiado mientras se varía la polarización y la altura de la antena para capturar el peor caso de emisión.

El rango típico de frecuencia evaluado en emisiones radiadas bajo esta norma es de 30 MHz a 1 GHz, y los límites de aceptación dependen de la clasificación del equipo (Clase A o Clase B). El uso del detector cuasi-pico permite evaluar no solo la amplitud de la señal emitida, sino también su contenido temporal, lo cual resulta representativo del impacto real de la interferencia sobre otros sistemas electrónicos cercanos.

Aunque la EN 55022 ha sido reemplazada formalmente por la EN 55032, su metodología de medición, particularmente el ensayo CPQP a 3 m, continúa siendo una referencia técnica relevante y ampliamente documentada en laboratorios de compatibilidad electromagnética.

Normas para inmunidad radiada y conducida

IEC 60601-1-2:2014 – Equipo Eléctrico Médico La norma IEC 60601-1-2 especifica los requisitos de EMC para equipos y sistemas médicos eléctricos. Su objetivo es asegurar que estos dispositivos funcionen correctamente en entornos con presencia de interferencias electromagnéticas y, al mismo tiempo, que no generen perturbaciones que afecten a otros equipos.

■ Inmunidad de puertos de señal.

La norma exige que los puertos de señal de los equipos médicos sean inmunes a diversos fenómenos eléctricos y electromagnéticos, incluyendo ESD, transitorios rápidos, sobretensiones y perturbaciones conducidas inducidas por campos de RF. Los ensayos deben realizarse según el entorno de uso (profesional o doméstico).

Cuadro 2.2: Puertos de señal I/O – Niveles de inmunidad según la norma IEC 60601-1-2

Fenómeno	Norma EMC	Entorno profesional	Entorno doméstico
Descarga electrostática	IEC 61000-4-2	± 8 kV contacto, ± 2 – ± 15 kV aire	Igual
Transitorios rápidos	IEC 61000-4-4	± 1 kV, 100 kHz	Igual
Sobretensiones	IEC 61000-4-5	± 2 kV	Igual
Perturbaciones conducidas	IEC 61000-4-6	3 V; 6 V (ISM ¹), 80 % AM	Igual

³Este estándar no cuenta con una versión gratuita completa, por lo que no se incluyen los niveles de prueba.

¹ISM: banda industrial, científica y médica.

- Inmunidad a RF inalámbrica.

Los equipos deben ser inmunes a señales de RF emitidas por dispositivos cercanos, como teléfonos móviles, enrutadores Wi-Fi, dispositivos Bluetooth o transmisores de baja potencia. El ensayo se realiza aplicando señales pulsadas a frecuencias específicas, con potencias y distancias normalizadas.

Cuadro 2.3: Inmunidad a RF inalámbrica según la norma IEC 60601-1-2:2014

Frecuencia (MHz)	Banda (MHz)	Servicio	Modulación	Potencia (W)	Nivel (V/m)
385	380–390	TETRA 400	Pulsos 18 Hz	1.8	27
450	430–470	GMRS/FRS 460	FM ± 5 kHz	2.0	28
710	704–787	LTE Band 13/17	Pulsos 217 Hz	0.2	9
810	800–960	GSM/CDMA	Pulsos 18 Hz	2.0	28
1720	1700–1990	UMTS	Pulsos 217 Hz	2.0	28
2450	2400–2570	WLAN/Bluetooth	Pulsos 217 Hz	2.0	28
5785	5100–5800	WLAN 802.11a/n	Pulsos 217 Hz	0.2	9

La aplicación de descargas por contacto y por aire, la evaluación de la inmunidad en puertos de señal, y las pruebas de resistencia a variaciones de voltaje verifican la robustez del equipo y reflejan su preparación para operar sin interrupciones en contextos clínicos. Dado que una falla puede comprometer la salud del paciente, el desempeño del equipo es vital en todo momento, tanto para los operadores como para los usuarios.

ISO 11452-1:2005 Vehículos de carretera: métodos de ensayo para inmunidad ante perturbaciones electromagnéticas radiadas en banda estrecha – Parte 1: Principios generales y terminología

La norma ISO 11452-1:2005 establece los principios generales, condiciones de prueba, configuraciones y la terminología para ensayos de inmunidad electromagnética en componentes electrónicos de vehículos de carretera, frente a perturbaciones electromagnéticas radiadas de banda estrecha.

Durante las pruebas, se aplican señales moduladas; onda continua *CW*, modulación en amplitud *AM* y modulación en fase *PM*, en un rango de frecuencias de 10 kHz hasta 18 GHz. Se definen frecuencias escalonadas y tiempos mínimos de permanencia de la señal en cada frecuencia.

Además, la norma introduce un sistema de clasificación del comportamiento funcional (*FPSC*) de los equipos ante perturbaciones electromagnéticas, con los siguientes niveles:⁴

Cuadro 2.4: Clases de comportamiento funcional definidas en ISO 11452-1:2005

Clase	Descripción
A	Funcionamiento normal sin degradación.
B	Funcionamiento dentro de tolerancias; recuperación automática.
C	Mal funcionamiento temporal, recuperable sin daño permanente.
D	Falla que requiere intervención del usuario.
E	Daño permanente (no recuperable).

Normas para descargas electrostáticas

IEC 61000-4-2: Técnicas de prueba y medición – Ensayo de inmunidad a descargas electrostáticas

La norma IEC 61000-4-2:2008 establece los métodos de ensayo y los requisitos de inmunidad de equipos eléctricos y electrónicos frente a las descargas electrostáticas ESD. Las descargas electrostáticas pueden provenir de cualquier fuente (de otros equipos, de algún material o incluso del operador), por lo que dotar a los equipos de resistencia a estas descargas es crucial. Esta norma, publicada por la Comisión Electrotécnica

⁴Este estándar no cuenta con una versión gratuita completa, por lo que no se incluyen los niveles de prueba.

Internacional (IEC), describe cómo evaluar el comportamiento funcional de los equipos cuando se someten o están expuestos a descargas electrostáticas, ya sea por contacto directo o por descarga en el aire desde el operador o su entorno.

Parámetros relevantes en las pruebas de descargas electrostáticas:

Cuadro 2.5: Niveles de prueba según la norma IEC 61000-4-2

Descarga por contacto		Descarga por aire	
Nivel	Tensión de prueba (kV)	Nivel	Tensión de prueba (kV)
1	2	1	2
2	4	2	4
3	6	3	8
4	8	4	15
x^a	Especial	x^a	Especial

Cuadro 2.6: Especificaciones generales del generador ESD según IEC 61000-4-2

Parámetros	Valores
Voltaje de salida, modo de descarga por contacto (ver Nota 1)	Al menos 1 kV hasta 8 kV, nominal
Voltaje de salida, modo de descarga por aire (ver Nota 1)	Al menos 2 kV hasta 15 kV, nominal (ver Nota 3)
Tolerancia del voltaje de salida	$\pm 5\%$
Polaridad del voltaje de salida	Positiva y negativa
Tiempo de retención	≥ 5 s
Modo de operación de la descarga	Descargas individuales (ver Nota 2)

Nota 1. Voltaje en circuito abierto medido en el electrodo de descarga del generador ESD.

Nota 2. El generador debe ser capaz de generar una tasa de repetición de al menos 20 descargas por segundo con fines exploratorios.

Nota 3. No es necesario utilizar un generador con capacidad de descarga por aire de 15 kV si el voltaje máximo de prueba a usar es menor.

Cuadro 2.7: Parámetros de la forma de onda de corriente de descarga por contacto definidos en IEC 61000-4-2

Nivel	Voltaje (kV)	Pico de corriente (A)	t_r (ns)	Corriente 30 ns (A)	Corriente 60 ns (A)
1	2	7.5	0.8	4	2
2	4	15	0.8	8	4
3	6	22.5	0.8	12	6
4	8	30	0.8	16	8

El punto de referencia para medir el tiempo a 30 ns y 60 ns es el instante en que la corriente alcanza por primera vez el 10 % del primer pico.

Nota. El tiempo de subida t_r es el intervalo entre el 10 % y el 90 % del pico de corriente.

Una de las particularidades de la norma IEC 61000-4-2 es que las descargas directas solo se aplican a superficies

accesibles durante el uso normal del equipo, excluyendo aquellas a las que solo se accede en mantenimiento, servicio o después de la instalación. Los conectores se prueban según el tipo de carcasa y cubierta.

IEC 60601-1-2:2014 – Ensayo de descarga electrostática en equipo eléctrico médico Dentro de la norma IEC 60601-1-2 también se considera el ensayo de descarga electrostática (*ESD*). La descarga electrostática es un fenómeno que ocurre cuando se transfiere una carga eléctrica entre cuerpos con diferente potencial. En equipos médicos, puede generarse al tocar carcasas metálicas, conectores, botones o superficies expuestas. El ensayo tiene como fin verificar que el dispositivo mantiene su funcionamiento (o se recupera sin daño permanente) tras recibir descargas directas o indirectas.

- **Descargas directas:** se aplican sobre superficies accesibles del equipo al usuario, ya sea mediante contacto físico en partes metálicas o mediante descarga por aire sobre materiales no conductores.
- **Descargas indirectas:** se aplican a planos metálicos cercanos para simular el efecto de una descarga hacia objetos próximos al equipo.

Durante la prueba se utilizan generadores de ESD calibrados, con puntas específicas (punta de contacto o punta tipo dedo redondeada). Se aplican como mínimo 10 descargas individuales por polaridad en cada punto de prueba. Cada descarga debe repetirse con un intervalo suficiente (1 s o más) y en condiciones realistas de uso.

Cuadro 2.8: Niveles de prueba de descarga electrostática según la norma IEC 60601-1-2:2014

Nivel	Descarga por contacto (kV)	Descarga por aire (kV)
1	±2	±2
2	±4	±4
3	±6	±8
4	±8	±15
x	Especificado por el fabricante	Especificado por el fabricante

2.2.2. Regulación en la industria aeroespacial

A pesar de que la industria aeroespacial lleva más de medio siglo de desarrollo, la adopción y desarrollo de regulaciones en torno a ella es limitada en algunos países. En el caso de países en vías de desarrollo, como México, el diseño y fabricación de componentes espaciales requiere la consulta y adopción de normativas y estándares internacionales que aseguren el desempeño de los sistemas espaciales. A lo largo del tiempo, estos estándares han sido adaptados para permitir el desarrollo de productos espaciales confiables y robustos. A continuación, se presenta la normativa asociada al sector aeroespacial, abarcando desde aeronaves hasta lanzadores, tanto en el ámbito internacional como en el nacional.

Normas aeroespaciales de ensayo y verificación EMC

MIL-STD-461E: Norma de interfaz del Departamento de Defensa – Requisitos para el control de las características de interferencia electromagnética de subsistemas y equipos La norma MIL-STD-461E, titulada “Requisitos para el Control de las Características de Interferencia Electromagnética de Subsistemas y Equipos”, fue emitida por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos el 20 de agosto de 1999. Esta versión establece requisitos uniformes para el control de la interferencia electromagnética (EMI) en equipos y subsistemas utilizados en entornos militares. El objetivo principal de la MIL-STD-461E es garantizar que los equipos electrónicos, eléctricos y electromecánicos operen sin provocar interferencias electromagnéticas ni ser susceptibles a las mismas dentro de sistemas militares complejos. Esta norma es aplicable a sistemas terrestres, aéreos, marítimos y espaciales.

La MIL-STD-461E detalla procedimientos de prueba y límites para diversas categorías de emisiones y susceptibilidades electromagnéticas:

- Emisiones conducidas (CE): Evalúa las emisiones no deseadas transmitidas a través de los cables de alimentación y de señal.
- Susceptibilidad conducida (CS): Pruebas para determinar la inmunidad del equipo a señales electromagnéticas introducidas por los cables.
- Emisiones radiadas (RE): Medición de las emisiones electromagnéticas irradiadas al espacio desde el equipo.
- Susceptibilidad radiada (RS): Ensayos para verificar la inmunidad del equipo frente a campos electromagnéticos radiados.

Cuadro 2.9: Resumen de límites de EMI/EMC según MIL-STD-461E

Tipo de prueba	Designación	Rango de frecuencia	Nivel típico (límite)
Emisión conducida (alimentación)	CE101	30 Hz – 10 kHz	$\leq 100 \text{ dB}\mu\text{V}$ (según plataforma)
Emisión conducida (alimentación y señal)	CE102	10 kHz – 10 MHz	$\leq 70 \text{ dB}\mu\text{V}$ (límite variable)
Emisión radiada (campo magnético)	RE101	30 Hz – 100 kHz	$\leq 100 \text{ dBpT}$ (según equipo)
Emisión radiada (campo eléctrico)	RE102	10 kHz – 18 GHz	$\leq 60 \text{ dB}\mu\text{V/m}$ a 1 m
Susceptibilidad conducida (alimentación)	CS101	30 Hz – 150 kHz	6 V _{rms} (mínimo típico)
Susceptibilidad conducida (acoplamiento común)	CS114	10 kHz – 200 MHz	114 dB μV (corriente inyectada)
Susceptibilidad transitoria (acoplada)	CS115	Pulso $\sim 5 \text{ ns}$	300 mA (pico transitorio)
Susceptibilidad transitoria (ráfaga)	CS116	10 kHz – 100 MHz	0.2 A (en ráfaga)
Susceptibilidad radiada (campo eléctrico)	RS103	2 MHz – 40 GHz	30–200 V/m (según banda de frecuencia)

RTCA DO-160G: Condiciones ambientales y procedimientos de prueba para equipos aerotransportados La RTCA DO-160G, titulada “Condiciones Ambientales y Procedimientos de Prueba para Equipos Aerotransportados”, fue publicada en diciembre de 2010 por la *Radio Technical Commission for Aeronautics* (RTCA). Esta norma establece procedimientos estandarizados para evaluar el desempeño ambiental de equipos electrónicos destinados a aeronaves, abarcando desde aviones ligeros de aviación general hasta grandes aeronaves comerciales (RTCA, 2018).

El objetivo de la DO-160G es asegurar que los equipos aerotransportados puedan operar de manera segura y efectiva bajo diversas condiciones ambientales a las que podrían estar expuestos durante su vida útil. La norma DO-160G es reconocida internacionalmente y se utiliza como referencia para la certificación de equipos aeronáuticos.

Normas de compatibilidad electromagnética para sistemas espaciales

ISO 14302:2002 – Sistemas espaciales — Requisitos de compatibilidad electromagnética Esta norma internacional establece los requisitos de compatibilidad electromagnética que deben cumplir los sistemas espaciales, incluyendo satélites, vehículos espaciales y sus subsistemas electrónicos. Su propósito es asegurar que todos los componentes de un sistema espacial puedan operar sin interferencias electromagnéticas (EMI) dentro del entorno electromagnético previsto.

Principales aspectos de la norma:

- Requisitos de compatibilidad electromagnética (EMC).
- Metodología para derivar requisitos.
- Ensayos y validación.
- Aplicación en la industria espacial.

ECSS-E-ST-20-07C: Ingeniería espacial – Compatibilidad electromagnética La norma ECSS-E-ST-20-07C, titulada “Ingeniería espacial – Compatibilidad electromagnética”, define los requisitos de compatibilidad electromagnética para vehículos espaciales, lanzadores y sistemas en tierra. Su objetivo es garantizar que los diferentes sistemas eléctricos y electrónicos funcionen sin interferencias dentro del entorno electromagnético en misiones espaciales (ECSS, 2008).

La norma aborda los siguientes aspectos:

- Emisiones electromagnéticas (EME).
- Susceptibilidad electromagnética (EMS).
- Descargas electrostáticas (ESD).
- Compatibilidad con radiofrecuencia.
- Puesta a tierra y conexiones eléctricas.

Cuadro 2.10: Resumen de niveles de prueba EMC según ECSS-E-ST-20-07C

Tipo de prueba	Rango de frecuencia	Parámetro clave	Nivel típico	Observaciones
CE (Emisión conducida)	30 Hz – 100 MHz	$\text{dB}\mu\text{V}$	$\leq 66 \text{ dB}\mu\text{V}$	Medido con LISN
RE (Emisión radiada)	30 MHz – 18 GHz	$\text{dB}\mu\text{V/m}$	40–60 $\text{dB}\mu\text{V/m}$	Antenas biconilog y log-periódica
CS (Susceptibilidad conducida)	30 Hz – 100 MHz	$\text{dB}\mu\text{V}$	120–130 $\text{dB}\mu\text{V}$	Inyección directa en cables
RS (Susceptibilidad radiada)	30 MHz – 18 GHz	V/m	30–200 V/m	Polarización H/V
ESD	Transitorio	kV/A	$\pm 2\text{--}15 \text{ kV}$	Según IEC 61000-4-2
Campo magnético DC	0 Hz	A/m	$\leq 1 \text{ A/m}$	Cargas sensibles

Normas de puesta a tierra y *bonding*

NASA-STD-4003: Puesta en común eléctrica para vehículos de lanzamiento, naves espaciales, cargas útiles y equipos de vuelo El estándar NASA-STD-4003 (emitido en 2003) define los requerimientos básicos de *bonding* (puesta a tierra y conexiones eléctricas) para vehículos de lanzamiento, naves espaciales, cargas útiles y equipos de vuelo. Este estándar especifica cómo se deben realizar las conexiones eléctricas entre los subsistemas, y clasifica dichas conexiones según su propósito y requisitos específicos.

Normatividad mexicana para sistemas espaciales

NMX-AE-003-SCFI-2021: Sistemas Espaciales – Requisitos de Compatibilidad Electromagnética La Norma Mexicana NMX-AE-003-SCFI-2021, titulada “Sistemas Espaciales - Requisitos de Compatibilidad Electromagnética”, establece requisitos de rendimiento para garantizar la compatibilidad electromagnética (EMC) en sistemas espaciales. Asimismo, define lineamientos para derivar requisitos a nivel de equipo a partir de requisitos a nivel sistema (Secretaría de Economía, 2022a).

De acuerdo con el Catálogo Mexicano de Normas, la **dependencia** asociada a esta NMX es la **Agencia Espacial Mexicana (AEM)** y el **comité que desarrolló la norma** fue el **Comité Técnico de Normalización Nacional del Espacio (COTENNE)** (Secretaría de Economía, 2022a). En el Programa Nacional de Normalización (edición DOF 23/08/2021) se identifica al COTENNE y se reporta, para ese instrumento de planeación, la presidencia del comité a cargo del Dr. Dionisio Manuel Tun Molina, además de registrar el proyecto PROY-NMX-AE-003-SCFI-2019 relacionado con el desarrollo de esta norma (Secretaría de Economía, 2021b).

Adicionalmente, la AEM reporta esfuerzos conjuntos con la Secretaría de Economía para la publicación de Normas Mexicanas vinculadas al sector espacial, incluyendo la NMX-AE-003-SCFI-2021 (Agencia Espacial Mexicana, 2022).

Desde una perspectiva técnica, la NMX-AE-003-SCFI-2021 adopta un enfoque de gestión de la compatibilidad electromagnética a nivel sistema, alineado con prácticas internacionales del sector espacial. De acuerdo con lo documentado por (Ferrer-Pérez et al., 2023), la norma no establece límites numéricos específicos de emisiones o susceptibilidad electromagnética, sino que proporciona un marco metodológico para la definición, asignación y verificación de requisitos EMC en función del entorno electromagnético, el perfil de misión y las características operativas del sistema espacial. Este enfoque permite que los criterios de prueba y los niveles de aceptación sean derivados de manera coherente durante las fases de diseño, integración y verificación, manteniendo compatibilidad con estándares internacionales de referencia en compatibilidad electromagnética para sistemas espaciales (Ferrer-Pérez et al., 2023). “

2.2.3. Infraestructura nacional para pruebas EMC

En México existen diversas instalaciones para la caracterización electromagnética, incluyendo cámaras anecoicas y celdas GTEM, utilizadas para la evaluación de emisiones e inmunidad.

Instituciones como la UNAM, el IPN y la Universidad de Colima cuentan con infraestructura que permite realizar ensayos EMC en condiciones controladas.

Relevancia en el proyecto: Estas instalaciones representan el tipo de entorno experimental en el que se pueden validar metodologías de diseño EMC en sistemas electrónicos complejos.

2.3. Historia y antecedentes de la cohetería en México

La cohetería es una disciplina que nace a inicios del siglo pasado, esta comienza de manera emergente con proyectos e implementaciones simples. Uno de los actores principales en la consolidación de la cohetería a nivel mundial es Robert Goddard, quien realizó los primeros acercamientos con motores sólidos y líquidos. No es hasta mediados del siglo pasado cuando la cohetería toma un papel muy importante a nivel científico, militar, económico e incluso político. Este impacto surge después de la segunda guerra mundial donde la comunidad científica se interesa en el desarrollo de cohetes y su gran potencial armamentístico.

La segunda guerra mundial trajo consigo demasiados cambios, pero uno de los más destacables fue el inicio de la carrera espacial, donde Estados Unidos y la entonces Unión Soviética, hoy Rusia, comenzaron una guerra por la obtención de la soberanía del espacio. La influencia de este hecho histórico impulso a la comunidad internacional a desarrollar sistemas espaciales, sin embargo, este avance tecnológico solo estaba en manos de aquellos que podían permitir solo, los países pobres y en vías de desarrollo como México se encontraba en desventaja frente a las grandes potencias las cuales contaban no solo con recursos monetarios sino poder político y mediático.

La influencia de estos acontecimientos provocó que el 28 de diciembre de 1957 se realizará el primer lanzamiento de un cohete experimental desde Cabo tuna, San Luis Potosí. Este proyecto fue desarrollado por

estudiantes de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, contaba con un combustible sólido conformado por zinc y azufre.

La industria aeroespacial mexicana continuó creciendo a pequeños pasos durante los finales de los años cincuenta, entre 1959 y 1961 se realizó el lanzamiento de los cohetes SCT-1 y SCT-2 los cuales eran réplicas de las bombas alemanas V2, este proyecto fue liderado por el Ingeniero Walter Cross Buchanan (Duarte, 2024).

Dado a los acontecimientos en el rubro académico y en la secretaría de comunicaciones y transportes en 1962 se creó la Comisión Nacional del Espacio Exterior que se encargaba de controlar y fomentar la explotación pacífica del espacio, este suceso tuvo lugar en el sexenio donde Adolfo Lopez Mateos era presidente de la república Mexicana. Entre los años 1962 y 1977 la CNEE lanzó diversos cohetes; Tototl, Mitl I, Mitl II, Tláloc. Estos cohetes fueron destinados a la investigación científica, en específico sobre la atmósfera terrestre. (A.E.M, s.f) A pesar de todos los avances en esta década, en 1973 se ordena la disolución de la CNEE, dando marcha atrás a los avances realizados. A pesar de estos contratiempos en la Universidad Nacional Autónoma de México se crea la Sociedad Universitaria de Cohetes Experimentales (SUCE), realizando pequeños vuelos en el valle de México entre 1969 y 1975.

Los avances en el ámbito de cohetes experimental fueron frenados hasta el siglo XXI donde varios acontecimientos fomentaron retomar la cohetes en el país. Uno de ellos fue la creación de la Agencia Espacial Mexicana, aunado a esto en 2018 se fundó una prefectura de Trípoli México y en 2019 se funda el primer equipo de cohetes experimental del país; CIUDSE. Dado a la movilidad en la cohetes y las acciones de Trípoli en el país se da lugar al primer Encuentro Nacional Mexicano de Ingeniería en Cohetes Experimental (ENMICE) fundado por el Ingeniero Ramón Córdova, Ing. Felipe Ávila, Mtro Ariel Gómez, Ing. Walter Ahrens y M.C. Jonathan Castillo ENMICE es una competencia de cohetes experimental de propulsión sólida donde es posible volar cohetes de motores comprados o hechos por estudiantes, principalmente.

Desde 2020 el crecimiento de la cohetes experimental ha sido considerable por lo que a través de los años se han formado diversos equipos de cohetes, uno de ellos, Propulsión UNAM. Propulsión UNAM es un equipo de cohetes experimental de la Universidad Nacional Autónoma de México, fue el primer equipo estudiantil de cohetes en desarrollar un cohete de propulsión híbrida.

La cohetes y la industria aeroespacial siguen creciendo en el país por lo que saber como desarrolla los subsistemas que cumplan con los requerimientos de esta industria se convierte en una necesidad plausible.

Propulsión UNAM

Propulsión UNAM es un equipo multidisciplinario de cohetes experimental fundado en 2020. El equipo se encarga de diseñar, manufacturar, probar y lanzar vehículos suborbitales con el fin de desarrollar tecnología espacial mexicana. El equipo se encarga de desarrollar vehículos de distintos apogeos que pueden ser de propulsión híbrida o sólida. A través de los años Propulsión UNAM ha participado en diversos concursos nacionales e internacionales, donde ha tenido un desempeño destacado particularmente, en 2024, Propulsión UNAM lanzó el primer cohete híbrido mexicano hecho totalmente por estudiantes 8m el cual hizo ganar el segundo lugar mundial en Spaceport America Cup SAC; la competencia de cohetes experimental más importante a nivel mundial. El equipo continúa trabajando para alcanzar el espacio.



Figura 2.3: Propulsión UNAM en Spaceport America Cup (SAC) 2024 antes de lanzar el Xitle II

Capítulo 3

Descripción del entorno electromagnético del cohete Xitle II

El desarrollo de vehículos aeroespaciales modernos requiere la integración de múltiples subsistemas electrónicos encargados de funciones críticas para el éxito de la misión. En particular, los cohetes experimentales de propulsión híbrida dependen de sistemas de monitoreo, control, actuación, adquisición de datos, telemetría y comunicaciones que deben operar de manera simultánea y coordinada durante todas las fases de la misión.

El cohete experimental Xitle II constituye un ejemplo de esta complejidad. Para llevar a cabo la secuencia de ignición, monitorear el desempeño del sistema de propulsión, transmitir información en tiempo real y ejecutar eventos críticos de vuelo, el vehículo incorpora diversos equipos electrónicos distribuidos entre la bahía de aviónica, el sistema de monitoreo y actuación, el sistema de recuperación y la estación terrena.

Desde la perspectiva de la compatibilidad electromagnética, resulta indispensable comprender tanto las características de los subsistemas que integran el vehículo como las condiciones del entorno donde operan.

Por ello, en este capítulo se presenta una descripción de los principales subsistemas que conforman el cohete Xitle II representados en la figura 3.1 donde se observan los elementos externos con los que interactúa, con el objetivo de caracterizar el entorno electromagnético del sistema y establecer el contexto necesario para el análisis de compatibilidad electromagnética desarrollado en los capítulos posteriores.

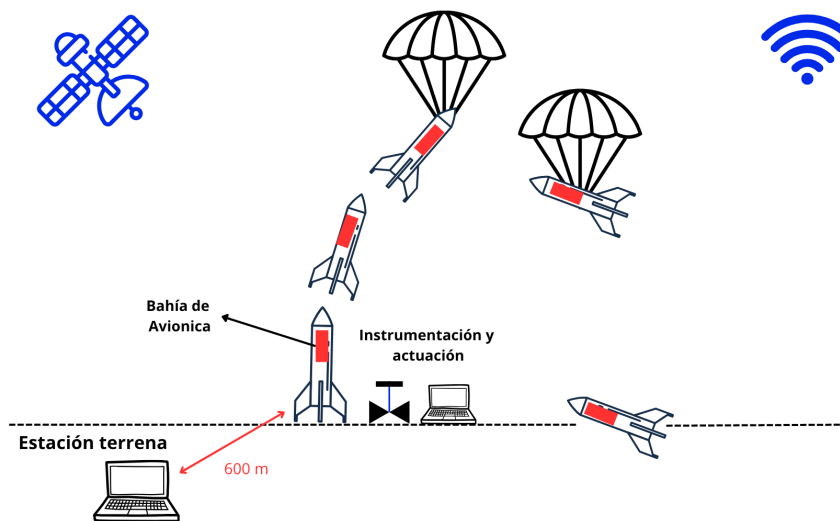


Figura 3.1: Ejemplificación simple del entorno electromagnético del cohete Xitle II: radiocomunicaciones terrestres, sistemas GPS y RF externos

3.1. Características de la cohetería experimental

La cohetería experimental, tal como se conoce actualmente en el ámbito académico y civil, comenzó a desarrollarse formalmente a partir de la década de 1960. Desde entonces se han creado distintos organismos alrededor del mundo que capacitan a las personas para manipular este tipo de tecnología de forma segura. Algunas de estas son; Tripoli Rocketry Association (TRA), National Association of Rocketry (NAR), United Kingdom Rocketry Association (UKRA), Canadian Association of Rocketry (CAR), entre otras.

Las clasificaciones más comunes que emplean estos organismos están relacionadas con el impulso total de los motores. Según diversas organizaciones, los motores de cohete se catalogan desde la clase $\frac{1}{8}$ A hasta la O (National Association of Rocketry, s.f.). ((National Association of Rocketry, s.f.))

Tipo de motor	Impulso total (N · s)
1/8A	0.00 – 0.3125
1/4A	0.3126 – 0.625
1/2A	0.626 – 1.25
A	1.26 – 2.50
B	2.51 – 5.00
C	5.01 – 10.00
D	10.01 – 20.00
E	20.01 – 40.00
F	40.01 – 80.00
G	80.01 – 160.00

Cuadro 3.1: Clasificación de motores según el impulso total (NAR)

A pesar de que existen múltiples parámetros para describir y categorizar la cohetería experimental, como el empuje máximo, el tiempo de combustión o el tipo de propelente, se adopta de manera preferente la clasificación por *impulso total*.

El impulso total se define como la integral del empuje a lo largo del tiempo de combustión del motor, es decir, la fuerza ejercida durante todo el periodo en que el motor se encuentra activo. Este parámetro resulta especialmente relevante, ya que se encuentra directamente relacionado con la cantidad total de energía mecánica entregada por el motor al vehículo.

Bajo esta convención, utilizada de forma estandarizada en la cohetería experimental, las clases de motores se organizan de tal manera que cada categoría sucesiva duplica aproximadamente el rango de impulso total de la clase inmediatamente anterior. Esta organización puede observarse en el cuadro 3.1, la cual presenta la clasificación de los motores en función de su impulso total y permite una comparación directa entre categorías ((Polo Pérez, 2024)).

$$I_{\text{total}} = \int_0^{t_f} F(t) dt \quad (3.1)$$

Donde:

- I_{total} es el impulso total del motor.
- $F(t)$ es la fuerza de empuje generada por el motor en función del tiempo.
- t es el tiempo .
- t_f es el tiempo total de combustión del motor .

Alrededor del mundo la cohetería experimental tiene distintas métricas y una gran variedad de competencias y concursos, en específico en este trabajo se hablara de Spaceport America Cup SAC, competencia donde el vehículo experimental de propulsión híbrida Xitle II voló en Junio de 2024.

Spaceport America Cup es una competencia internacional de cohetaría experimental en la que participan anualmente más de 100 equipos de distintos países. En este encuentro existen diversas categorías donde compiten motores catalogados principalmente en dos tipos: *Student Researched and Developed* SRAD y *Commercial Off-The-Shelf* COTS. El primer tipo corresponde a motores diseñados y manufacturados por estudiantes, mientras que el segundo se refiere a aquellos fabricados por empresas certificadas.

En el cuadro 3.2 se presentan las categorías presentes en la competencia *Spaceport America Cup*.

Apogeo [ft]	Tipo de Propulsión	Origen del Sistema
10,000	Sólido o Híbrido	COTS
10,000	Sólido	SRAD
10,000	Híbrido o Líquido	SRAD
30,000	Sólido o Híbrido	COTS
30,000	Sólido	SRAD
30,000	Híbrido o Líquido	SRAD

Cuadro 3.2: Categorías en Spaceport America Cup.

La competencia SAC establece un conjunto de métricas para evaluar el desempeño global de los equipos y galardonar a los mejores resultados.

Las métricas de evaluación en la cohetaría experimental pueden variar según la competencia o el país donde se practique. En particular, el equipo multidisciplinario *Propulsión UNAM* sigue los lineamientos de *Spaceport America Cup*, utilizando sus requerimientos y puntajes como base para definir y ajustar los objetivos de diseño de sus vehículos.

3.1.1. Descripción de los subsistemas de un cohete experimental

La cohetaría experimental no cuenta con estándares globales, únicos y rigurosos para establecer o clasificar los subsistemas principales que conforman un vehículo. Si bien algunos equipos adoptan y adaptan marcos aeroespaciales o militares, las características varían según el propósito y los recursos de cada organización. Sin embargo, en términos funcionales, es posible identificar 4 subsistemas principales y un quinto subsistema opcional :

1. **Electrónica de recuperación:** Encargada de activar el sistema de recuperación según las condiciones de vuelo. Implica una lógica de control que despliega el paracaídas en el momento indicado, garantizando la integridad del vehículo tras el vuelo.
2. **Fuselaje o estructura principal:** Constituye el cuerpo del cohete y alberga los subsistemas. Proporciona rigidez y estabilidad aerodinámica.
3. **Sistema de recuperación:** Conjunto de mecanismos que, accionados por la electrónica de recuperación, permiten desplegar el paracaídas y recuperar el vehículo de forma segura.
4. **Motor o sistema de propulsión:** Genera la energía necesaria para impulsar el vehículo. Puede ser de propulsión sólida, híbrida o líquida, dependiendo del diseño y de los objetivos de la misión.
5. **Electrónica de monitoreo y telemetría:** Encargada de registrar y/o transmitir variables relevantes como altitud, aceleración, presión, orientación, posición GPS, antes, durante o después del vuelo. Su incorporación depende de los objetivos experimentales y los recursos del equipo.

A continuación se presenta una imagen ilustrativa de los subsistemas de un cohete experimental de propulsión sólida, diseñado para alcanzar un apogeo aproximado de 1 km. En la Figura 3.2 se identifican los principales elementos estructurales y funcionales del vehículo, los cuales constituyen la base para el análisis y la descripción de los subsistemas que se desarrollan en las secciones posteriores.



Figura 3.2: Partes del cohete experimental Komodo AP, lanzado y recuperado por Propulsión UNAM en 2023

A manera de ejemplo, una organización funcional comparable se observa en el equipo *Waterloo Rocketry* (Universidad de Waterloo, Canadá), que estructura su cohete en siete subsistemas:

1. *Airframe*
2. *Recovery*
3. *Payload*
4. *Controls*
5. *Propulsion*
6. *Rocketcan*
7. *DAQ*
8. *RLCS/OPS*

La Figura 3.3 muestra su desglose; en esencia, coincide con los cuatro bloques principales aquí definidos; estructura, propulsión, recuperación y electrónica de recuperación.

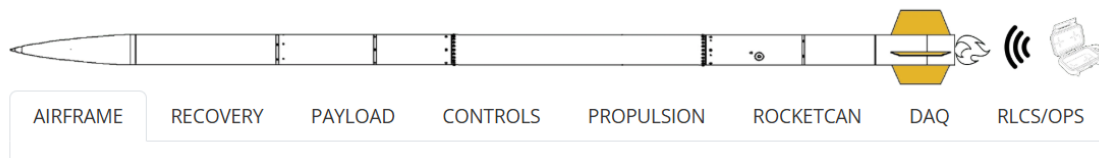


Figura 3.3: Distribución general de subsistemas en un cohete experimental del equipo Waterloo Rocketry (Rocketry, 2024).

Existen vehículos que incorporan sistemas más complejos, como los cohetes de propulsión híbrida o líquida. Sin embargo, también es común encontrar configuraciones más simples que integran sistemas de monitoreo para desplegar información relevante antes o durante el vuelo. Estos sistemas pueden ser SRAD (como en el hardware desarrollado por *Propulsión UNAM*) o COTS, cuando se emplean dispositivos comerciales tales como rastreadores o computadoras de vuelo de distintos proveedores.

En la Figura 3.4 se muestra el sistema de monitoreo y visualización de datos utilizado por *Propulsión UNAM* en cohetes de todas las categorías.

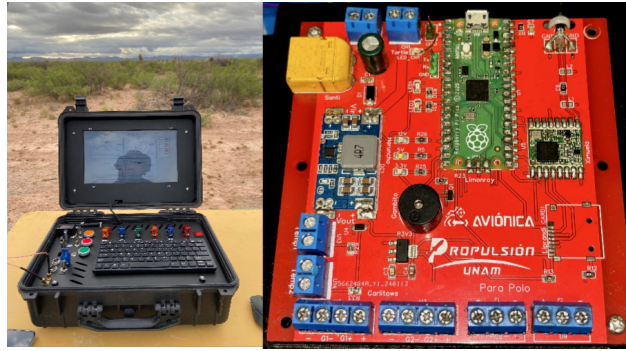


Figura 3.4: A la derecha: placa de adquisición de datos a bordo del cohete. A la izquierda: estación de monitoreo, a la derecha: Placa de adquisición de datos

Los subsistemas mencionados se diseñan en función de los requerimientos de la misión, que pueden incluir el logro de un apogeo objetivo, fines de investigación, eyección de una carga útil o la validación experimental de nuevos diseños. La Figura 3.5 muestra un ejemplo de un cohete experimental ensamblado, en el cual se muestran las partes de un vehículo suborbital.



Figura 3.5: Representación de las partes internas de un cohete experimental (en la imagen, el Komodo AP antes de su lanzamiento en octubre de 2023).

Las partes de un cohete experimental pueden variar dependiendo del equipo que lo desarrolle; sin embargo, es primordial que el vehículo cuente, al menos, con tres de los cuatro sistemas esenciales mencionados anteriormente: fuselaje, motor y electrónica de recuperación. Esta estructura básica garantiza la estabilidad, el control y la seguridad de la misión.

3.2. Ambiente electromagnético de la cohetaría experimental

El ambiente electromagnético en la operación de vehículos experimentales con sistemas de propulsión representa un desafío técnico complejo y crítico, ya que está determinado principalmente por las características propias del vehículo. En particular, la integración de múltiples componentes y subsistemas electrónicos operando de manera simultánea y confinados en un volumen reducido da lugar a un entorno con alta densidad de fuentes de emisión y de elementos susceptibles a interferencias electromagnéticas.

Desde el punto de vista de los elementos emisores, los subsistemas de recuperación, monitoreo y telemetría incorporan componentes que actúan como radiadores intencionales, tales como transmisores de radiofrecuencia. Adicionalmente, existen fuentes de emisión no intencional asociadas a fuentes de alimentación conmutadas, actuadores electromecánicos, señales de control pulsadas y, en muchos casos, buses de comunicación de alta velocidad, los cuales pueden generar interferencias tanto conducidas como radiadas.

En contraparte, los elementos susceptibles a interferencias electromagnéticas incluyen sensores analógicos y digitales, sistemas de recepción de radiofrecuencia, unidades de procesamiento y circuitos de adquisición de datos. La correcta operación de estos elementos puede verse comprometida por fenómenos de acoplamiento radiado, conducido o inductivo, particularmente en entornos donde la separación física entre subsistemas es limitada.

Adicionalmente, el ambiente electromagnético no se limita a las emisiones internas del vehículo, sino que también se ve influenciado por fuentes externas al mismo. Entre estas se encuentran señales provenientes de redes de telefonía celular, enlaces satelitales, transmisores de radio y televisión, así como interferencias generadas por infraestructuras cercanas, tales como edificaciones metálicas, vehículos, torres de comunicación o incluso fenómenos atmosféricos. La interacción de estas fuentes externas con los sistemas del vehículo puede afectar su desempeño durante las fases de preparación, lanzamiento, vuelo y recuperación. Aunque los sitios de lanzamiento para cohetes experimentales suelen seleccionarse en áreas abiertas y alejadas de fuentes intensas de emisión electromagnética, como redes de telefonía celular o transmisores de radio y televisión, las operaciones y competencias requieren la instalación de cierta infraestructura de apoyo. Esta infraestructura incluye sistemas de comunicación locales, estaciones de telemetría y equipos de monitoreo, los cuales constituyen fuentes adicionales de emisión electromagnética.

A lo anterior se suman posibles fuentes de origen natural, como fenómenos atmosféricos y descargas electrostáticas, que pueden influir en el entorno electromagnético durante las fases de preparación y lanzamiento. Todas estas fuentes externas pueden interactuar con los sistemas electrónicos del vehículo mediante mecanismos de acoplamiento radiado, conducido o inductivo, por lo que deben ser consideradas dentro del análisis de compatibilidad electromagnética.

En la siguiente sección se presentan algunos de los elementos característicos de este entorno electromagnético, así como los principales mecanismos de acoplamiento que pueden presentarse en detrimento de la operación nominal del vehículo.

Influencias electromagnéticas externas

Durante la operación de cohetes experimentales se identifican, de manera general, tres tipos principales de influencias electromagnéticas externas:

- **Radiocomunicaciones terrestres:** Los transmisores de radiofrecuencia presentes en el entorno de operación pueden acoplarse por radiación electromagnética a cables sin blindaje, estructuras conductoras y caminos de retorno del vehículo. Dependiendo de la geometría del conductor, el acoplamiento puede manifestarse como inducción de voltaje (en estructuras tipo dipolo) o como inducción de corriente (en estructuras tipo lazo). Cuando las frecuencias de las señales externas son cercanas a las frecuencias de operación de los sistemas del vehículo, o cuando se presentan combinaciones armónicas, pueden producirse fenómenos de intermodulación, dando lugar a fallas en los receptores, degradación de la relación señal-ruido o saturación de etapas electrónicas.
- **Condiciones atmosféricas:** Los rayos, las tormentas eléctricas o campos electrostáticos intensos inducen corrientes parásitas o picos transitorios sobre estructuras y líneas de señal.
También la ionización del aire a ciertas altitudes modifica la impedancia del espacio libre y puede favorecer a la producción de descargas electrostáticas.
- **Sistemas GPS y RF externos:** La coexistencia del vehículo con emisiones en bandas ISM, comerciales y militares puede dar lugar a fenómenos de sobrecarga del receptor (*receiver overload*), bloqueo (*blocking*) o intermodulación cruzada en los sistemas de recepción de radiofrecuencia. Estos efectos no constituyen interferencia electromagnética en el sentido clásico de acoplamiento EMI, sino que están asociados a limitaciones de selectividad, linealidad y rango dinámico de los receptores. No obstante, pueden comprometer la correcta operación de sistemas críticos como el GPS o los enlaces de telemetría, por lo que deben ser considerados dentro del análisis del entorno electromagnético del vehículo.

Influencias electromagnéticas internas

Además de las perturbaciones externas, los cohetes experimentales enfrentan un entorno electromagnético interno complejo, generado por sus propios subsistemas en espacios reducidos y con rutas compartidas de alimentación, planos de tierra y buses de comunicación, lo que incrementa la probabilidad de acoplamientos conducidos, radiados o inductivos.

3.3. Descripción de los subsistemas de Xitle II

Un análisis de compatibilidad electromagnética requiere un conocimiento integral del sistema que se analiza, así como de la interacción entre sus distintos componentes y subsistemas. Por esto, resulta necesario describir la constitución general del vehículo suborbital Xitle II, con el objetivo de identificar aquellos elementos que pueden actuar como fuentes de emisión electromagnética, rutas de acoplamiento o elementos susceptibles a interferencias.

La compatibilidad electromagnética de un sistema aeroespacial no depende exclusivamente del desempeño individual de los equipos electrónicos que lo integran, sino también de las características físicas, eléctricas y funcionales del vehículo completo. Aunque el objeto de estudio de este trabajo corresponde principalmente a la bahía de aviónica y a los sistemas electrónicos asociados, resulta necesario describir aquellos subsistemas que interactúan directa o indirectamente con ella, tales como la estructura del vehículo, el sistema de propulsión, los sistemas de recuperación y los enlaces de comunicación.

Desde la perspectiva de la compatibilidad electromagnética aeroespacial, estos elementos constituyen el entorno electromagnético inmediato en el que operará la aviónica. La literatura especializada señala que, al analizar un sistema a nivel vehículo, primero debe caracterizarse el entorno electromagnético en el que operará y posteriormente evaluarse la arquitectura completa del sistema y sus interfaces (Perez, 2019). Asimismo, las normas aeroespaciales de compatibilidad electromagnética establecen que la EMC debe abordarse a nivel sistema, considerando interfaces entre subsistemas, cableado, estructuras conductoras, referencias eléctricas, blindajes y uniones eléctricas (European Cooperation for Space Standardization, 2008; International Organization for Standardization, 2002).

Los elementos estructurales fabricados con materiales conductores pueden desempeñar funciones relevantes dentro de la estrategia de compatibilidad electromagnética. Dependiendo de su geometría y propiedades eléctricas, pueden emplearse como referencias eléctricas comunes, trayectorias de retorno de corriente, superficies de unión eléctrica (*bonding*) o incluso como parte del blindaje electromagnético del vehículo (Ott, 2009; Weston, 2016). De manera similar, componentes metálicos de gran tamaño, como tanques, estructuras de soporte o elementos próximos al sistema de propulsión, pueden modificar la distribución de campos electromagnéticos y afectar tanto los niveles de emisión como la susceptibilidad de los equipos electrónicos cercanos.

Cabe recalcar que la inclusión de estos subsistemas no implica que formen parte del objeto principal de estudio de esta investigación. Su descripción se realiza debido a que constituyen restricciones de diseño e integración para la bahía de aviónica y determinan condiciones relevantes para la compatibilidad electromagnética del sistema. En consecuencia, estos elementos son considerados como parte del entorno electromagnético del vehículo y no como objetos independientes de análisis.

El cohete experimental Xitle II fue la segunda iteración de un vehículo suborbital de propulsión híbrida desarrollado por el equipo de Propulsión UNAM. Para facilitar su análisis y comprensión, el vehículo se divide en tres grandes grupos de subsistemas: propulsión, aeroestructuras y aviónica. Cada uno de estos grupos presenta características de interés desde el punto de vista de la compatibilidad electromagnética.

El sistema de propulsión incorpora componentes como válvulas actuadas mediante solenoides y canales pirotécnicos accionados eléctricamente, los cuales pueden constituir fuentes de transitorios eléctricos y electromagnéticos. Por su parte, las aeroestructuras proporcionan información relevante sobre la geometría del vehículo, la disposición física de los subsistemas y los materiales empleados, los cuales pueden ser conductores o aislantes y, por lo tanto, influir en los mecanismos de acoplamiento electromagnético. Finalmente, el subsistema de aviónica concentra los sistemas electrónicos sensibles, tales como sensores, sistemas de comunicación, procesamiento y adquisición de datos, que resultan particularmente vulnerables a interferencias electromagnéticas.

Esta clasificación permite establecer un marco claro para el análisis EMC del vehículo, facilitando la identificación de fuentes, posibles acoplamientos y quipos susceptibles a EMI.

1. Propulsión:

La división de propulsión dentro de Propulsión UNAM se encarga de diseñar, manufacturar y probar el motor

- a) **Cámara de combustión:** La cámara de combustión del Castigador V2 emplea una arquitectura híbrida que utiliza óxido nitroso (N_2O) como oxidante y parafina como combustible. Está diseñada para soportar presiones de hasta 430 psi, e incluye una tobera de grafito con geometría optimizada. El sistema entrega un impulso total de $6255 \text{ lbf} \cdot \text{s}$, un impulso específico de 195 s, y una duración de combustión de 14.241 s. El empuje máximo alcanzado fue de 619.82 lbf.

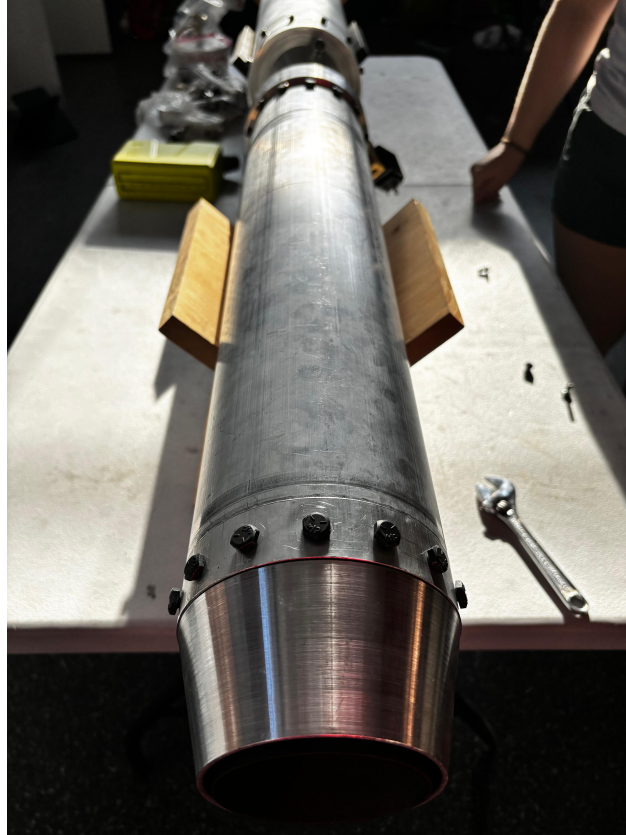


Figura 3.6: Cámara de combustión del motor “Castigador V2”

- b) **Tanque de oxidante:** Fabricado en aluminio 6061-T6, con espesor de pared de 0.125 pulgadas, fue diseñado para resistir presiones de hasta 943 psi con un factor de seguridad mayor a 2.0. El tanque almacena 29.39 lb^1 de N_2O y cuenta con accesorios y válvulas integradas para llenado, aborto, purga, venteo y flujo principal al motor. Algunas de estas válvulas son manuales y otras que son actuadas con solenoides

¹Se manejan las unidades de medida en el sistema inglés debido a la homogeneidad en otras bibliografías

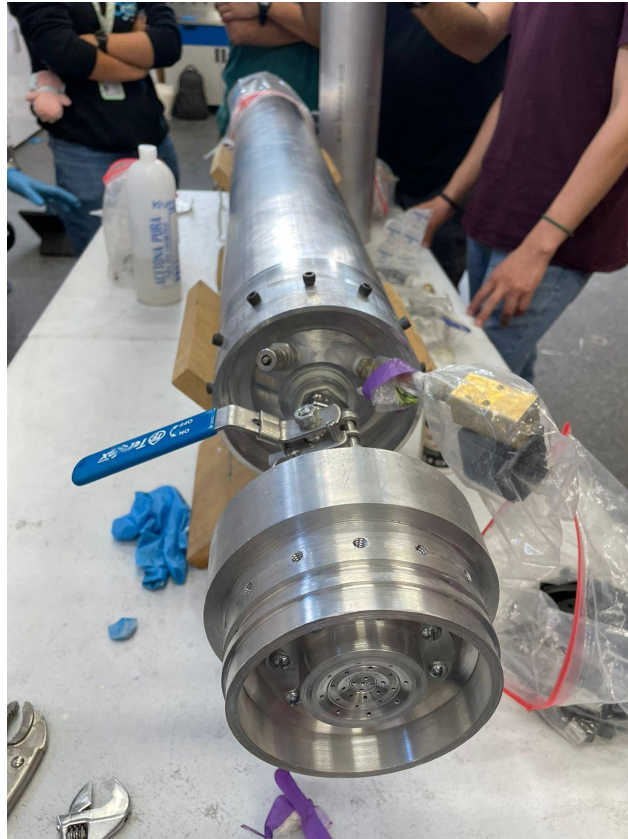


Figura 3.7: Tanque de oxidante del motor el "Castigador V2"

- c) **Sistema de llenado (GSE):** El Ground Support Equipment, por sus siglas en inglés, opera de forma completamente remota y segura, mediante control eléctrico desde la estación terrena. Integra válvulas solenoides de 12 V (como la FOV y la POV), sensores redundantes, válvulas de bola manuales y mecanismos pirotécnicos como el QD para desacoplar el sistema antes del lanzamiento. Este sistema garantiza la presurización, purga y seguridad del flujo de oxidante previo a la activación del motor.



Figura 3.8: Estación de llenado de N_2O para el motor "Castigador V2"

Cuadro 3.3: Válvulas y mecanismos del sistema de oxidante

Componente	Ubicación	Tipo de actuación	Función
MOV (Main Oxidizer Valve)	Entre tanque y cámara	Pirotécnica (bola)	Iniciar flujo de oxidante hacia la cámara de combustión
FOV (Filling Oxidizer Valve)	GSE	Solenoides 12 V	Controlar llenado remoto del tanque
AOV (Abort Oxidizer Valve)	En el tanque de oxidante	Solenoides 12 V	Permitir aborto del motor (liberación)
VOV (Vent Oxidizer Valve)	En el tanque de oxidante	Solenoides 12 V	Liberar presión acumulada (venteo)
POV (Purge Oxidizer Valve)	GSE	Solenoides 12 V	Permitir purga del sistema tras llenado o aborto
QD (Quick Disconnect)	Línea de oxidante (prevuelo)	Pirotécnico	Desacople del GSE antes de lanzamiento

Cuadro 3.4: Parámetros clave del motor híbrido Castigador V2

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Oxidante	29.39 [lb]	Impulso total	6255.08 [lbf · s]
Combustible	5.534 [lb]	Impulso específico	195 [s]
Relación O/F	5.492	Tiempo de combustión	14.241 [s]
Presión máx. del tanque	734 [psi]	Presión máx. en la cámara	430 [psi]
Empuje promedio	3815.76 [lbf]	Empuje máximo	619.82 [lbf]
Diámetro de garganta	1.575 [in]	Relación de expansión	4.1



Figura 3.9: Ensamble final del motor "Castigador V2"

2. Aeroestructuras

En este apartado se explican las partes estructurales que comprenden al vehículo suborbital Xitle II

- a) **Componentes estructurales:** El fuselaje y sus uniones fueron diseñados a partir de simulaciones de elemento finitos (FEM) para garantizar integridad estructural en condiciones de lanzamiento. Se utilizaron diversos materiales como resinas, fibras y metales, que en su integración no necesariamente garantizan la equipotencialidad eléctrica. El cohete tiene una longitud total de 2.5 metros, un diámetro de 15 cm, y una masa estimada de 21 kg. Simulaciones aerodinámicas y de trayectoria predijeron un apogeo de 6,982.68 pies (2,128.91 metros), considerando condiciones atmosféricas estándar y trayectoria vertical.
- b) **Sistema de recuperación:** El sistema de recuperación consta de dos paracaídas (drogue y main) controlados electrónicamente. Fue diseñado para desplegarse a distintas altitudes y desacelerar el cohete hasta una velocidad segura de descenso. Se utilizó un sistema redundante de eyección mediante cartuchos de CO₂ y mecanismos tipo tender descender.

Cuadro 3.5: Datos técnicos del vehículo Xitle II

Parámetro	Valor
Longitud total	2.5 m
Diámetro del fuselaje	15 cm
Masa estimada	21 kg
Altitud estimada de apogeo	6,982.68 ft (2,128.91 m)
Número de etapas de recuperación	2 (drogue + main)
Material del fuselaje	Fibra de vidrio + aluminio 6061-T6



Figura 3.10: Ensamble general del cohete Xitle II

3. Aviónica

- a) **Computadora de vuelo:** El sistema de control a bordo integra una computadora de vuelo desarrollada por el equipo, que ejecuta tareas de adquisición de datos, gestión de eventos de vuelo y control de recuperación. Incluye almacenamiento de datos en memoria flash, telemetría LoRa y capacidad para detectar el estado del vuelo en tiempo real.

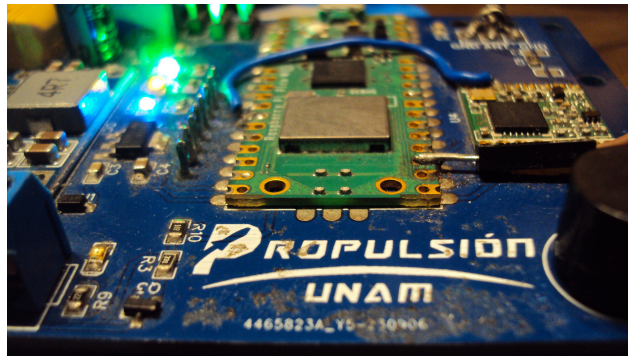


Figura 3.11: Computadora de vuelo SRAD

- b) **Actuación e instrumentación:** Este subsistema está compuesto por sensores de presión y celdas de carga que permiten monitorear parámetros críticos como la presión en el tanque de oxidante,

en el sistema de GSE y el peso del oxidante antes del lanzamiento. Para las acciones de control, se emplean válvulas solenoides de 12 V para apertura, cierre, purgado, ventilación y aborto del sistema. Asimismo, se integran mecanismos pirotécnicos activados mediante ignitores eléctricos (e-match), como el que acciona la válvula principal de oxidante (Main Oxidizer Valve), que requieren una descarga controlada de energía para activar el mecanismo que permite la apertura de la válvula principal.



Figura 3.12: Ensamble de celda de carga para el monitoreo de la masa del oxidante en el "Castigator V2"

- c) **Estación terrena:** Se diseñó una estación de control basada en una Raspberry Pi 5, conectada a módulos LoRa para la recepción de telemetría y transmisión de comandos. Desde esta estación, el operador puede visualizar datos en tiempo real y controlar remotamente todos los actuadores críticos del cohete, asegurando operaciones seguras tanto en pruebas como en vuelo.



Figura 3.13: Estación terrena que ayuda a visualizar los datos en tiempo real

3.4. Ambiente electromagnético de Xitle II

En el caso particular del cohete experimental Xitle II, garantizar la funcionalidad segura y confiable de cada subsistema requiere una comprensión profunda del entorno electromagnético en el que está inmerso. Este entorno está determinado por las emisiones generadas internamente por los propios subsistemas del vehículo; la computadora de vuelo, el sistema de adquisición de datos, las válvulas de actuación y los transmisores de datos, que por factores externos que pueden influir significativamente en su desempeño.

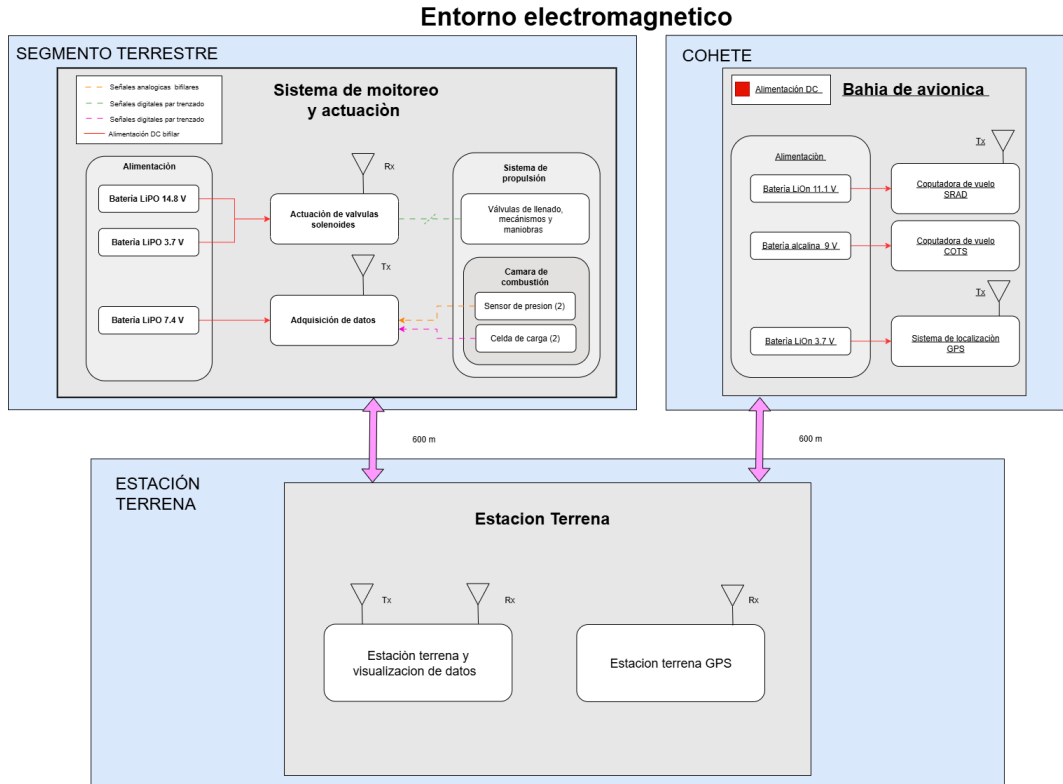


Figura 3.14: Representación funcional del entorno electromagnético del sistema Xitle II

Para contextualizar esta interacción de fuentes y vulnerabilidades, la Figura 3.14 es una representación funcional del entorno electromagnético del sistema en el que se encuentra Xitle II, que incluye los subsistemas a bordo del cohete, el segmento de monitoreo y actuación en tierra, y la estación terrena de comunicaciones. Esta configuración permite visualizar las posibles rutas de emisión y acoplamiento electromagnético entre elementos sensibles, así como los caminos de señal y energía entre unidades separadas físicamente.

Entre las influencias externas se incluyen señales provenientes de otras fuentes del entorno, enlaces satelitales, transmisores de radio y televisión, así como interferencias provocadas por infraestructuras cercanas como edificaciones metálicas, vehículos, torres de comunicación o fenómenos atmosféricos. Todas estas fuentes pueden interactuar con los sistemas del vehículo, ya sea por acoplamiento radiado, conducido o inductivo.

Por lo tanto, el análisis del entorno electromagnético debe considerar tanto las influencias internas, derivadas de la operación conjunta de los subsistemas del cohete, como las perturbaciones externas, presentes durante las fases de prueba, lanzamiento y vuelo.

3.4.1. Influencias electromagnéticas externas

Una vez descrita la constitución general del vehículo y sus subsistemas, resulta pertinente analizar aquellas influencias electromagnéticas externas que pueden interactuar específicamente con el cohete suborbital Xitle II durante sus fases de preparación, lanzamiento y vuelo. Si bien muchas de estas condiciones son comunes a vehículos experimentales, su efecto sobre Xitle II depende de la arquitectura del sistema, la disposición de los subsistemas y la sensibilidad de la aviónica empleada.

Estas influencias externas no se analizan aquí de forma genérica, sino en función de los posibles mecanismos de acoplamiento con los subsistemas del vehículo, particularmente con la bahía de aviónica, que constituye el objeto principal de estudio de este trabajo. En este contexto, se consideran únicamente aquellas fuentes externas cuya interacción puede comprometer la integridad de las señales, la operación de los sistemas de comunicación o el desempeño de los sensores durante la misión.

Durante la operación del Xitle II, se identifican tres tipos principales de influencias electromagnéticas externas:

- **Radiocomunicaciones terrestres y satelitales:** En el sistema del Xitle II, tanto la estación terrena desarrollada por Propulsión UNAM, como el sistema del rastreador comercial emplean transmisores de radiofrecuencia para comunicarse con el vehículo. Estos transmisores emiten señales de alta frecuencia dentro de la banda ISM que pueden ingresar de forma no deseada a otros circuitos electrónicos del cohete, incluso si no están directamente conectados. Esto puede ocurrir a través del aire por acoplamiento radiado o por trayectorias comunes de tierra y cables mal blindados o sin blindaje.

Cuando las frecuencias de estos transmisores son cercanas entre sí, o bien se combinan armónicamente, pueden producirse fenómenos de intermodulación, en los cuales se generan señales adicionales no deseadas que caen dentro de la banda útil de recepción. Estos efectos no corresponden propiamente a interferencia electromagnética por acoplamiento, sino que están asociados a la no linealidad, selectividad limitada y rango dinámico finito de los receptores de radiofrecuencia.

Como consecuencia, pueden presentarse anomalías en los subsistemas, como la pérdida de capacidad del sistema para detectar señales útiles debido al incremento del nivel de ruido. Otro efecto posible es la saturación del receptor, en la cual el sistema deja de operar correctamente debido a la presencia de EMI de alta potencia.

- **Condiciones atmosféricas:** Factores ambientales como rayos, tormentas eléctricas o campos electrostáticos intensos durante el lanzamiento pueden inducir corrientes parásitas o picos transitorios sobre estructuras metálicas y líneas de señal. Asimismo, la ionización del aire en altitudes elevadas modifica la impedancia del espacio libre y puede contribuir a la generación de descargas. Estas fuentes de EMI están descritas como críticas para vehículos aeroespaciales por Ott (Ott, 2009) y Weston (Weston, 2016).
- **Sistemas GPS y RF externos:** El Xitle II depende de sistemas de geoposicionamiento y telemetría que deben coexistir con otras emisiones de radiofrecuencia presentes en el entorno de operación. Durante campañas de lanzamiento, el sistema de comunicaciones del *staff* suele operar en bandas VHF o UHF, además de existir emisiones en bandas ISM, comerciales y militares. Esta coexistencia puede dar lugar a fenómenos como desensibilización del receptor, intermodulación cruzada o bloqueo (*receiver overload*). Estos efectos no constituyen interferencia electromagnética en el sentido estricto de EMI por acoplamiento, sino que están asociados a limitaciones de selectividad, linealidad y rango dinámico de los receptores de RF, pudiendo comprometer la recepción de señales útiles (Ott, 2009).

3.4.2. Influencias electromagnéticas internas

Además de las perturbaciones externas, el cohete Xitle II enfrenta un entorno electromagnético interno complejo, generado por sus propios subsistemas. Estos sistemas coexisten en un espacio reducido y comparten rutas de alimentación, planos de tierra, buses de comunicación y estructuras metálicas que pueden actuar como vías de acoplamiento no deseadas.

Durante la operación, se activan múltiples elementos con diferentes perfiles de emisión y susceptibilidad: fuentes conmutadas, microcontroladores, transmisores de radiofrecuencia, sensores analógicos, etc. Esta combinación puede dar lugar a interferencias por conducción, radiación o acoplamientos cruzados dentro del propio vehículo, lo que constituye una de las principales fuentes de riesgo en materia de compatibilidad electromagnética (EMC).

La figura 3.15 presenta una vista general de la bahía de aviónica, donde coexisten los subsistemas. Cada módulo opera con fuentes de alimentación independientes, lo que incrementa el número de líneas activas y, por tanto, la probabilidad de acoplamiento conducido y mal retorno de corriente.

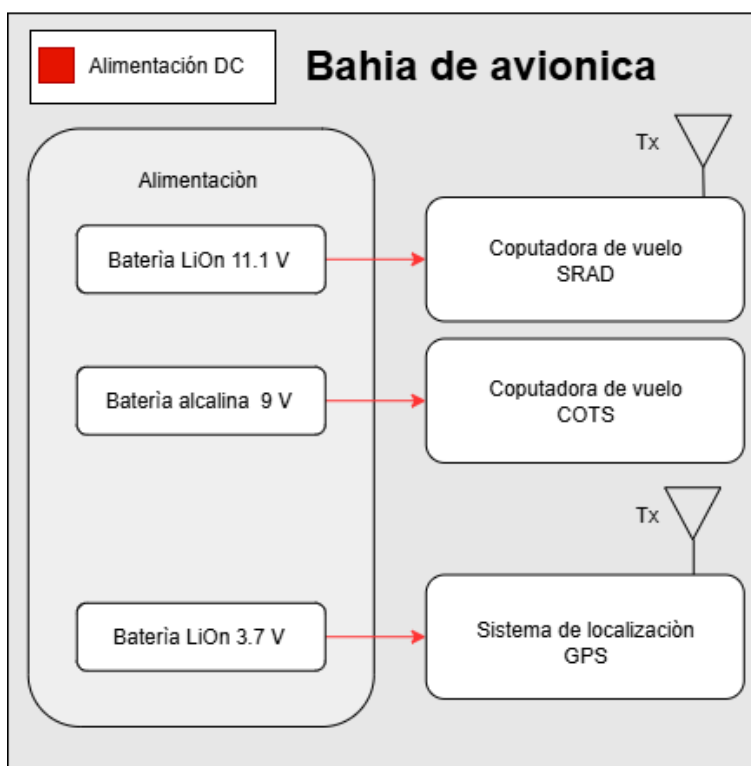


Figura 3.15: Vista de la bahía de aviónica del *Xitle II*. Se muestran las fuentes de alimentación DC y los módulos de transmisión de datos.

En la figura 3.16, se representa el sistema de monitoreo y actuación, el cual integra sensores analógicos, módulos de adquisición de datos, actuadores de válvulas y módulos de comunicación inalámbrica. Las trayectorias de señal digital, analógica y alimentación se entrecruzan en la misma estructura, lo que demanda un diseño riguroso para evitar interferencias entre canales sensibles y elementos conmutados.

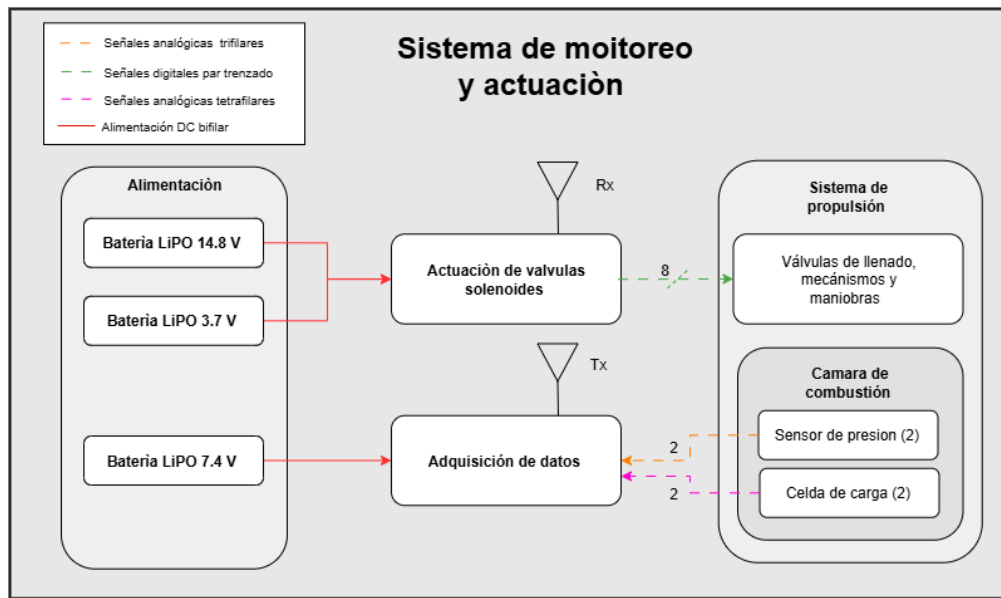


Figura 3.16: Esquema del sistema de monitoreo y actuación.

Finalmente, la figura 3.17 ilustra la estación terrena, que aunque se encuentra físicamente separada del vehículo, forma parte del entorno electromagnético del sistema. Sus emisiones RF deben ser consideradas en el análisis de susceptibilidad de los equipos a bordo.

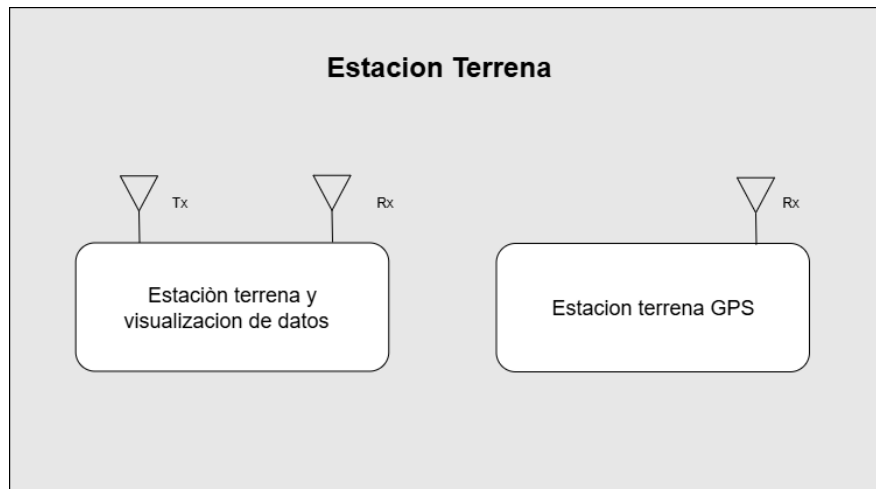


Figura 3.17: Diagrama funcional de la estación terrena. Se incluyen los módulos de transmisión y recepción que interactúan con el vehículo en tiempo real.

El análisis conjunto de estas configuraciones permite identificar zonas de riesgo EMC en el sistema, especialmente en los puntos donde convergen señales de distinta naturaleza, líneas de alta corriente o buses de comunicación no aislados. Estas áreas serán analizadas con mayor detalle en las siguientes secciones, donde se describirá individualmente cada subsistema.

Capítulo 4

Metodología para el diseño de compatibilidad electromagnética

4.1. Consideraciones generales en metodologías de diseño en sistemas aeroespaciales

En los sistemas aeroespaciales modernos, la compatibilidad electromagnética EMC no se aborda como una actividad aislada o correctiva, sino como un proceso transversal integrado dentro de la ingeniería de sistemas. Este enfoque reconoce que los fenómenos de interferencia electromagnética pueden comprometer simultáneamente el desempeño funcional, la confiabilidad y, en muchos casos, la seguridad de la misión, por lo que deben gestionarse de manera sistemática, planificada y trazable a lo largo de todo el ciclo de vida del proyecto.

Desde la perspectiva de la ingeniería de sistemas, marcos metodológicos consolidados, como los promovidos por la NASA y la ESA, establecen que los requisitos de EMC deben incorporarse desde las fases tempranas de definición conceptual y mantenerse activos durante el diseño preliminar, el diseño detallado, la integración, la verificación y la validación. En particular, documentos normativos como la ISO 14302:2002 y la ECSS-E-ST-20-07C coinciden en que un programa efectivo de EMC debe concebirse como un proceso iterativo de control de riesgos electromagnéticos a nivel sistema (European Cooperation for Space Standardization, 2008; International Organization for Standardization, 2002).

De forma general, estas metodologías establecen para diseñar bajo EMC se debe contemplar al menos las siguientes actividades fundamentales:

- Caracterizar el entorno electromagnético : considerando tanto fuentes internas como externas de EMI, y establecer objetivos de compatibilidad a nivel sistema que tengan relación con dicho entorno.
- Designar requisitos técnicos verificables hacia subsistemas y equipos, asegurando márgenes adecuados y trazabilidad entre requisitos de sistema, subsistema y componente.
- Gestionar de manera estricta las interfaces eléctricas, electrónicas y físicas, así como el control de la configuración de los subsistemas, reconociendo que muchas fallas de EMC surgen por acoplamientos no previstos en interfaces.
- Definir una estrategia de verificación y validación por jerarquía de nivel, que combine análisis, inspección y ensayos experimentales de emisiones y susceptibilidad, de acuerdo con estándares de referencia.

Este enfoque normativo se ve reforzado por los principios de diseño preventivo ampliamente documentados en la literatura técnica especializada. Autores como Ott y Weston enfatizan que la mitigación efectiva de las EMI debe iniciarse desde el origen, privilegiando decisiones de diseño tempranas sobre soluciones correctivas tardías. Estas decisiones incluyen la definición adecuada de referencias eléctricas, rutas de retorno de corriente, esquemas de puesta a tierra y enlace equipotencial, así como la disposición física de circuitos, cables y subsistemas para minimizar mecanismos de acoplamiento conductivo, inductivo, capacitivo y radiado (Ott, 2009; Weston, 2016).

Asimismo, en el contexto aeroespacial, el diseño orientado a la EMC debe considerar explícitamente la separación funcional de subsistemas críticos, la jerarquización de fuentes y víctimas potenciales de interferencia, así como la coherencia entre arquitectura eléctrica y mecánica. Como señalan Garcés y otros autores en el ámbito de la EMC aeroespacial, la efectividad de un programa de compatibilidad no depende únicamente del cumplimiento formal de límites normativos, sino de la integración consistente de criterios de EMC dentro de la arquitectura global del sistema (Garcés & Silva, 2018).

En conjunto, estas consideraciones metodológicas permiten entender la EMC no solo como un requisito de cumplimiento normativo, sino como una herramienta imprescindible en el diseño de sistemas aeroespaciales complejos, especialmente en plataformas experimentales donde los márgenes de diseño, las restricciones de masa y volumen, y la coexistencia de múltiples subsistemas electrónicos incrementan la probabilidad de EMI.

4.2. Metodología propuesta para coherencia experimental

En esta sección se presenta una propuesta de metodología de diseño orientada a la compatibilidad electromagnética para sistemas eléctricos-electrónicos utilizados en coherencia experimental. La metodología se plantea como una guía conceptual que permite integrar consideraciones de compatibilidad electromagnética desde etapas tempranas del diseño, considerando las restricciones geométricas, estructurales y funcionales propias de vehículos suborbitales experimentales.

El objetivo de esta propuesta es estructurar el proceso de diseño en distintos niveles jerárquicos del sistema, de forma que los posibles mecanismos de acoplamiento electromagnético puedan identificarse y mitigarse desde el nivel componente hasta la integración física del sistema completo.

Es muy importante precisar que el análisis propuesto para validar la compatibilidad electromagnética de los subsistemas puede expandirse y usarse como una base en la metodología de diseño para cualquier sistema eléctrico-electrónico. Recuperando lo planteado anteriormente, se describirá un flujo apropiado para lograr la compatibilidad electromagnética antes de su análisis. Retomemos y recordemos los tres niveles primordiales:

1. Nivel componente
2. Nivel sistema
3. Nivel integración

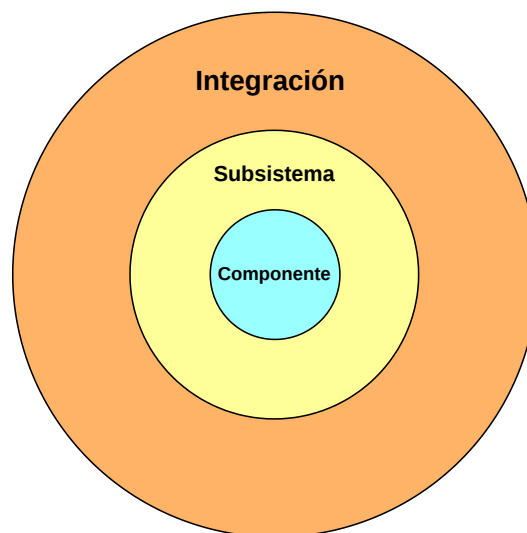


Figura 4.1: Diagrama ilustrativo sobre la metodología propuesta

Es muy importante recalcar que el diseño implica una comprensión amplia del sistema, no solo las implicaciones internas de este. Es decir, cuando hablamos de un cohete suborbital sabemos que disponemos de geometrías específicas. Es primordial recordar que la misión principal de nuestro sistema no es que sea *electromagnéticamente compatible*, sino que la compatibilidad electromagnética asegure el funcionamiento óptimo del sistema, lo haga robusto y resistente a fallas causadas por EMI.

El sistema puede cumplir con sus tareas principales pero puede ser poco eficiente en la integración con el vehículo. El diseño de sistemas para cohetes experimentales suborbitales debe contemplar todas esas implicaciones.

A continuación se presenta una propuesta para el diseño de sistemas eléctricos-electrónicos en cohetes experimental tomando en cuenta la jerarquía antes mencionada. Cada nivel merece sus precauciones y consideraciones.

4.2.1. Nivel componente

En el nivel componente se establecen las bases del diseño electromagnéticamente compatible, ya que en esta etapa se definen las características eléctricas fundamentales de los elementos que integran el subsistema. De acuerdo con la filosofía de diseño EMC propuesta por Henry Ott y Weston, muchos de los problemas de interferencia electromagnética pueden prevenirse si se identifican y controlan correctamente las fuentes potenciales de ruido desde el nivel más bajo del diseño.

En este nivel, la EMC se asegura mediante implementaciones en el diseño a través de una adecuada selección y organización de los componentes. A partir de este análisis, se identifican cuatro parámetros clave que deben considerarse como fundamentos de diseño a nivel componente para asegurar la compatibilidad electromagnética:

1. **Voltaje de operación**
2. **Corriente de operación**
3. **Frecuencia de trabajo**
4. **Tipo de comunicación**

Estos parámetros permiten analizar anticipadamente el comportamiento electromagnético del subsistema y facilitan la correcta gestión de señales, potencia y trayectorias de retorno desde etapas tempranas del diseño.

Voltaje de operación

El voltaje de operación es relevante debido a que define la forma en que la energía es distribuida y regulada dentro del subsistema, pudiendo ser mediante esquemas lineales o conmutados. Esta característica influye directamente en el nivel de ruido electromagnético generado y en la manera en que deben organizarse y gestionarse las señales.

Los sistemas de regulación lineal, aunque menos eficientes, presentan un comportamiento electromagnético más limpio y son preferibles en etapas sensibles. Por el contrario, los sistemas conmutados introducen transiciones rápidas que generan armónicos en un amplio rango de frecuencias, convirtiéndose en fuentes potenciales de interferencia. Por ello, identificar el tipo de voltaje de operación permite ordenar los dominios de potencia, separar fuentes ruidosas y definir estrategias adecuadas de filtrado y desacoplo.

Corriente de operación

La corriente de operación es un parámetro crítico, ya que toda corriente eléctrica requiere un camino de retorno hacia su fuente. La magnitud de la corriente y sus características determinan la intensidad de los campos magnéticos generados y el tamaño del *loop* formado entre el conductor de ida y su retorno.

Conocer la corriente de operación permite tratar adecuadamente la ruta o bus que la transporta, dimensionarlo correctamente y acomodarlo en una ubicación que minimice el acoplamiento con señales sensibles.

Frecuencia de trabajo

La frecuencia de operación de un componente permite determinar la longitud de onda asociada a sus señales y, con ello, caracterizar el régimen electromagnético en el que se presentan las interacciones: campo cercano, zona de transición o campo lejano.

En sistemas como la aviónica de un cohete experimental, donde las dimensiones físicas pueden ser comparables con la longitud de onda de ciertas señales, resulta importante identificar la frecuencia de trabajo desde el nivel componente donde se permite anticipar el tipo de perturbación electromagnética y aplicar medidas de mitigación acordes a sus características.

Tipo de comunicación

El tipo de comunicación empleado por un componente influye directamente en su susceptibilidad al ruido y en su capacidad de generar interferencias. Señales analógicas, digitales, diferenciales o de alta velocidad presentan comportamientos electromagnéticos distintos y requieren tratamientos específicos. Cuando caracterizamos el tipo de comunicación desde el nivel componente podemos organizar adecuadamente las señales, separar líneas sensibles de fuentes de ruido y seleccionar estrategias de enrutamiento acordes a su naturaleza.

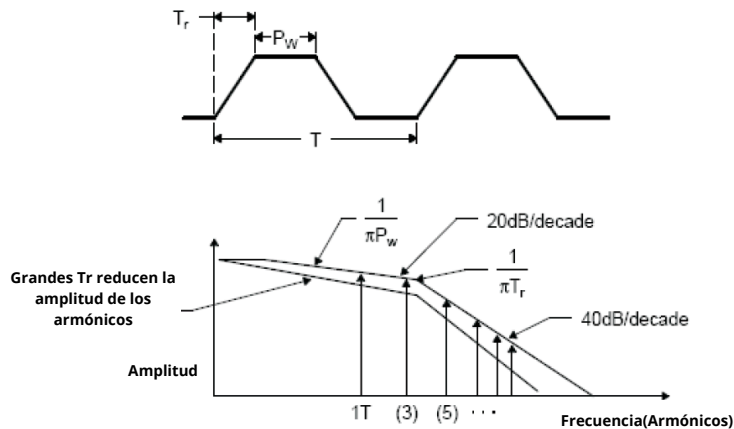


Figura 4.2: Ejemplo de envolvente espectral de los armónicos generados por una señal digital periódica (adaptado de (Electronics Stack Exchange, 2020)).

El proceso descrito para la selección e implementación de componentes puede resumirse mediante el diagrama de flujo mostrado en la Figura 4.3. Este esquema engloba las consideraciones previamente expuestas para el nivel componente dentro de la metodología propuesta. En él se ilustra el procedimiento de identificación de la necesidad del componente, la verificación de su funcionalidad y la evaluación de los parámetros relevantes para su implementación bajo criterios de compatibilidad electromagnética, tales como voltaje de operación, corriente de consumo, frecuencia de trabajo y tipo de comunicación. A partir de esta evaluación es posible identificar riesgos potenciales de EMI asociados a su integración, permitiendo tomar decisiones informadas antes de proceder con su implementación dentro del subsistema.

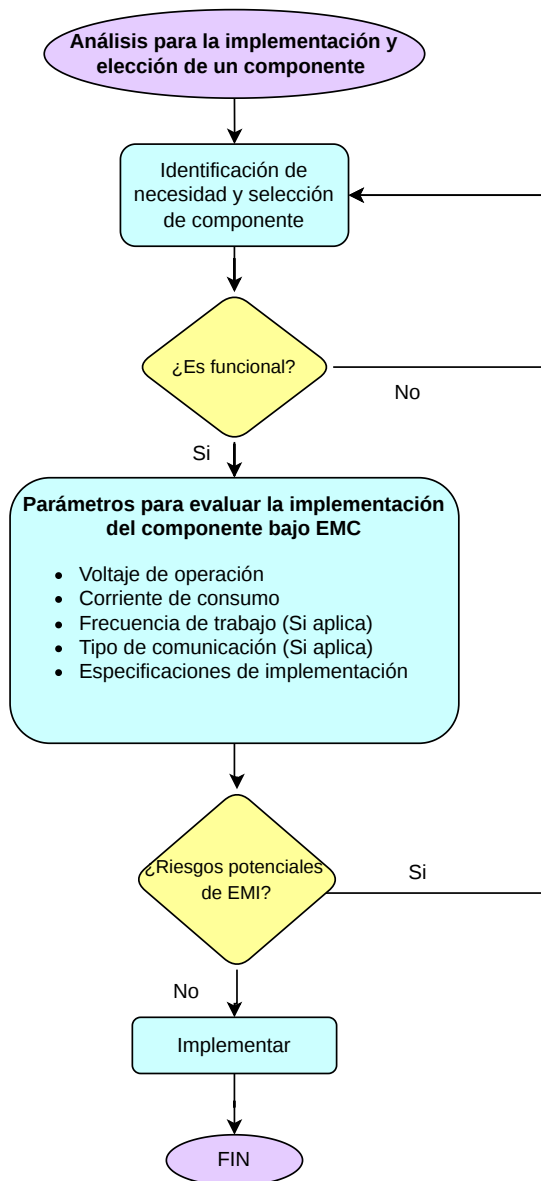


Figura 4.3: Análisis para la implementación y elección de un componente

4.2.2. Nivel subsistema

En el nivel subsistema, el diseño electromagnéticamente compatible no se limita a que el circuito sea funcional y robusto, sino que debe adaptarse a las restricciones reales del entorno de coherencia experimental: geometría disponible, distribución mecánica, longitudes, y especialmente la accesibilidad y ubicación de los componentes.

Segmentación por bloques funcionales y separación física

Antes de rutear, la PCB debe planearse a esto le llamamos, segmentación por bloques funcionales donde se agrupan los circuitos con comportamiento electromagnético similar y se separan de las fuentes de ruido que podrían afectar a circuitos sensibles.

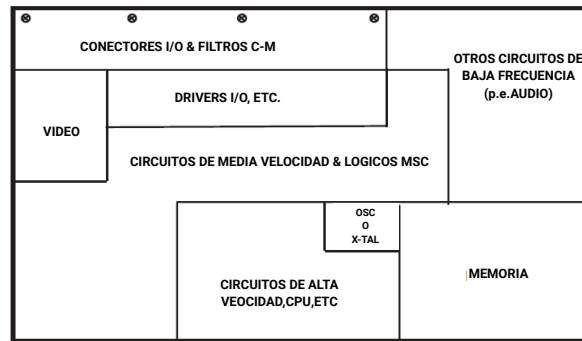


Figura 4.4: Ejemplo de la segmentación funcional de una PCB orientada a compatibilidad electromagnética, donde se separan bloques de alta velocidad, lógica digital, memoria y circuitos de baja frecuencia para reducir acoplamientos electromagnéticos (adaptado de Ott, 2009, p. 623).

Tratamiento de señales

En el nivel subsistema, las señales deben clasificarse y rutearse de acuerdo con su contenido espectral, corriente asociada y susceptibilidad. Las señales que suelen representar mayor riesgo de generar emisiones electromagnéticas son señales digitales rápidas con alto contenido armónico y transitorios; en particular, las señales de reloj, seguidas por buses digitales y señales de control.

Señales conmutadas Las señales conmutadas presentan altos dv/dt y di/dt , generando armónicos de alta frecuencia. A continuación se presentan una serie de consejos para tratar este tipo de señales.

- Mantener el bloque de potencia físicamente separado de sensores y señales analógicas.
- Minimizar el área de los lazos de conmutación.
- Referenciar con un plano de retorno continuo y evitar discontinuidades que obliguen a la corriente de retorno a tomar caminos imprevistos, lo cual puede aumentar el área del lazo y provocar circulación por impedancias comunes.

Señales de reloj Las rutas de reloj deben mantenerse lo más cortas posible y ubicarse lejos de conectores e interfaces de entrada y salida. Es importante considerar que los osciladores externos tienen una impedancia característica que debe cumplirse para su correcto funcionamiento, cuando se trabaja con PCB de múltiples capas es muy importante considerar la capacitancia que recomienda el fabricante, realizar trayectorias cortas y simples, es decir, sin saltos entre planos o con señales de otra naturaleza en ese entorno.

Buses de comunicación Las rutas correspondientes a buses de comunicación digital, tales como I2C, UART, SPI o CAN, deben considerarse como un conjunto de señales relacionadas que comparten trayectorias de retorno y contenido espectral similar. Debido a que estos buses suelen transportar señales digitales con flancos rápidos, pueden convertirse en fuentes de emisiones electromagnéticas si no se controla adecuadamente su ruteo y referencia de retorno.

Como recomendación general:

- Mantener las rutas lo más cortas posible.
- Agrupar las señales pertenecientes al mismo bus para reducir áreas de lazo y evitar trayectorias de retorno dispersas.
- Evitar su proximidad con fuentes de conmutación o circuitos de potencia.
- Garantizar que las rutas se encuentren siempre referenciadas a un plano continuo de retorno.

- En el caso de buses diferenciales, como CAN, mantener el par de conductores acoplado y con geometría simétrica a lo largo de su recorrido para preservar el balance diferencial y evitar conversiones a modo común.

Estas prácticas permiten reducir la conversión a modo común, limitar la radiación electromagnética no intencionada y mejorar la inmunidad del bus frente a perturbaciones externas.

Radiofrecuencia Las siguientes consideraciones representan las recomendaciones mínimas a considerar para el diseño de rutas de radiofrecuencia:

- Separación física estricta respecto de conmutación, relojes y buses.
- Ruteo de impedancia controlada; microstrip o stripline.
- Evitar discontinuidades geométricas o cambios abruptos de capa.

Estas prácticas también ayudan a evitar la presencia de energía RF estacionaria que pueda regresar hacia su fuente.

Planos de tierra y retorno de corriente

El uso de planos de tierra continuos es central en EMC a nivel subsistema. La razón principal es que el retorno de corriente de señales rápidas tiende a seguir el camino de menor impedancia. Como se ilustra en la Figura 4.5, el camino de retorno de señales de alta frecuencia no sigue necesariamente trayectorias geométricamente definidas, sino aquellas que presentan menor impedancia electromagnética.

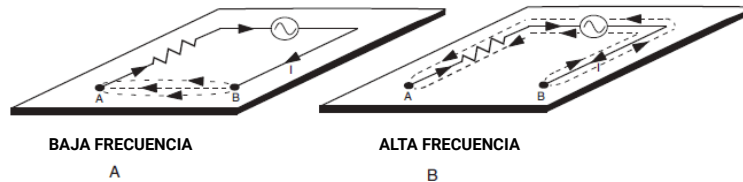


Figura 4.5: Trayectoria del retorno de corriente en un plano de referencia: (A) a baja frecuencia el retorno sigue el camino de menor resistencia, mientras que (B) a alta frecuencia sigue el camino de menor inductancia, concentrándose debajo de la traza de señal (adaptado de Ott, 2009, p. 122).

4.2.3. Nivel integración

Una vez diseñados los subsistemas de manera individual, es necesario evaluar su interacción dentro de la arquitectura completa del vehículo. En este nivel se analiza la convivencia electromagnética de múltiples subsistemas operando simultáneamente dentro de una misma estructura física y compartiendo recursos comunes como alimentación, referencias eléctricas, cableado y enlaces de comunicación.

El objetivo principal de esta etapa es identificar mecanismos de acoplamiento que no son evidentes durante el diseño aislado de cada subsistema, pero que pueden manifestarse una vez integrados dentro del sistema completo. Los estándares aeroespaciales de compatibilidad electromagnética consideran esta etapa como parte fundamental del proceso de desarrollo, ya que permite verificar la correcta interacción entre interfaces y asegurar que el sistema mantenga un comportamiento electromagnéticamente compatible durante su operación (European Cooperation for Space Standardization, 2008; International Organization for Standardization, 2002).

Referencia eléctrica común

Uno de los aspectos más importantes durante la integración consiste en definir una filosofía de referencia eléctrica común para todos los subsistemas. La ausencia de una referencia compartida puede generar diferencias de potencial, corrientes de modo común y trayectorias de retorno no controladas, incrementando la probabilidad de interferencia electromagnética.

Por esta razón, todas las interfaces eléctricas deben diseñarse considerando una estrategia de referencia global que permita controlar las corrientes de retorno y reducir el acoplamiento entre subsistemas. Una filosofía consistente de puesta a tierra y retorno de corriente constituye uno de los pilares fundamentales para lograr compatibilidad electromagnética a nivel sistema (Ott, 2009; Weston, 2016).

En vehículos aeroespaciales, una alternativa común consiste en utilizar elementos estructurales metálicos como referencia eléctrica compartida. Dependiendo de la arquitectura del vehículo, estructuras que albergan componentes electrónicos, soportes mecánicos o incluso elementos metálicos de gran tamaño, como tanques cercanos a la bahía de aviónica, pueden emplearse como referencia común siempre que se garantice continuidad eléctrica adecuada y baja impedancia para las corrientes de retorno. Esta aproximación permite reducir la cantidad de conductores dedicados, simplificar el cableado y proporcionar una referencia uniforme para múltiples subsistemas (Perez, 2019).

La selección de la referencia estructural debe realizarse durante la integración del sistema, verificando que las trayectorias de retorno sean predecibles y evitando que corrientes de potencia o conmutación circulen por zonas destinadas a señales sensibles. De esta manera se minimiza el acoplamiento entre subsistemas y se mejora el desempeño electromagnético global del vehículo (Weston, 2016).

Cableado e interconexiones

Las interconexiones entre subsistemas representan una de las principales rutas de propagación de interferencias electromagnéticas. En consecuencia, el diseño del cableado debe realizarse considerando tanto la integridad de señal como la compatibilidad electromagnética.

Como criterios generales se recomienda:

- Utilizar pares trenzados para señales susceptibles al acoplamiento magnético.
- Mantener separación física entre líneas de potencia y señales sensibles.
- Minimizar áreas de lazo asociadas a trayectorias de ida y retorno.
- Evitar recorridos innecesariamente largos.

El uso de pares trenzados permite reducir el área efectiva del lazo formado por los conductores y, por tanto, disminuir la susceptibilidad frente a campos magnéticos externos, así como las emisiones generadas por las propias corrientes transportadas (Ott, 2009; Weston, 2016).

Blindajes y estructura

La estructura mecánica del vehículo también forma parte del entorno electromagnético del sistema. Dependiendo de sus materiales y geometría, puede actuar como plano de referencia, trayectoria de retorno de corriente o incluso modificar la propagación de campos electromagnéticos dentro del vehículo.

Cuando se empleen blindajes, estos deben implementarse como parte de una estrategia integral de diseño. Un blindaje incorrectamente terminado o conectado puede resultar poco efectivo e incluso favorecer la circulación de corrientes no deseadas. Por esta razón, tanto el blindaje como sus terminaciones deben evaluarse durante la integración del sistema y no únicamente durante el diseño individual de los subsistemas (Ott, 2009; Weston, 2016).

Asimismo, en sistemas que incorporan enlaces inalámbricos, telemetría, etc, debe verificarse que los materiales estructurales no degraden significativamente la propagación de las señales de radiofrecuencia. En estos casos, elementos como fuselajes, cubiertas o compartimientos cercanos a las antenas deben permitir el funcionamiento adecuado de los sistemas de comunicación (International Organization for Standardization, 2002).

Compatibilidad entre subsistemas

Finalmente, durante la integración se evalúa la coexistencia de los distintos subsistemas dentro de un mismo entorno electromagnético. La proximidad entre sistemas digitales, electrónica de potencia, transmisores de radiofrecuencia, sensores y sistemas de adquisición puede generar mecanismos de acoplamiento adicionales que no fueron observados durante el desarrollo individual de cada subsistema.

Por ello, esta etapa permite identificar riesgos asociados a interfaces compartidas, referencias eléctricas comunes, cableado, blindajes y distribución física de equipos antes de proceder a la validación del sistema completo. De esta manera, el nivel de integración actúa como un puente entre el diseño electromagnético de los subsistemas y la verificación EMC del vehículo completo, permitiendo detectar problemas potenciales antes de etapas avanzadas de prueba y validación (European Cooperation for Space Standardization, 2008; International Organization for Standardization, 2002; Ott, 2009).

4.3. Metodología aplicada: arquitectura del sistema del vehículo Xitle II

En esta sección se describe la arquitectura del vehículo y los factores de diseño considerados durante la implementación de la metodología de compatibilidad electromagnética propuesta. A diferencia de un proceso de evaluación realizado sobre un sistema ya desarrollado, la metodología fue empleada como una herramienta de diseño desde las etapas iniciales de definición de la arquitectura, permitiendo incorporar criterios de EMC durante la selección de componentes, la distribución física de los subsistemas, el diseño de las interconexiones y la definición de interfaces.

Para ello, se parte de las necesidades funcionales del vehículo, tales como la adquisición de datos, la activación de sistemas, el monitoreo de variables y la comunicación con tierra. A partir de estas necesidades se define la arquitectura de los subsistemas requeridos, incluyendo la bahía de aviónica, el sistema de monitoreo y actuación, la estación terrena y los enlaces de comunicación. Cada solución se plantea considerando simultáneamente su función dentro de la misión y los criterios de compatibilidad electromagnética establecidos en la metodología, de manera que el diseño no sólo responda a una tarea operativa, sino que también favorezca la coexistencia electromagnética entre los elementos del Xitle II.

4.3.1. Bahía de aviónica

La bahía de aviónica del cohete experimental de propulsión híbrido Xitle II constituye el núcleo encargado de albergar los sistemas electrónicos responsables de la adquisición de datos y recuperación durante la misión.

Desde el punto de vista funcional, la bahía debe albergar cuatro sistemas principales representados en la figura 4.6. Estos subsistemas fueron seleccionados debido a los requerimientos y reglas de la competencia SAC.

- **Computadora SRAD:** encargada de gestionar el sistema de recuperación de forma autónoma.
- **Computadora COTS RRC3:** que funge como sistema redundante, asegurando la operación ante una posible falla de la computadora principal.
- **Computadora COTS Azurita:** que funge como sistema de recolección de datos durante el vuelo .
- **GPS comercial Featherweight:** su función es la localización en tiempo real del vehículo durante y después del vuelo.

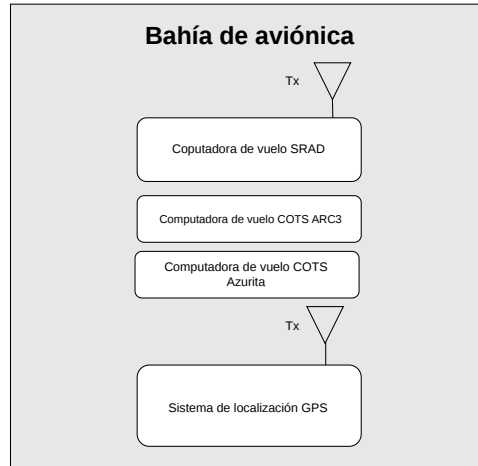


Figura 4.6: Diagrama de bloques general de la bahía de aviónica

Para entender un poco el sistema de recuperación mecánico desarrollado por la división de Aeroestructuras de Propulsión UNAM, este sistema se basa en la activación de cargas pirotécnicas que liberan un punzón mecánico para perforar cartuchos de CO_2 ; la diferencia de presión resultante provoca la eyección de la nariz y la liberación secuencial de los paracaídas *Droque* y *Main*, garantizando así la recuperación controlada del vehículo. Los subsistemas encargados de esta tarea son la computadora de vuelo SRAD *ASYB* y la computadora COTS *RRC3*.

Para el diseño de la computadora *ASYB* se determinaron los siguientes criterios funcionales primordiales que debe desempeñar un subsistema de este estilo

1. Un componente capaz de caracterizar la altura del vehículo.
2. Un componente o módulo de comunicación inalámbrico capaz de transmitir datos a tierra.
3. Un componente o subsistema capaz de suministrar suficiente corriente para la activación del sistema de recuperación
4. Un *cerebro* que sea capaz de procesar, gestionar y empaquetar información.

Esta descripción nos permite conocer las necesidades del subsistema, a continuación se describe detalladamente el proceso de diseño, manufactura e integración relacionados a la bahía de aviónica.

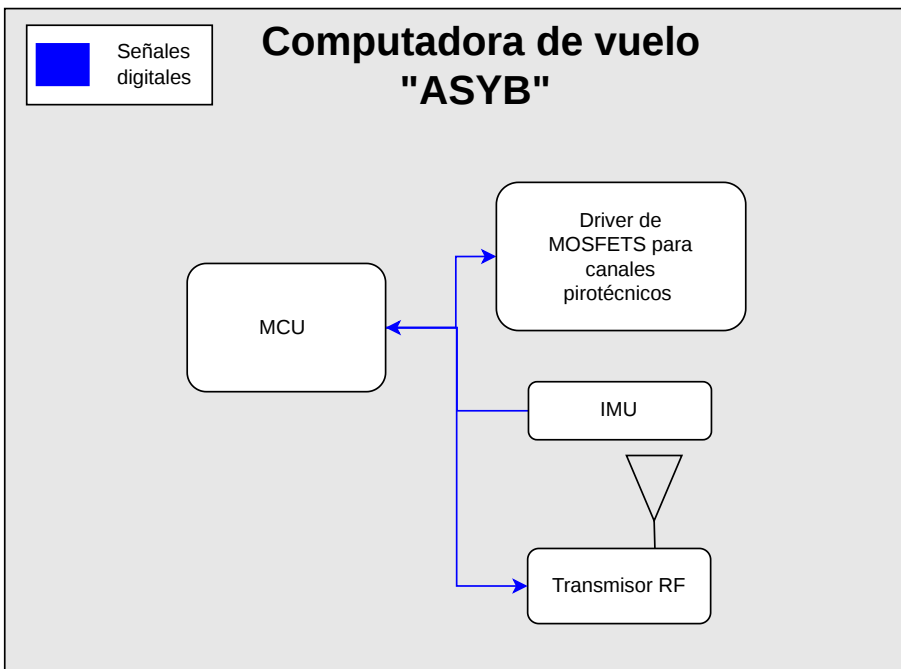
Nivel componente

En esta tesis no se pretende detallar las especificaciones técnicas internas de los equipos *Commercial Off-The-Shelf* (COTS), ya que la información completa de dichos dispositivos no se encuentra disponible. En su lugar, se presentarán únicamente los valores nominales de relevancia que inciden en el estudio de compatibilidad electromagnética, garantizando un análisis riguroso dentro de las limitaciones de información.

Habiendo descrito a grandes rasgos la configuración esperada y funciones de la bahía de aviónica, en este apartado se explicara como se abordó la metodología propuesta anteriormente, basada en un diseño estructurado en tres niveles: **componente**, **subsistema** e **integración**. Esta descomposición jerárquica responde a la metodología de diseño planteada, donde cada etapa permite caracterizar primero las unidades individuales, posteriormente los conjuntos funcionales, y finalmente la integración al sistema completo.

Computadora de vuelo SRAD: ASYB La computadora de vuelo SRAD desarrollada por la división de aviónica, denominada internamente ASYB, constituye el núcleo de control de la bahía de aviónica. Su diseño y construcción fue realizado por la autora de la presente tesis en colaboración con Oscar Baños, Lidia Monroy y Natalie Roldán, trabajo que se documentó previamente en un paper presentado en el congreso CONACES. La Figura 4.7 muestra el diagrama de bloques funcionales de la computadora ASYB, donde se identifican los principales módulos que responden a las necesidades antes planteadas en este subsistema:

- Una unidad microcontroladora basada en una MCU, encargada de la ejecución de algoritmos de vuelo y del procesamiento de señales.
- Un conjunto de sensores inerciales y ambientales; acelerómetro, giroscopio y barómetro, que proveen información en tiempo real, haciendo uso de la IMU podremos determinar la altura del vehículo para el desarrollo de la lógica pertinente para la recuperación del mismo.
- Canales pirotécnicos, controlados mediante drivers de MOSFET y MOSFETS, destinados a la activación del sistema de recuperación.
- Un subsistema de comunicaciones RF para transmisión de telemetría hacia la estación terrena.



Tx

Figura 4.7: Diagrama funcional general de la computadora de vuelo ASYB.

Una vez identificados los recursos necesarios para desarrollar este subsistema se debe responder a la preguntas planteadas en la metodología; ¿Es funcional? y ¿Se puede implementar?. En el cuadro 4.1 se esclarece la selección de los componentes, estos fueron seleccionados debido a su precio, accesibilidad, facilidad de implementación y capacidades técnicas e ingenieriles de los diseñadores y programadores, en este caso, la autora de esta tesis y sus colaboradores. Es muy importante hacer un análisis real de las limitaciones de la

misión, es muy fácil encontrar componentes sumamente atractivos o que incluso parecen hacer más tareas de las necesarias, sin embargo, las limitaciones no solo radican en la disponibilidad sino en la facilidad de manejo de un componente o módulo. Un proyecto de esta índole y destinado para una competencia debe conocerse a detalle ya que los diseñadores y operadores tendrán la responsabilidad de resolver errores e implementar soluciones si hay un requerimiento de emergencia.

Cuadro 4.1: Componentes principales de la bahía de aviónica

Módulo	Componente
MCU	Raspberry Pi Pico
IMU	GY-87
Comunicación	LoRa RFM95W
Liberación	NCE6020AK
Potencia	Reguladores conmutados

A continuación se presenta la tabla de característica de señales que exige la metodología, esta información nos ayudara en el nivel subsistema a gestionar las señales según su naturaleza. Recordando la metodología propuesta, es importante conocer las características electromagnéticas de las señales para asignar un tratamiento y disposición correcto, siempre considerando la capacidad mecánica, espacial y técnica de dicho sistema.

Cuadro 4.2: Parámetros eléctricos y funcionales de los subsistemas de la computadora de vuelo ASYB

Componente	Tipo de señal	f [Hz]	V_{op} [V]	I_{op} [A]	Notas
Mini 560 Step Down	Analógica (conmutada DC/DC)	500 000	4–23 (in) / 5 (out)	¡5	Convertor buck síncrono, eficiencia máx. 99 %, rango térmico -40 a +85 °C.
Raspberry Pi Pico – XOSC	Oscilador de referencia	12 000 000	3.3	0.09	Cristal externo de 12 MHz para PLL internos. Fuente primaria de armónicos.
Raspberry Pi Pico – CPU	Reloj del sistema	125–133 000 000	3.3	0.09	Frecuencia nominal 125 MHz. Principal contribuyente a emisiones digitales HF.
Raspberry Pi Pico – USB	Reloj USB	48 000 000	3.3	0.09	Derivado de PLL interno, conforme a especificación USB.
GY-87 (módulo)	Digital (I ² C)	Depende del sensor	3.3–5.0	~0.01	Módulo multisensor con IMU, magnetómetro y barómetro.
MPU-6050 (IMU)	Digital (I ² C)	Gyro: 8 kHz / Accel: 1 kHz	3.3	0.0036	IMU de 6 ejes, ADC 16 bits, filtro DLPF configurable.
HMC5883L (Magnetómetro)	Digital (I ² C)	75 Hz	3.3	0.0001	Magnetómetro triaxial, ±8 gauss, resolución 12 bits.
BMP180 (Barómetro)	Digital (I ² C)	≤ 40 Hz	3.3	0.000012	Sensor presión/temperatura, resolución 0.01 hPa.
RFM95W (LoRa, TX)	RF analógica	915×10 ⁶	3.3	0.12–0.13	Transmisión +20 dBm, banda ISM 915 MHz, modulación LoRa.
Continúa en la siguiente página					

Cuadro 4.2 – continuación					
Componente	Tipo de señal	f [Hz]	V_{op} [V]	I_{op} [A]	Notas
RFM95W (LoRa, RX)	RF analógica	915×10^6	3.3	0.010–0.016	Recepción activa, sensibilidad hasta -148 dBm.
SPI (MCU–RFM95W)	Digital síncrona	$1\text{--}10 \times 10^6$	3.3	~ 0.01	Interfaz de control, máx. 10 MHz.
Buzzer piezoeléctrico	Digital (PWM)	23 000	3 / 5 / 12	0.03	Controlado por MCU, nivel sonoro 85 dB a 10 cm.
MOSFET canal N (TO-252-2)	Analógica (conmutada)	1 000 000	60 máx.	20 máx.	$V_{GS(th)} = 2,5$ V, $R_{DS(on)} = 35$ m Ω , disipación 45 W. RoHS.
MOSFET NCE6020AK (pirotécnico)	Digital (conmutación)	0–1 000	12.0	20	$V_{DS} = 60$ V máx., $I_D = 20$ A, $R_{DS(on)} = 35$ m Ω @ $V_{GS} = 10$ V. Control de canales pirotécnicos.

Identificando las características de las señales se propone un diagrama que nos permite identificar el tipo de alimentación que necesitará cada subsistema que podemos ver en la figura 4.8. Este proceso es de gran ayuda ya que nos permite centralizar la información de los componentes para su tratamiento EMC y operacionalmente nos ayuda realizar un BOM, con el cual podemos calcular costos aproximados y organizar el diseño y obtención de materiales de una mejor forma. A pesar que esto último mencionado no forma parte de criterios de diseño EMC permite a equipos de coherencia experimental tener procesos mas controlados.

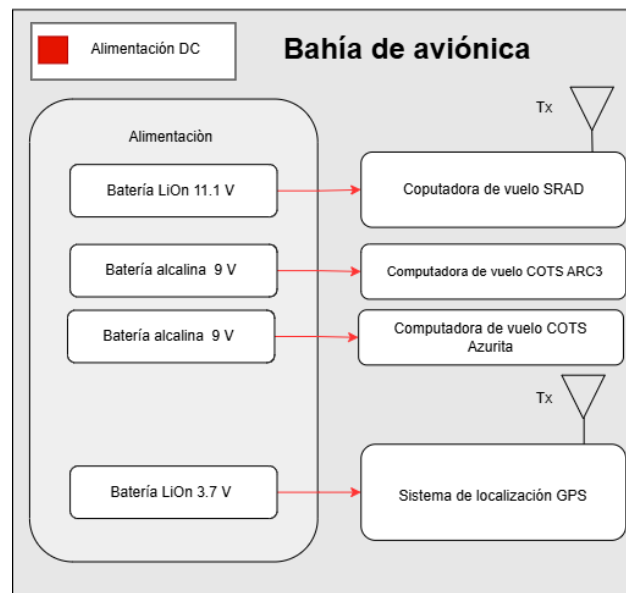


Figura 4.8: Diagrama de bloques que representa los subsistemas y el tipo de alimentación que requiere cada uno de ellos en la Bahía de aviónica

Es importante destacar que el diseño de la computadora ASYB se llevó a cabo bajo una filosofía de **segmentación funcional**, donde cada bloque funcional como alimentación, control, sensado, comunicaciones y activación pirotécnica se encuentra delimitado en el PCB, lo que favorece el control de interferencias electromagnéticas y la trazabilidad de las señales críticas, dicho trabajo se puede ver en la figura 4.9. Esta segmentación proviene del conocimiento de las carteristas electromagnéticas presentadas en el cuadro 4.2, con este se planifica la arquitectura de tal forma que permita analizar de manera independiente las trayectorias

de señal y los posibles puntos de acoplamiento, facilitando la implementación de medidas de compatibilidad electromagnética en fases posteriores (Zepeda Sandoval et al., 2024).

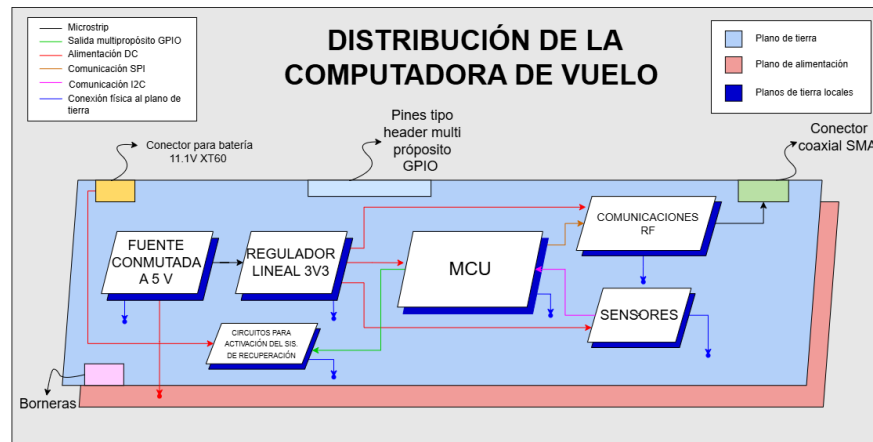


Figura 4.9: Distribución interna de señales, planos de tierra y alimentación en la computadora ASYB.

Podemos ver en la Figura 4.9 el siguiente tratamiento

- La entrada principal de energía se realiza mediante conector XT60, que alimenta a la fuente conmutada a 5 V y posteriormente al regulador lineal de 3.3 V. Esta zona se encuentra aislada ya que la fuente conmutada, por sus características electromagnéticas, puede ser un potencial causante de EMI.
- El MCU central se comunica con los sensores a través de buses digitales SPI e I^2C , asegurando la sincronización de datos de vuelo.
- Los circuitos pirotécnicos están aislados en un bloque funcional independiente, con activación controlada desde el MCU y conducción mediante MOSFETs de potencia. Hay un camino de retorno claro.
- El transmisor RF cuenta con un conector coaxial SMA y plano de tierra específico para minimizar acoplamientos indeseados, de igual forma a la salida del modulo de radio se encuentra una guía de onda coplanar; la cual asegura la integridad de la señal.

Para poder entender un poco más el comportamiento del electromagnético en la computadora de vuelo se adjunta una imagen ilustrativa de la configuración real de los componentes que la integran.

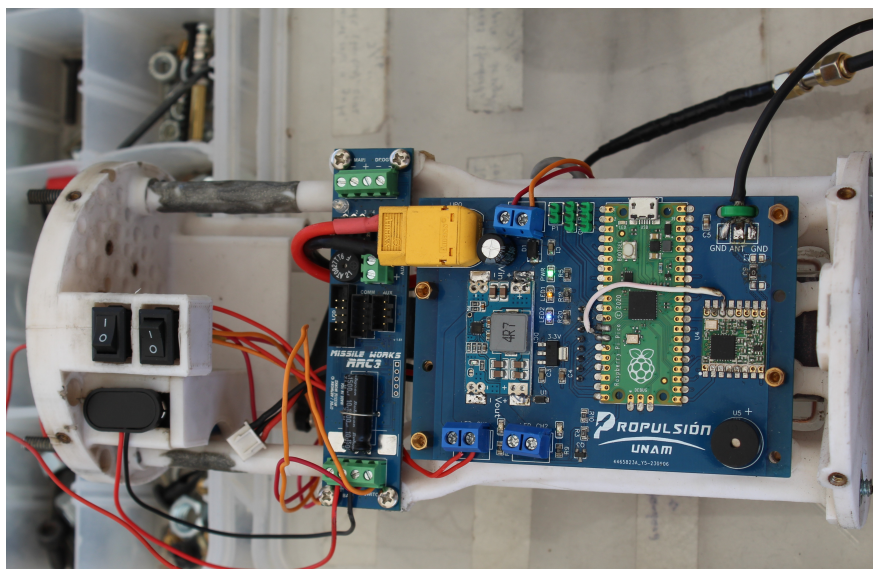


Figura 4.10: Foto de la computadora de vuelo ASYB durante el vuelo del cohete KomodoAP 2023

En la computadora de vuelo ASYB se identifican diversos mecanismos de acoplamiento electromagnético derivados de la geometría de las trayectorias y de la estructura de planos de referencia. El plano superior corresponde a GND y el plano inferior a 5 V; aunque este último únicamente alimenta al driver del MOSFET del sistema pirotécnico, ambos planos mantienen una relación de referencia común que puede dar lugar a acoplamiento por impedancia común que puede verse reflejado en los estrechamientos del retorno. El resto de los subsistemas, incluyendo la tarjeta de desarrollo, los sensores y el módulo de RF se alimentan mediante un regulador lineal de 3.3 V, cuya topología tipo estrella reduce el ruido conducido hacia las etapas sensibles, pero no elimina los efectos de las corrientes pulsantes generadas en la etapa de potencia. Adicionalmente, la superposición de pistas sobre planos metálicos genera acoplamiento capacitivo, de modo que el ruido con altos gradientes de tensión ($\frac{dV}{dt}$), proveniente de la fuente conmutada, puede transferirse hacia señales cercanas a través de capacitancias parásitas. Por otra parte, la configuración de alimentación en topología tipo estrella contribuye a disminuir la capacitancia parásita entre ramas, aunque cada trayectoria larga de 5 V y su retorno asociado en GND forma *loops* inductivos capaces de acoplarse magnéticamente; esto es particularmente relevante en la zona del *driver* y los canales pirotécnicos, que constituyen las principales fuentes de perturbaciones electromagnéticas dentro de la computadora de vuelo ASYB. Por sus características y componentes podemos predecir que el componente más propenso a generar EMI es la fuente conmutada.

Computadora de vuelo COTS (RRC3) La computadora comercial de tipo *COTS* (Commercial Off-The-Shelf) denominada **RRC3 – Rocket Recovery Controller 3**, fabricada por MissileWorks, cumple la función de redundancia en el sistema de recuperación del cohete híbrido Xitle II. Su propósito principal es garantizar la activación confiable de los mecanismos pirotécnicos de despliegue de paracaídas, drogue y main, aun en caso de fallo de la computadora de vuelo principal.

La Figura 4.11 muestra la distribución de los principales conectores y puertos de la computadora comercial. Se distinguen tres interfaces críticas: el conector de batería de 9 V, el puerto para programación y descarga de datos de vuelo, y las borneras de salida que permiten la conexión directa a las cargas pirotécnicas del sistema de recuperación. Esta disposición física facilita tanto la integración dentro de la bahía de aviónica como las operaciones de armado, prueba y mantenimiento previo al lanzamiento.

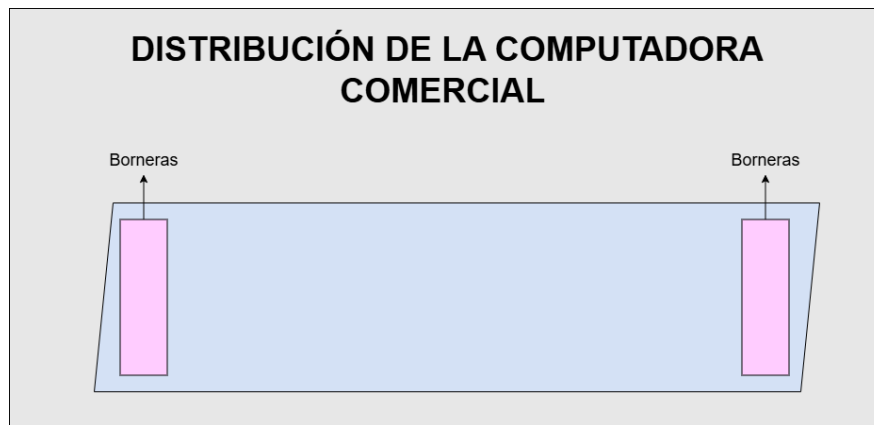


Figura 4.11: Distribución de puertos y conectores de la computadora comercial RRC3.

En el cuadro 4.3 se presentan las especificaciones técnicas de la computadora RRC3. Estas incluyen las características del microcontrolador, la memoria de vuelo, el sensor barométrico integrado, los rangos de operación y los parámetros eléctricos relevantes como voltajes de alimentación, corrientes de prueba y disparo, así como las dimensiones físicas de la tarjeta. Dichos valores son fundamentales para la integración electromagnética y eléctrica dentro del sistema de aviónica del vehículo.

Cuadro 4.3: Parámetros eléctricos y electromagnéticos de la computadora comercial RRC3 – Rocket Recovery Controller 3.

Subsistema / Componente	Tipo de señal	f [Hz]	V_{op} [V]	I_{op} [A]	Notas
RRC3 – Rocket Recovery Controller	Digital (MCU principal)	16 000 000	3.5–10	0.00005	Microcontrolador MSP430 de 16 bits y bajo consumo. Frecuencia de reloj de 16 MHz. Alimentación típica con batería de 9 V.
Sensor barométrico MS5607	Digital (SPI/I ² C)	100 000	3.3	0.00002	Sensor de presión y temperatura de 24 bits con conversor $\Delta\Sigma$ ADC. Comunicación digital con la MCU.
Circuito de disparo (ignitor)	Analógica (pulso DC)	1	9	3	Activación durante 1 s para las etapas <i>drogue</i> y <i>main</i> .
Modo de prueba / reposo	Digital	0	9	0.000017–0.00005	Corriente de prueba entre 17–50 μ A según la batería utilizada.

A continuación se presenta una imagen de la computadora de vuelo comercial.

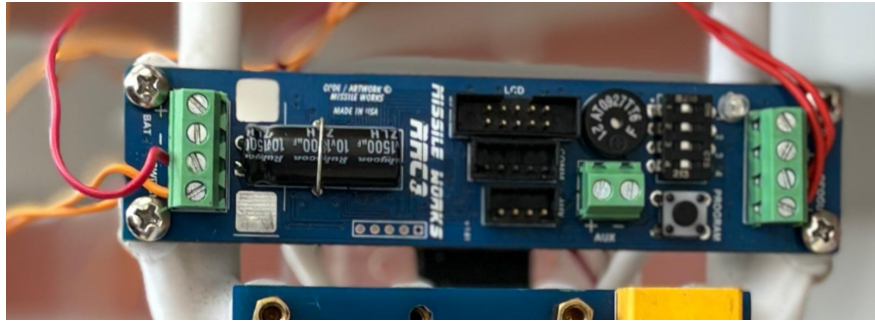


Figura 4.12: Computadora comercial RRC3

GPS Featherweight El rastreador comercial Featherweight GPS Tracker es el subsistema encargado de monitorear en tiempo real la posición, velocidad y trayectoria del cohete híbrido Xitle II. Su función principal es transmitir datos de localización a la estación terrena mediante el protocolo de radiofrecuencia LoRa en la banda de 915 MHz. De esta forma, se garantiza el seguimiento del vehículo durante el ascenso, la detección de eventos críticos como el apogeo y la recuperación posterior al aterrizaje.

El sistema incluye tanto el módulo de vuelo como una estación terrena portátil, la cual recibe los datos vía LoRa y los retransmite mediante Bluetooth a una aplicación móvil, donde se visualizan parámetros como altitud, velocidad y estado de las comunicaciones. Este mecanismo proporciona redundancia y seguridad operacional, ya que permite localizar el vehículo incluso en caso de pérdida de línea de vista directa.

La Figura 4.13 muestra la distribución de los principales puertos y conectores del rastreador, incluyendo el conector de batería, el conector coaxial SMA para antena externa, borneras de conexión y el interruptor de dos posiciones.

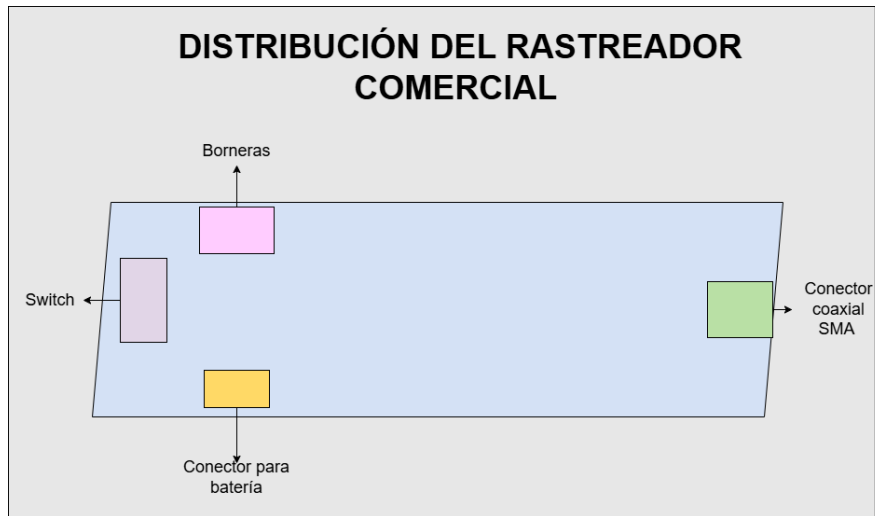


Figura 4.13: Distribución de puertos y conectores del rastreador comercial Featherweight GPS Tracker.

En el cuadro 4.4 se presenta el resumen de parámetros eléctricos y de señal del rastreador, relevantes para el análisis de compatibilidad electromagnética EMC dentro del sistema de aviónica del vehículo.

Cuadro 4.4: Parámetros eléctricos y electromagnéticos del rastreador comercial Featherweight GPS Tracker.

Subsistema / Señal	Tipo de señal	f [Hz]	V_{op} [V]	I_{op} [A]	Notas
Transmisor LoRa (RF)	Analógica (RF)	915 000 000	3.7	0.112	Transmisión LoRa en banda ISM de 915 MHz. Corriente máxima durante emisión.
Receptor GPS	Analógica (RF)	1 575 420 000	3.7	0.06	Recepción en banda L1 GPS. Requiere antena externa tipo SMA con blindaje.
Interfaz Bluetooth	Digital (RF)	2 400 000 000	3.7	0.03	Comunicación inalámbrica local con estación terrestre o dispositivo móvil.
Alimentación (batería Li-Po)	Analógica (DC)	0	3.4–4.5	0.086	Batería Li-Po de 400 mAh dedicada; autonomía de 4–6 h según el ciclo de transmisión.

A continuación se presenta una imagen para apreciar los componentes que integran al rastreador.



Figura 4.14: Rastreador comercial

Computadora comercial Azurita La computadora de vuelo Azurita realiza adquisición y procesamiento de información en el vehículo experimental. Su función principal es registrar los parámetros de vuelo. Integra un microcontrolador STM32F103 (Cortex-M3 a 48 MHz) que procesa datos provenientes de una unidad inercial MPU6050 (acelerómetro y giróscopo triaxiales) y un sensor barométrico BMP280 para estimar altitud y velocidad vertical. El sistema se alimenta con una fuente externa de 5.5 V a 14 V, o mediante puerto micro-USB (5 V) en modo de programación. Dispone de dos canales de salida de potencia capaces de entregar hasta 3 A cada uno por intervalos cortos de 0.8 s para la activación de cargas pirotécnicas. La arquitectura combina señales analógicas de alimentación y digitales de comunicación; I²C, SPI y USB FS 12 MHz, con almacenamiento local en memoria Flash NOR de 8 Mbit. Por su operación en entorno electromagnético intenso, la Azurita debe considerarse un subsistema crítico de susceptibilidad electromagnética, particularmente frente a transitorios conducidos y campos radiados de baja frecuencia.

Cuadro 4.5: Parámetros eléctricos y electromagnéticos de la computadora de vuelo Azurita.

Subsistema / Señal	Tipo de señal	f [Hz]	V_{op} [V]	I_{op} [A]	Notas
Microcontrolador STM32F103	Digital (lógica CMOS)	48 000 000	3.3	0.05	Procesamiento principal del sistema de vuelo. Frecuencia de reloj interna; sensible a acoplamientos por transitorios rápidos.
Sensor barométrico BMP280	Digital (I ² C)	400 000	3.3	0.002	Adquisición de presión y temperatura. Comunicación serial I ² C. Requiere trazas cortas y desacoplo local.
Unidad inercial MPU6050	Digital (I ² C)	400 000	3.3	0.004	Acelerómetros y giróscopos triaxiales. Fuente de ruido interno en baja frecuencia.
Memoria Flash NOR	Digital (SPI)	12 000 000	3.3	0.003	Almacenamiento de datos de vuelo. Interfaz SPI con líneas de alta velocidad.
Interfaz USB FS	Digital (RF de datos)	12 000 000	5.0	0.015	Puerto para configuración y descarga de datos. Emite armónicos en banda HF.
Canales de salida pirotécnicos	Analógica (DC pulsante)	1	5.5–14	3.0	Dos canales de potencia conmutados por MOSFET; duración del pulso ~0.8 s. Fuente principal de emisiones transitorias.
Alimentación principal	Analógica (DC)	0	5.5–14	0.06	Entrada desde fuente externa no regulada. Incluye conversión local a 5 V y 3.3 V.

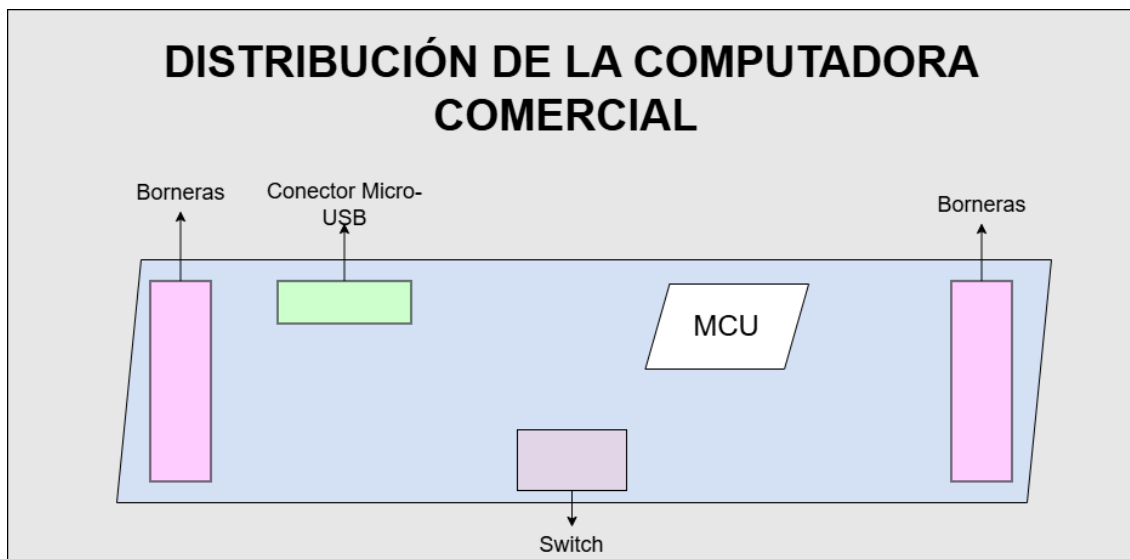


Figura 4.15: Distribución de puertos y conectores de la Azurita.

En la siguiente imagen se ejemplifica la distribución real de la computadora de vuelo comercial *Azurita*

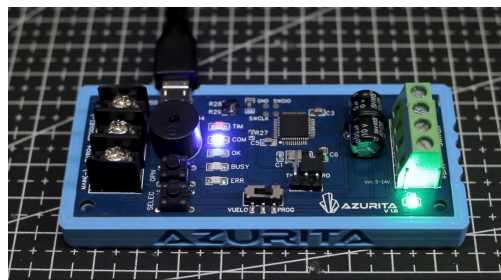


Figura 4.16: Foto de la "Azurita"

Nivel subsistema

Una vez descrito el comportamiento individual de cada unidad, se procede a disponer los componentes en la bahía de aviónica, considerando su configuración espacial mostrada en la Figura 4.17. La distribución y diseño mecánico fue propuesta por la subdivisión Aeroestructuras de Propulsión UNAM, de parte de la autora de esta tesis se sugirió una distribución que difícilmente pudieron seguir debido a las limitaciones de espacio, la recomendación central seguida fue la posición de la antena Moxón.

En este nivel el interés principal recae en las interacciones electromagnéticas internas, la definición de referencias comunes y la organización del cableado que conecta a la computadora SRAD, la computadora COTS y el rastreador GPS, todos alojados en un volumen reducido dentro de la nariz del vehículo.

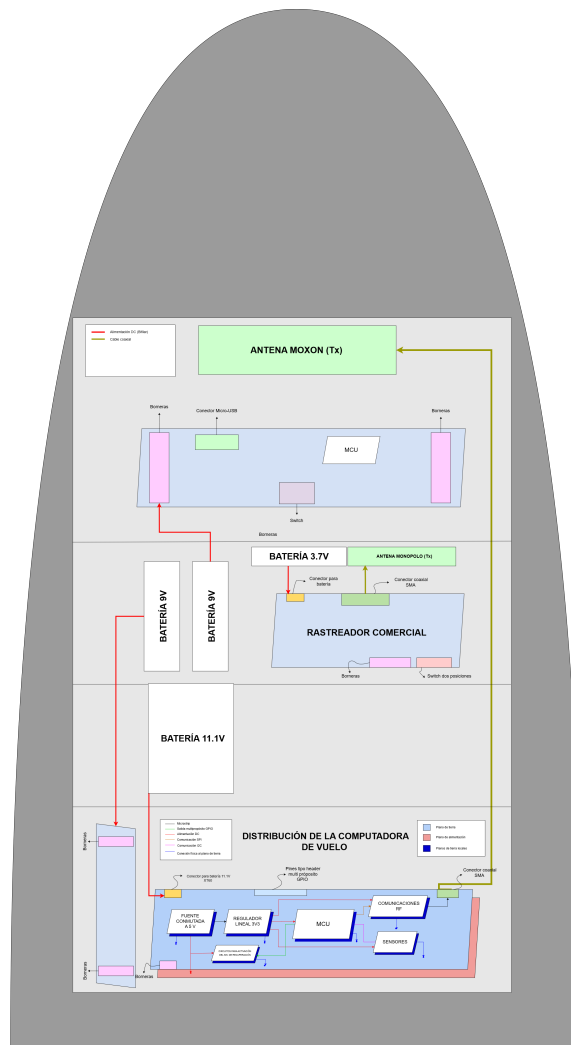


Figura 4.17: Esquema de la bahía de aviónica completa mostrando la disposición de equipos y antenas.

El esquema evidencia que los equipos se encuentran físicamente segregados, sin una referencia equipotencial única, esto se debió a las limitantes e incertidumbre en el diseño mecánico de la estructura, lo que disminuye el riesgo de acoplamiento por impedancia común pero obliga a definir un punto único de tierra conforme a los lineamientos de *grounding and bonding* establecidos en ECSS-E-ST-20-07C (European Cooperation for Space Standardization, 2008). La única medida preventiva considerada en el diseño fue la disposición relativa de las antenas, ubicadas de modo que sus lóbulos de radiación reduzcan el acoplamiento entre el transmisor LoRa y el receptor GPS.

No obstante, el análisis muestra la **ausencia de blindajes locales**, de **filtros en interfaces internas** y de **estructuras equipotenciales** que robustezcan la inmunidad del conjunto. Esto implica que, aunque se

satisfacen los requisitos básicos de misión no existe una integración formal de la metodología debido a las limitaciones que implica un trabajo multidisciplinario, en la figura 4.18 se puede observar la estructura que voló en el vehículo en la competencia SAC.



Figura 4.18: Foto de la bahía de aviónica

Siguiendo la filosofía de ISO 14302 (International Organization for Standardization, 2002), este nivel constituye la base para la validación posterior mediante ensayos de emisiones conducidas y radiadas, así como pruebas de susceptibilidad (CE, RE, CS y RS). En síntesis, el análisis a nivel subsistema confirma que el control de compatibilidad electromagnética depende principalmente de la segregación espacial, la gestión de interfaces y la definición temprana de referencias comunes, factores que resultarán determinantes durante la integración en el vehículo (Weston, 2016).

Nivel integración

En el nivel de integración se analiza la bahía de aviónica como parte del vehículo completo, considerando tanto su interacción con otros subsistemas como con el entorno electromagnético de misión. A diferencia de lo observado a nivel subsistema, durante la integración del cohete no se estableció ninguna conexión eléctrica entre la bahía y la estructura, de modo que no existió un acoplamiento formal a tierra de chasis ni un esquema de referencias equipotenciales. Esta condición dejó al sistema sin una trayectoria definida para corrientes de fuga ni un mecanismo de control frente a acoplamientos por impedancia común, contraviniendo los principios de *bonding and grounding* señalados en normas como ECSS-E-ST-20-07C y MIL-STD-461E (Department of Defense, 1999; European Cooperation for Space Standardization, 2008).

Adicionalmente, la bahía se encontraba expuesta a múltiples fuentes externas de interferencia, incluyendo las estaciones terrenas, el sistema de monitoreo y actuación, así como telefonía y otros medios de radiocomunicación en banda ISM. En este contexto, el análisis de desempeño electromagnético adquiere relevancia no sólo desde la perspectiva funcional, sino también desde la perspectiva estructural, es decir, la capacidad del subsistema para integrarse de manera coherente con el vehículo y con el ambiente electromagnético circundante.

El hecho de que no se implementaran medidas de compatibilidad electromagnética específicas para la integración del conjunto implica que la coherencia global de Xitle II frente a su entorno depende en gran medida del comportamiento individual de cada subsistema. Esta situación resalta la necesidad de establecer criterios de integración que aseguren continuidad de referencia, segregación de interfaces y validación de emisiones y susceptibilidad radiada y conducida a nivel vehículo, tal como recomiendan ISO 11452 y las guías de diseño preventivo en sistemas aeroespaciales (International Organization for Standardization, 2005; Ott, 2009; Weston, 2016). La integración evidenció la carencia de un marco sistemático de control electromagnético, lo que limita la compatibilidad entre subsistemas y con el entorno de misión.

4.3.2. Sistema de monitoreo y actuación

El sistema de monitoreo y actuación constituye un elemento primordial para el vehículo experimental Xitle II. Su relevancia radica en que debe integrar, de forma simultánea, la adquisición de parámetros críticos de la misión y la ejecución de maniobras asociadas al control del disparo del motor.

En términos de EMC, este subsistema presenta un escenario particularmente sensible debido a la coexistencia de placas de circuito impreso de monitoreo y actuación, alimentadas de manera independiente mediante baterías de distintas naturalezas. De acuerdo con la metodología jerárquica propuesta, se describirá el proceso de diseño desarrollado por Lidia Monroy y Carlos Andrade, con especial auditoria de la autora de esta tesis.

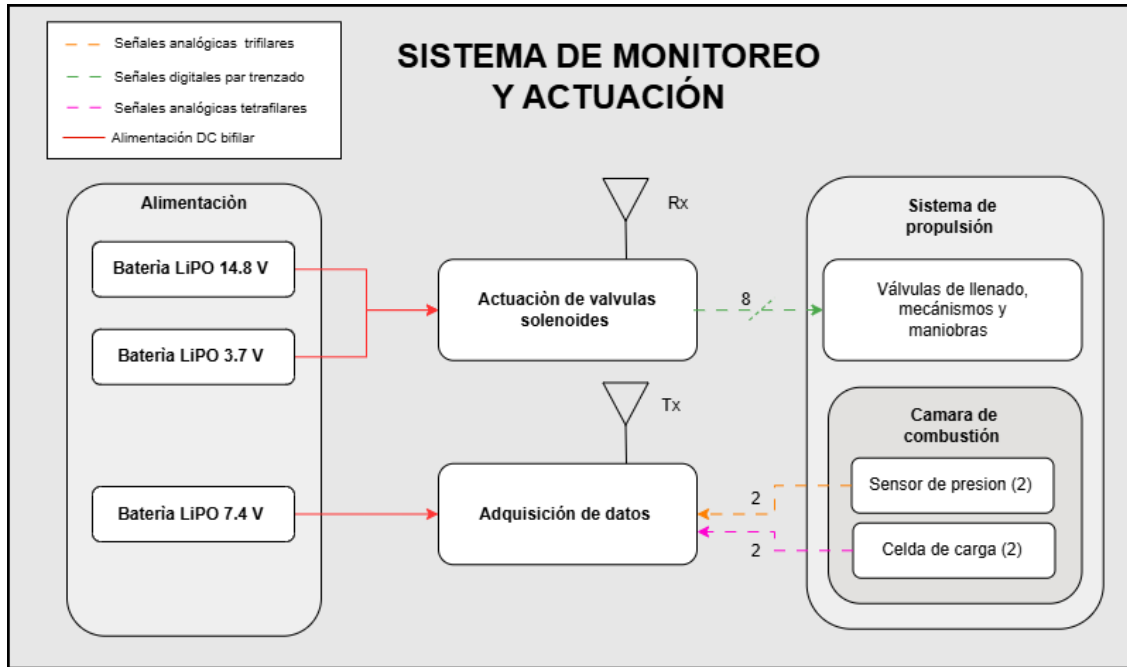


Figura 4.19: Esquema general del sistema de monitoreo y actuación del cohete Xitle II.

El sistema de monitoreo se encarga de medir la presión tanto en la GSE como en la cámara de combustión, a través de sensores que entregan señales analógicas hacia la placa de adquisición de datos. Durante pruebas estáticas, se pretende utilizar celdas de carga que permiten cuantificar el peso del tanque de oxidante y el empuje total del motor, en cambio, en vuelo se conserva únicamente la celda de carga asociada al peso del vehículo, indispensable para estimar la masa de óxido nítrico disponible previo al disparo del motor.

Por su parte, el sistema de actuación requiere de válvulas solenoides y mecanismos encargados del llenado del motor, para permitir o impedir el flujo de oxidante. La activación de estas válvulas se debe efectuar a partir de señales de comando transmitidas desde la estación terrena.

El sistema de monitoreo y actuación es una pieza clave en la misión para llevar al vuelo a Xitle II ya que la pérdida de comunicación o la susceptibilidad a interferencias electromagnéticas tendría un impacto directo en la seguridad y éxito de la misión.

Nivel componente

En este nivel se describen los requerimientos funcionales necesarios para sistema de monitoreo y actuación. El interés principal radica desarrollar un sistema funcional a partir de la metodología propuesta y con ella identificar las fuentes potenciales de EMI, las trayectorias de acoplamiento dentro de la placa y la manera en que el diseño físico contribuye a mitigar interferencias, si es que aplica.

Placa de adquisición de datos La placa de adquisición de datos tiene como objetivo obtener la presión de la cámara de combustión y de la GSE, así como estimar la cantidad de oxidante que hará posible el disparo del motor. Los requerimientos para el diseño de este subsistema son los siguientes

1. Un componente capaz de medir la presión en el tanque de oxidante y en la GSE
2. Un componente que nos permita estimar la cantidad de oxidante en el tanque a través del tiempo
3. Una unidad de procesamiento que gestione, procese y organice los datos

Después de un análisis exhaustivo y evaluación de componentes en el cuadro 4.6 se muestra la selección de componentes que desempeñaran estas tareas, agregando que se usaran sensores analógicos de presión tipo voltaje y celdas de carga que permitirán sensar las variables físicas, esta información se procesará a través del componente HX711 que está descrito en la tabla antes mencionada.

Cuadro 4.6: Parámetros eléctricos y funcionales de los subsistemas de la placa de adquisición de datos

Componente	Tipo de señal	f [Hz]	V_{op} [V]	I_{op} [A]	Notas
Mini 560 Step Down	Analógica (conmutada DC/DC)	500 000	7–28 (in) / 5 (out)	3	Conversor buck síncrono, eficiencia máx. 99 %, rango térmico -40 a +85 °C.
Raspberry Pi Pico – XOSC	Oscilador de referencia	12 000 000	3.3	0.09	Cristal externo de 12 MHz para PLL internos. Fuente primaria de armónicos.
Raspberry Pi Pico – CPU	Reloj del sistema	125–133 000 000	3.3	0.09	Frecuencia nominal 125 MHz. Principal contribuyente a emisiones digitales HF.
Raspberry Pi Pico – USB	Reloj USB	48 000 000	3.3	0.09	Derivado de PLL interno, conforme a especificación USB.
RFM95W (LoRa, TX)	RF analógica	915×10^6	3.3	0.12–0.13	Transmisión +20 dBm, banda ISM 915 MHz, modulación LoRa.
RFM95W (LoRa, RX)	RF analógica	915×10^6	3.3	0.010–0.016	Recepción activa, sensibilidad hasta -148 dBm.
SPI (MCU–RFM95W)	Digital síncrona	$1–10 \times 10^6$	3.3	~0.01	Interfaz de control, máx. 10 MHz.
RFM95W – Standby	Interna	0	3.3	~0.001	Estado de bajo consumo.
HX711 (ADC para celda de carga)	Analógica / Digital	10–80	5.0	0.0016	Convertidor A/D de 24 bits; frecuencia de refresco seleccionable de 10 Hz o 80 Hz.
MOSFET NCE6020AK (pirotécnico)	Digital (conmutación)	0–1 000	12.0	20	$V_{DS} = 60$ V máx., $I_D = 20$ A, $R_{DS(on)} = 35$ m Ω @ $V_{GS} = 10$ V. Control de canales pirotécnicos.

En términos de EMC, la placa de adquisición de datos integra diversos componentes que presentan susceptibilidad y, a su vez, son potenciales fuentes de EMI. Entre los elementos más críticos se encuentran el módulo de comunicación por radiofrecuencia, la fuente de alimentación conmutada y los circuitos de conmutación de potencia asociados al sistema de actuación. Adicionalmente, la placa emplea el convertidor analógico-digital HX711, especializado en mediciones de señal pequeña, cuyo rango dinámico y alta sensibilidad lo hacen especialmente vulnerable a interferencias electromagnéticas externas. En la figura 4.20 se presenta la distribución por bloques funcionales que fue revisada por la autora de esta tesis después de consejos solicitados por los diseñadores principales. Identificando un manejo adecuado de la repartición de señales y componentes en la tarjeta de circuito impreso.

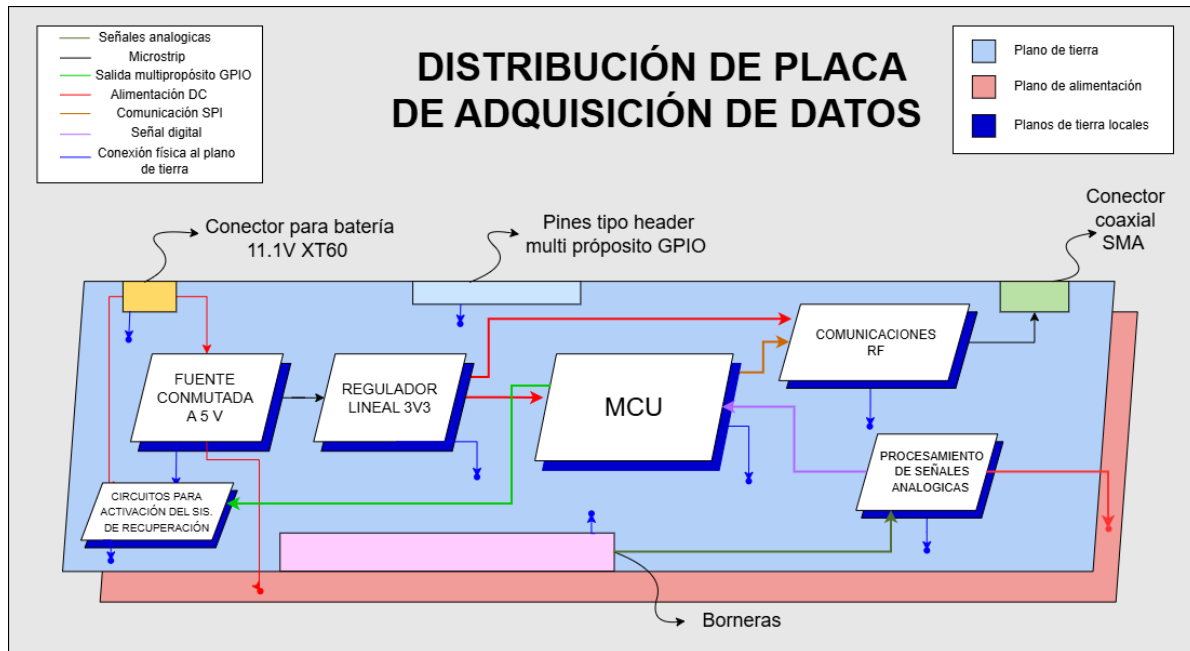


Figura 4.20: Distribución funcional de la placa de adquisición de datos.

Placa de actuación La placa de actuación tiene como propósito principal controlar la actuación de las válvulas solenoides y mecanismos que permiten o impiden el flujo de óxido nítrico hacia el tanque de oxidante. Así como la apertura de la válvula principal y la liberación del quick disconnect. Este diseño presenta un entorno electromagnético más exigente debido a la conmutación de cargas inductivas.

Para este diseño, el encargado del proyecto Oscar Baños identificó que requería de circuitos capaces de conmutar repetidamente en un tiempo prolongado. La decisión tomada por la autora de esta tesis y la división de aviónica del equipo Propulsión UNAM fue segmentar planos de alimentación, crear un plano de tierra para la unidad de procesamiento y otro para el potencial requerido para la apertura de las válvulas y mecanismos.

Como se observa en la Figura 4.21, la placa incorpora dos islas de alimentación: una de 12 V dedicada a los actuadores y una de 3.3 V para la lógica digital, ambas referenciadas a un plano de tierra común.

Los componentes principales se organizan en bloques funcionales que definen la operación de la tarjeta de circuito impreso. Aunque la segmentación en islas de alimentación reduce el riesgo de acoplamiento directo, el hecho de compartir un mismo plano de tierra constituye una vía de propagación de interferencias. Por lo tanto, es necesario implementar filtrado entre dominios de voltaje y una disposición física que minimice los bucles de corriente, a fin de garantizar la compatibilidad electromagnética del subsistema. En el cuadro 4.7 se presentan los parámetros eléctricos de los componentes asociados a este componente.

Cuadro 4.7: Parámetros eléctricos y funcionales de los subsistemas del sistema electrónico.

Subsistema / Componente	Tipo de señal	f [Hz]	V_{op} [V]	I_{op} [A]	Notas
Raspberry Pi Pico – XOSC	Oscilador de referencia	12 000 000	3.3	0.09	Cristal externo de 12 MHz para PLL internos. Fuente primaria de armónicos relevantes para emisiones radiadas.
Raspberry Pi Pico – CPU	Reloj del sistema	125–133 000 000	3.3	0.09	Frecuencia nominal 125 MHz, máximo recomendado 133 MHz. Principal contribuyente a emisiones digitales HF.
Raspberry Pi Pico – USB	Reloj USB	48 000 000	3.3	0.09	Derivado de PLL interno, conforme a especificación USB. Puede introducir componentes espectrales discretos en banda VHF.
RFM95W (LoRa, TX)	RF analógica	915×10^6	3.3	0.12–0.13	Transmisión +20 dBm, banda ISM 915 MHz, modulación LoRa (CSS).
RFM95W (LoRa, RX)	RF analógica	915×10^6	3.3	0.010–0.016	Recepción activa, sensibilidad hasta -148 dBm según SF y BW.
SPI (MCU–RFM95W)	Digital síncrona	$1\text{--}10 \times 10^6$	3.3	~ 0.01	Interfaz de control y configuración; máx. 10 MHz, típica 1–8 MHz.
RFM95W Standby	Interna	0	3.3	~ 0.001	Estado de bajo consumo sin transmisión ni recepción activa.
MOSFET NCE6020AK (pirotécnico)	Digital (conmutación)	0–1 000	12.0	20	$V_{DS} = 60$ V máx., $I_D = 20$ A, $R_{DS(on)} = 35$ m Ω @ $V_{GS} = 10$ V. Activa canales pirotécnicos mediante pulsos controlados desde la MCU.

En la figura 4.21 podemos observar la disposición de los componentes, la partición de los planos de alimentación y la presencia de un plano de referencia.

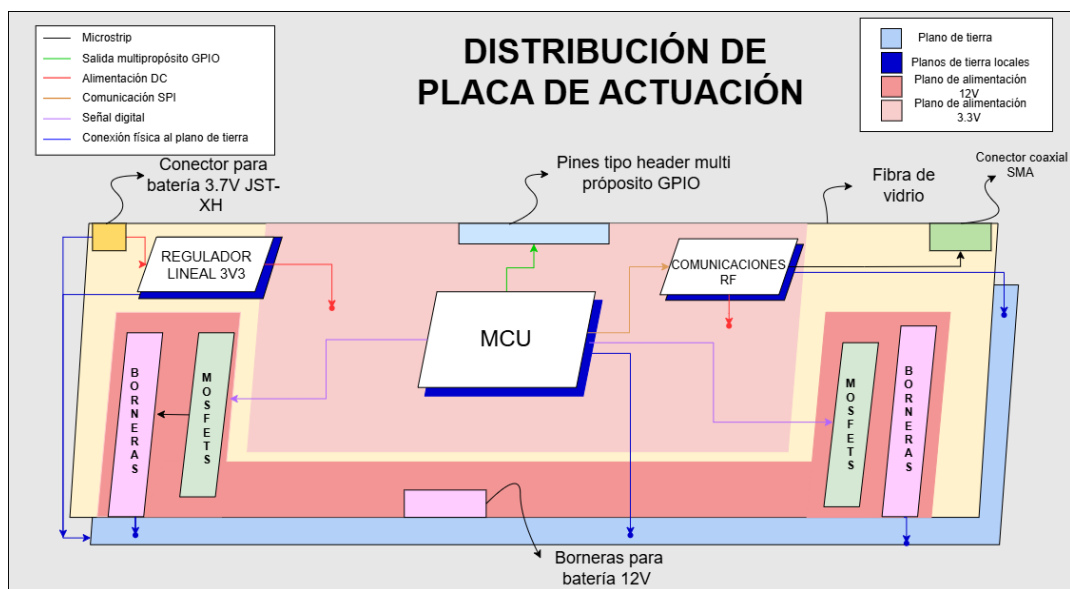


Figura 4.21: Distribución funcional de la placa de actuación.

A continuación se presenta la configuración real de la placa de actuadores

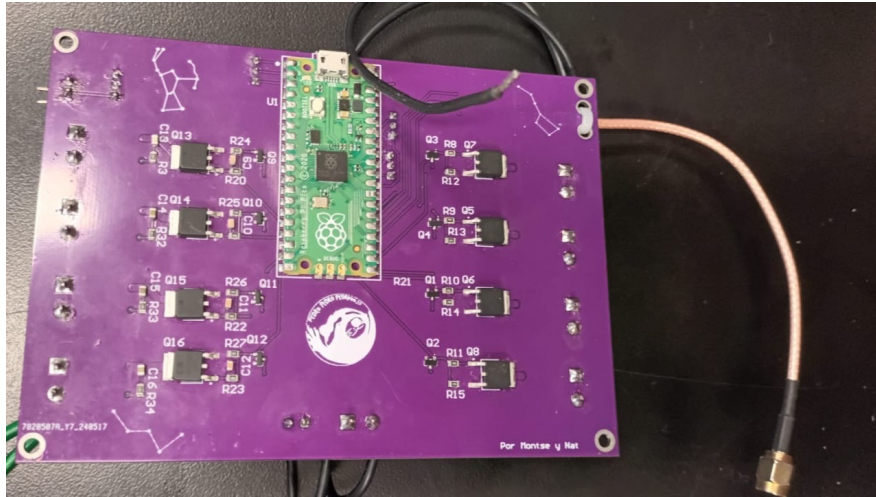


Figura 4.22: Placa de actuadores cara superior

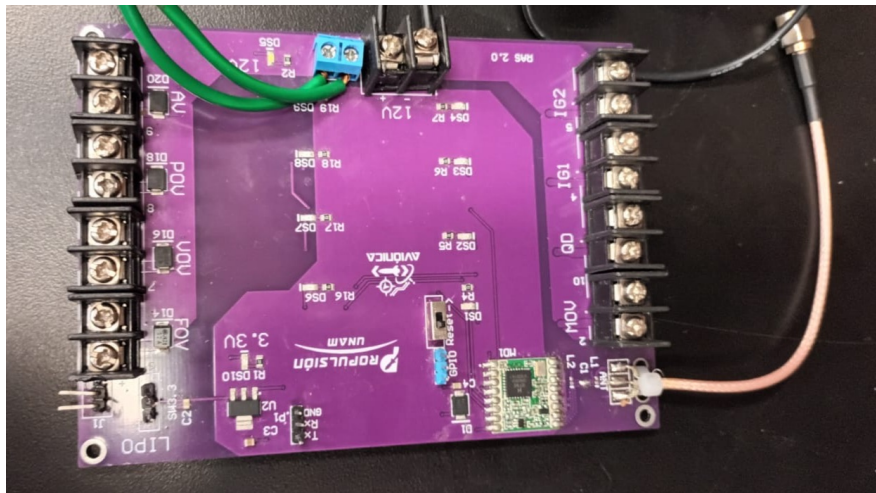


Figura 4.23: Placa de actuadores cara inferior

Nivel subsistema

En este nivel se estudia explícitamente el sistema de monitoreo y actuación como un conjunto funcional, analizando la interacción interna entre sus placas y la forma en que estas se organizan para cumplir con sus funciones de adquisición de datos y control de actuadores. En la figura 4.24 se ejemplifica la configuración de los dos subsistemas

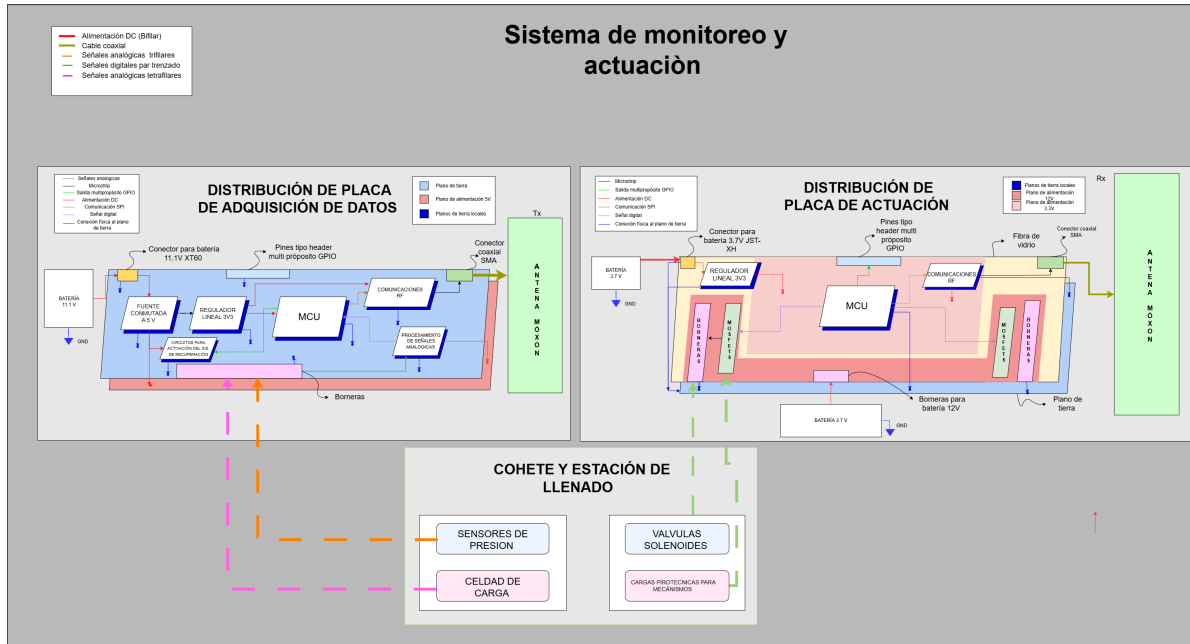


Figura 4.24: Diagrama integrador del subsistema de monitoreo y actuación. Se observan las dos placas principales y sus conexiones con sensores, válvulas y la estación terrena.

Las principales interfaces externas del subsistema son:

1. Sensores de presión, ubicados en la GSE y en la cámara de combustión.
2. Celda de carga, utilizada para medir peso del tanque y empuje.
3. Válvulas solenoides, encargadas de regular el flujo de óxido nítrico.
4. Estación terrena que se encuentra a 600 m del vehículo Xitle II, que envía comandos y recibe telemetría mediante el enlace de comunicaciones en 915 MHz.

El subsistema presenta condiciones críticas desde el punto de vista de EMC, ya que conviven señales analógicas de baja amplitud, líneas digitales y cargas inductivas de alta corriente. Los principales riesgos identificados son: acoplamiento entre señales analógicas y digitales, propagación de perturbaciones entre islas de alimentación, transitorios por conmutación de MOSFETs y formación de lazos de tierra.

Nivel integración

En el nivel de integración se analiza cómo el sistema de monitoreo y actuación interactúa con el resto de la aviónica y con el entorno electromagnético del vehículo Xitle II. A diferencia de la bahía de aviónica, este sistema no se encuentra alojado en la nariz del cohete, sino a un costado del vehículo. Sin embargo, forma parte del mismo ambiente electromagnético y, por lo tanto, puede interferir o verse afectado por las emisiones y acoplamientos que ocurren durante la misión.

A pesar de que a nivel componente las placas de adquisición y actuación fueron diseñadas con bloques funcionales definidos y segmentación de señales, a nivel de integración no existen referencias comunes ni puntos de tierra compartidos entre subsistemas debido a la ausencia de planeación en la integración física

de los subsistemas. Los sistemas no se encuentran eléctricamente conectados entre sí ni a una referencia planeada.

El cableado se resolvió con criterios de funcionalidad y disponibilidad de materiales, empleando pares trenzados y conductores blindados. Sin embargo, el blindaje pierde efectividad ya que no está conectado a ninguna referencia. Esta configuración deja al subsistema vulnerable en varios frentes: interferencia interna entre placas, interferencia externa proveniente de la bahía de aviónica y limitaciones del cableado.

El análisis evidencia que, aunque a nivel componente y subsistema se contemplaron criterios de diseño de segmentación funcional y separación de señales, la integración final no resuelve los aspectos de compatibilidad electromagnética. El sistema de monitoreo y actuación queda expuesto tanto a la interferencia del entorno como a la generada por sus propias placas y por la bahía de aviónica del cohete.

4.3.3. Estación terrena

La estación terrena constituye un subsistema imprescindible para las operaciones del vehículo Xitle II. Su función principal es establecer el vínculo de comunicación bidireccional entre el cohete y el segmento de control en superficie, así como el monitoreo de variables previas al vuelo, permitiendo tanto la recepción de parámetros críticos como el envío de comandos durante las fases de preparación y vuelo. Este segmento se encuentra físicamente separado del vehículo a una distancia aproximada de 600 metros, condición que obedece a requerimientos de seguridad operativa impuestos por la competencia Spaceport America Cup (SAC) 2024.

La estación terrena está conformada por dos subsistemas complementarios: por un lado, una estación diseñada y desarrollada por el equipo de Propulsión UNAM, cuyo objetivo es garantizar la operación autónoma y adaptada a las necesidades específicas de la misión; y por otro, un sistema comercial distribuido por la empresa Featherweight Altimeters, empleado para la localización del vehículo.

En la Figura 4.25 se ilustra la disposición general de la estación terrena, mostrando los dos subsistemas que la componen.

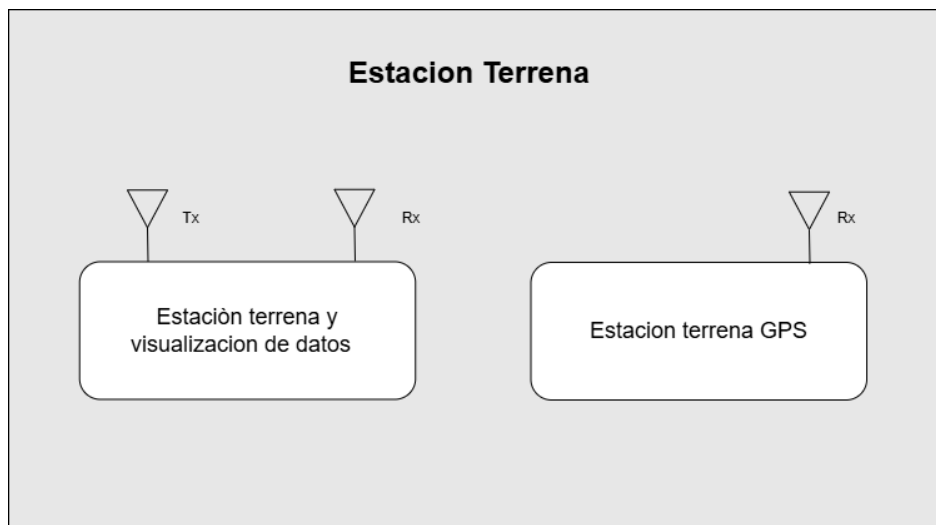


Figura 4.25: Diagrama general de la estación terrena del vehículo Xitle II, compuesta por el subsistema Propulsión UNAM y el subsistema Featherweight Altimeters.

Nivel componente

Estación Terrena SRAD La estación terrena SRAD fue ensamblada, planeada y diseñada por la división de Aviónica del equipo Propulsión UNAM, bajo el diseño y construcción de Santiago Marquez y Carlos Andrade, teniendo un seguimiento y planeación directa de la autora de esta tesis. Esta estación requiere distintos módulos que realizar sus tareas, descritos a continuación para identificar el ambiente electromagnético tanto interno como externo. A grandes rasgos, la estación terrena debe ser capaz de recibir información de la computadora de vuelo *ASYB*, del subsistema de instrumentación y enviar comandos para realizar la rutina

para el sistema de actuación. Debido a la complejidad de estas tareas, la autora de esta tesis desarrollo un sistema de comunicación eficaz que permitió realizar esta rutina a pesar de las limitantes asociadas al hardware. El reto principal al que se enfrentó Propulsión UNAM es que el modulo RFM95W, a pesar de tener un buen alcance no permitía recibir y enviar información por el mismo canal de comunicación por lo que la autora de esta tesis lo resolvió de la siguiente manera.

1. Determinar la cantidad de dispositivos que fungían como transmisores y receptores
2. Identificar la frecuencia de trabajo de cada dispositivo y las capacidades de la banda ISM
3. Diseñar una rutina capaz de cambiar de frecuencia para monitorear los datos de vuelo y los datos pertinentes previos a este.
4. Asignar frecuencias distintas para el canal de recepción de datos y otro para el transmisor de datos.

A pesar de que el hardware limitó las tareas se logró crear una rutina para desemeñar las tareas que se encontraban centralizadas en la estación terrena SRAD. A continuación se presentan los componentes de la estación terrena que en su mayoría son COTS.

1. **Procesamiento:** La Raspberry Pi 5 constituye el cerebro del sistema, ejecutando las operaciones de cómputo necesarias para la adquisición, procesamiento y despliegue de telemetría, así como la comunicación con los periféricos de la estación.

Cuadro 4.8: Parámetros eléctricos y electromagnéticos de la Raspberry Pi 5.

Subsistema / Interfaz	Tipo de señal	f [Hz]	V_{op} [V]	I_{op} [A]	Notas
Raspberry Pi 5 (procesamiento principal)	Digital / RF / Video	10^6-10^9	5.0	3.0	Procesador BCM2712, USB 3.0 (5 Gbps), HDMI dual, WiFi 2.4/5 GHz; fuente de interferencia por alta actividad de datos.

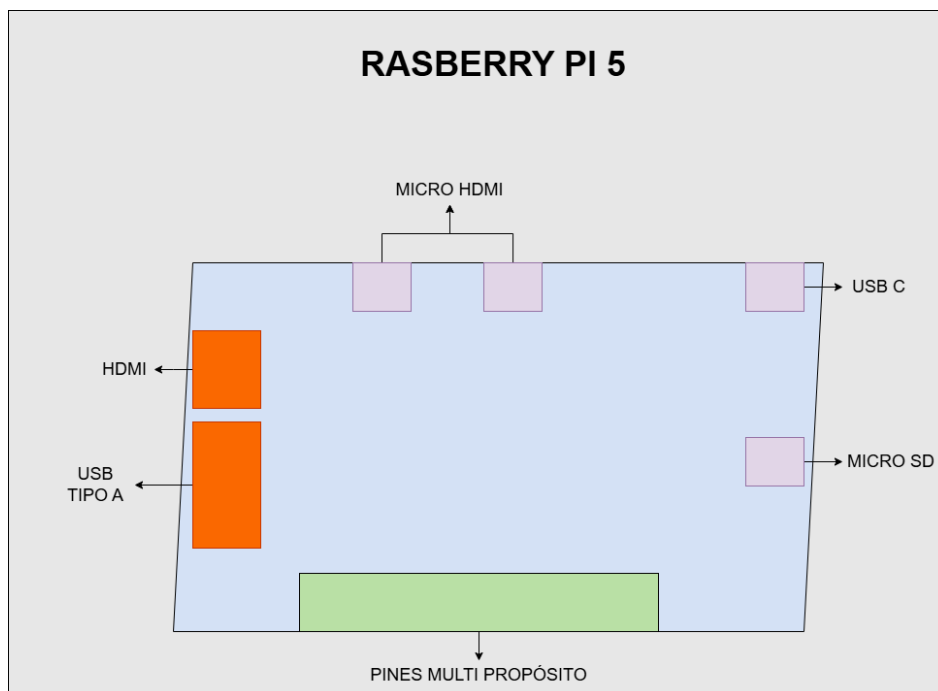


Figura 4.26: Diagrama general de la Raspberry Pi 5

2. **Interfaz de visualización:** La estación terrena cuenta con un monitor LCD de 17 pulgadas modelo DV170YGGZ-N10, controlado por una placa de video de 12 VDC.

Cuadro 4.9: Parámetros eléctricos y electromagnéticos del sistema de visualización LCD.

Subsistema / Interfaz	Tipo de señal	f [Hz]	V_{op} [V]	I_{op} [A]	Notas
Pantalla LCD 17" + controladora VGA/DVI	Video / LVDS	$25 \times 10^6 - 75 \times 10^6$	12.0	3.0	Señales diferenciales LVDS; susceptibilidad a acoplamientos capacitivos y radiación EMI.

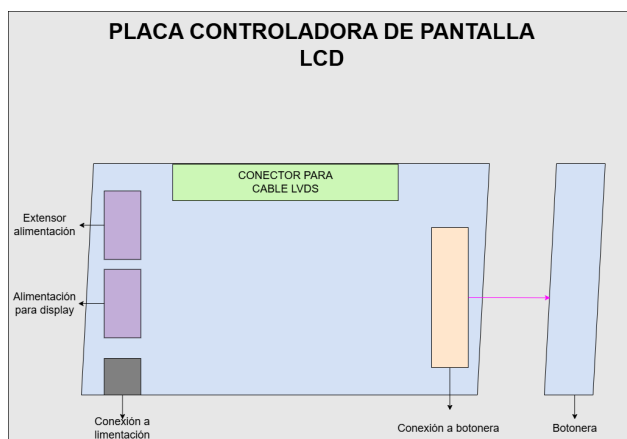


Figura 4.27: Diagrama general del controlador de la pantalla LCD

3. **Módulo transmisor:** Controla el envío de comandos a la placa de actuación mediante una Raspberry Pi Pico y un módulo LoRa RFM95W.

Cuadro 4.10: Parámetros eléctricos y electromagnéticos del módulo transmisor.

Subsistema / Interfaz	Tipo de señal	f [Hz]	V_{op} [V]	I_{op} [A]	Notas
Transmisor RF LoRa RFM95W	RF / Digital SPI	915×10^6	3.3	0.13	Comunicación inalámbrica LoRa; emite comandos de control; potencia TX $\approx +14$ dBm.
Raspberry Pi Pico (MCU transmisora)	Digital (SPI / UART)	$10^5 - 10^6$	3.3	0.05	Control de transmisión; susceptible a ruido en alimentación y retornos.

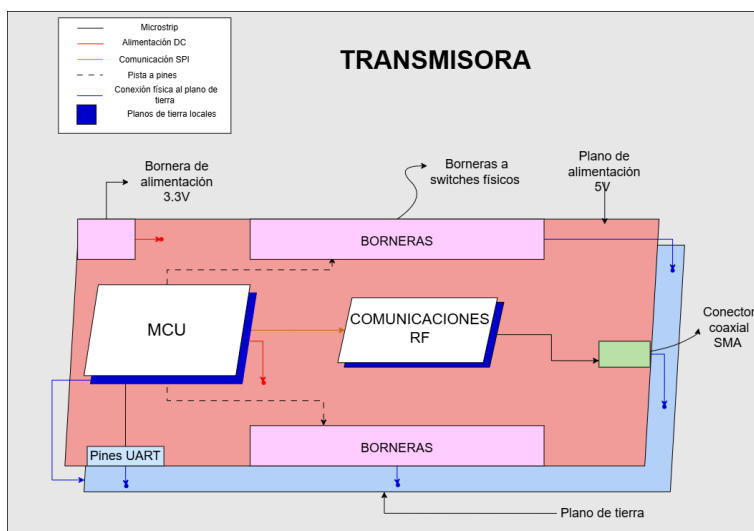


Figura 4.28: Esquema funcional de la placa transmisora de la estación terrena.

A continuación se presenta la configuración de este componente.

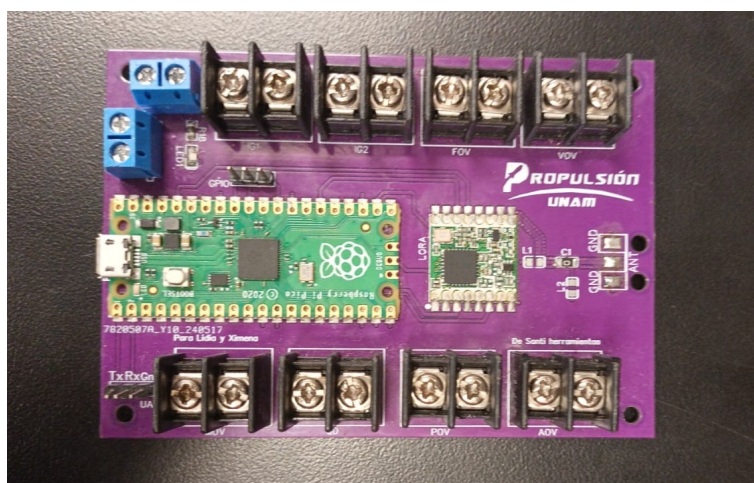


Figura 4.29: Placa transmisora de la estación terrena.

4. **Módulo receptor:** Asegura la recepción de telemetría proveniente de la computadora de vuelo y la placa de monitoreo.

Cuadro 4.11: Parámetros eléctricos y electromagnéticos del módulo receptor.

Subsistema / Interfaz	Tipo de señal	f [Hz]	V_{op} [V]	I_{op} [A]	Notas
Receptor RF LoRa RFM95W	RF / Digital SPI	915×10^6	3.3	0.016	Recepción de telemetría; riesgo de interferencia cruzada con transmisor cercano.
MCU Raspberry Pi Pico (receptora)	Digital (SPI / UART)	$10^5 - 10^6$	3.3	0.05	Decodificación de datos; líneas SPI de alta velocidad no blindadas.

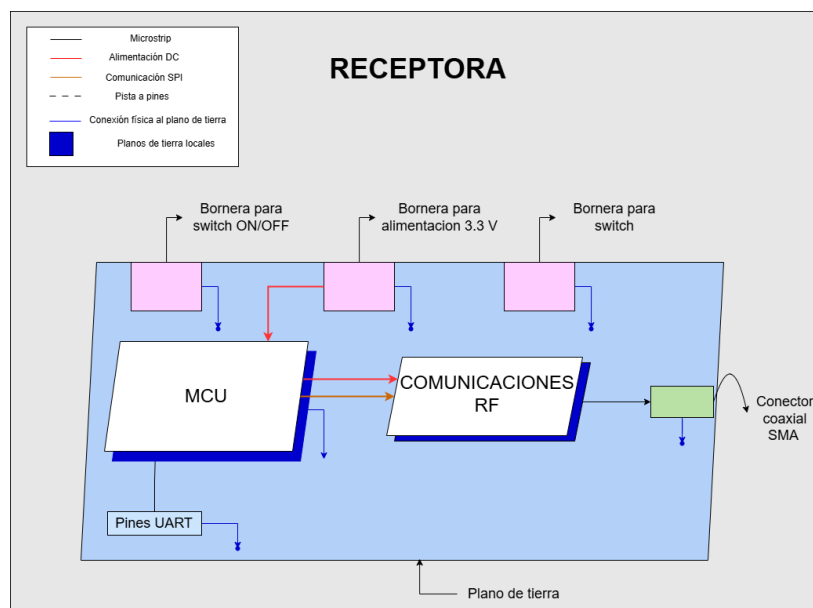


Figura 4.30: Esquema funcional de la placa receptora de la estación terrena.

A continuación se presenta la configuración de este componente.

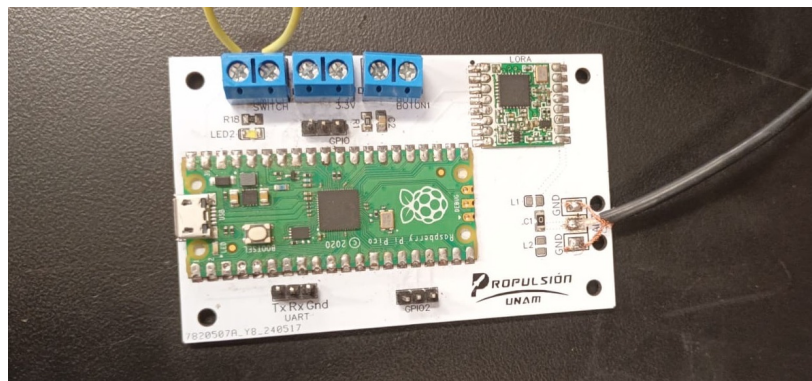


Figura 4.31: Placa receptora de la estación terrena.

5. **Regulación de potencia:** El suministro energético se basa en un módulo conmutado LM2596 de tipo buck, con salidas a 3.3 V, 5 V, 12 V y ajustable.

Cuadro 4.12: Parámetros eléctricos y electromagnéticos del regulador LM2596.

Subsistema / Interfaz	Tipo de señal	f [Hz]	V_{op} [V]	I_{op} [A]	Notas
Regulador conmutado LM2596	Potencia (PWM)	150×10^3	5–12	3.0	Fuente de ruido conducido y radiado; armónicos en MHz; requiere filtrado LC y blindaje.

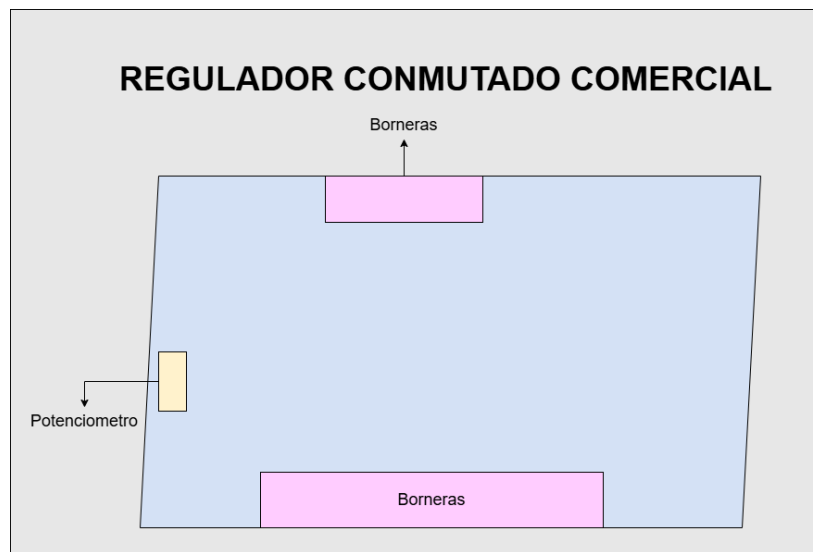


Figura 4.32: Módulo regulador conmutado comercial LM2596 empleado en la estación terrena.

A continuación se presenta la distribución real de la estación terrena desarrollada por el equipo Propulsión UNAM.

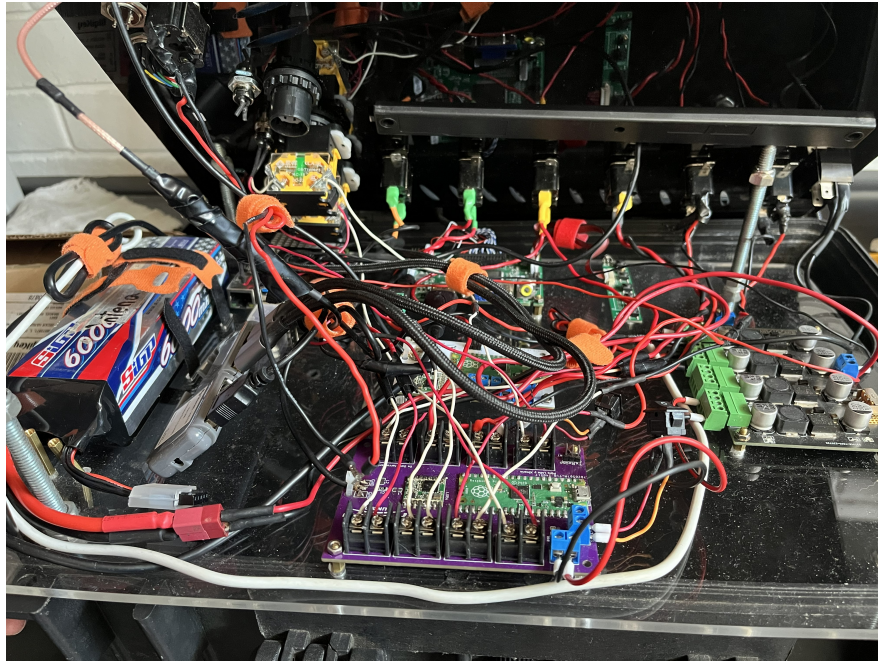


Figura 4.33: Foto del interior de la estación terrena.

Estación Terrena COTS El subsistema comercial de Featherweight Altimeters proporciona una vía para la localización y telemetría. Su configuración *plug-and-play* permite una integración sencilla y fiable, operando en la misma banda ISM (915 MHz) que la estación SRAD.

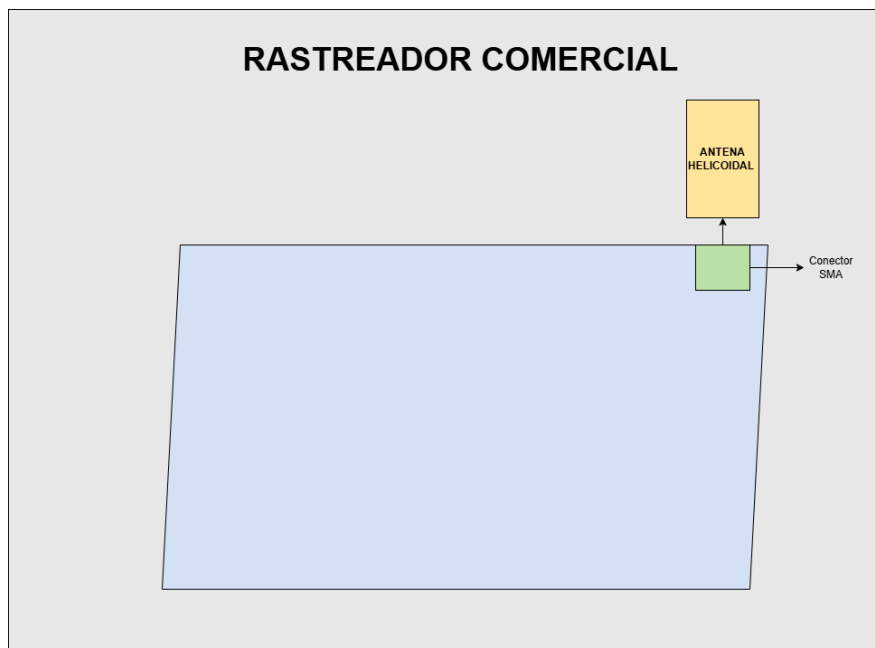
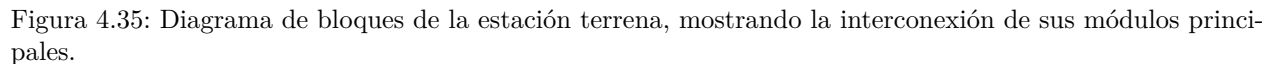


Figura 4.34: Diagrama de bloques de la estación terrena COTS.

En este nivel, la estación terrena se considera un conjunto funcional integrado por los módulos SRAD y COTS. En la Figura 4.35 se muestra el diagrama de bloques general, donde se aprecia la organización de los módulos y las rutas principales de comunicación y energía.



Las principales fuentes de EMI identificadas son:

- Regulador LM2596 con frecuencia de 150 kHz y armónicos acoplables a líneas de alimentación.
- Interferencias cruzadas entre transmisor y receptor RF.
- Señales de alta velocidad (USB 3.0, HDMI) de la Raspberry Pi 5.
- Cableado sin blindaje ni referencia equipotencial común.

Nivel integración

En el nivel de integración, la estación terrena se analiza como parte del sistema global de comunicaciones del vehículo. La falta de una referencia eléctrica común y la ausencia de blindajes adecuados entre módulos incrementan la vulnerabilidad del conjunto ante acoplamientos por impedancia común y corrientes de retorno no controladas.

Los escenarios críticos más relevantes son:

1. Interferencia del regulador LM2596 sobre el módulo receptor RF, reduciendo la sensibilidad y aumentando el ruido.
2. Acoplamiento directo entre transmisor y receptor RF, provocando bloqueo temporal durante transmisión.
3. Masas flotantes y lazos de retorno irregulares, que facilitan corrientes parásitas.

En conjunto, la estación terrena cumple funcionalmente con las operaciones de misión, pero no con los criterios de compatibilidad electromagnética establecidos. Se recomienda implementar blindajes, puntos equipotenciales, filtrado en líneas de alimentación y reorganización de módulos según sus perfiles de emisión y susceptibilidad.

Capítulo 5

Determinación de pruebas de compatibilidad electromagnética

Las actividades comúnmente asociadas a la validación o cumplimiento de la compatibilidad electromagnética no siempre corresponden, en sentido estricto, a una *prueba de compatibilidad electromagnética* (EMC) normalizada. Una prueba de EMC puede referirse tanto a un *ensayo de precumplimiento*, orientado a la identificación temprana de riesgos de interferencia y al apoyo de decisiones de diseño, como a un *ensayo formal de cumplimiento*, ejecutado conforme a un estándar específico con fines de verificación normativa.

En el presente trabajo, las actividades realizadas corresponden principalmente a *mediciones de interferencia electromagnética* (EMI) con un enfoque diagnóstico, complementadas con la aplicación de un *ensayo normalizado* seleccionado como referencia. Estas mediciones permiten caracterizar el comportamiento electromagnético del sistema bajo estudio, identificar posibles fuentes de emisión y evaluar su compatibilidad con el entorno electromagnético considerado, sin que ello implique necesariamente la certificación completa del sistema conforme a una norma de EMC. También existen pruebas como las mencionadas en el marco teórico que permiten establecer estándares para integrar a un sistema más grande, en la industria aeroespacial es de suma importancia validar los sistemas debido a los costos que implica este tipo de actividades y los riesgos asociados.

Las pruebas de compatibilidad electromagnética no pueden ser decisiones arbitrarias, su elección y análisis debe tener una justificación lógica, un alcance y viabilidad. En el ámbito académico de la coherencia experimental, no siempre se dispone de las instalaciones adecuadas para aplicar una prueba de compatibilidad electromagnética (EMC) estandarizada, incluso tampoco con los permisos o configuraciones para una prueba en específico. Es por esto que plantear un protocolo según las necesidades y alcances es vital para la realización de un proyecto de esta índole, poniendo aun más peso en el proceso de diseño donde es posible prevenir fallas y mantenerse bajo niveles estipulados por alguna norma.

5.1. Propuesta de metodología para cohetes experimentales de alta potencia

Como se discutió en el Capítulo 4, el cohete experimental Xitle II enfrenta retos derivados de la integración de subsistemas electrónicos y de su operación en un entorno electromagnético interno y externo complejo. Para la realización de las pruebas para este vehículo es importante resaltar que la mayoría de los equipos sometidos a prueba pertenecen a el equipo de coherencia experimental Propulsión UNAM, es por esta razón que no se realizaran pruebas de susceptibilidad ni nada que pueda comprometer cualquier equipo. Al plantear un protocolo de pruebas es importante conocer los alcances de la prueba y las posibles consecuencias que tendría un equipo.

En el siguiente esquema se muestra el flujo para identificar y seleccionar una prueba. Para entender un poco mejor a que se refiere cada etapa de este flujo se describe a continuación cada uno de ellos:

1. Identificación y selección de la prueba: Se debe de evaluar el subsistema que se va a analizar y acotar la búsqueda del tipo de pruebas. En el caso específico de coherencia experimental y cómo se estructuró en el marco teórico se puede homologar la normativa de la industria aeroespacial para apegarse a regulaciones y estándares ya conocidos. Dentro de las pruebas de compatibilidad electromagnética existen dos grandes grupos

- Emisión electromagnética
- Susceptibilidad electromagnética

El tipo de prueba se define en función del comportamiento eléctrico de los componentes, aplicando pruebas de emisiones conducidas a fuentes conmutadas y líneas de alimentación, y pruebas de emisiones radiadas a subsistemas con osciladores, enlaces RF o señales digitales de alta velocidad.

2. Características de la prueba: Este paso es primordial debido a que en las especificaciones de la prueba podemos identificar lo siguiente

- Equipo necesario de la prueba: Analizadores de espectro, sonda de campo eléctrico o magnético, laboratorios, etc
- Características de la prueba: Niveles de operación; Voltajes, corrientes, frecuencias. Disposición espacial del objeto sometido a prueba, etc.

3. Análisis de viabilidad: Para poder seleccionar definitivamente una prueba debemos tener presente el objetivo a alcanzar, el equipo al que se puede acceder y las consecuencias que la prueba puede tener en nuestro sistema.

Las pruebas de emisiones, a grandes rasgos, caracterizan el funcionamiento natural de el equipo sometido a prueba, mientras que las pruebas de susceptibilidad ponen en estrés el componente y se espera que resista a dicho estrés. Este tipo de pruebas pueden causar daños irreparables.

El análisis de viabilidad constituye la columna vertebral en la elección de una prueba de compatibilidad electromagnética ya que el equipo sometido a prueba puede representar una perdida irreparable y un retraso que comprometa la misión. La coherencia experimental tiende a tener presupuestos reducidos y tiempos de desarrollo justos, donde una prueba mal practicada puede comprometer a la misión completa.

4. **Planeación y aplicación de la prueba:** Una vez seleccionada la prueba estandarizada correspondiente, esta debe planearse y ejecutarse conforme a su procedimiento, considerando configuraciones de ensayo, distancias, disposición del equipo y rangos de medición. No obstante, en contextos académicos pueden existir limitaciones en el equipamiento disponible que impidan reproducir el ensayo de forma idéntica a lo especificado por la norma. En estos casos, es indispensable identificar y documentar las desviaciones respecto al procedimiento original, así como analizar los riesgos y alcances que dichas diferencias introducen, a fin de garantizar que los resultados obtenidos sean técnicamente válidos y concluyentes.



Figura 5.1: Flujo básico para la elección de una prueba de compatibilidad electromagnética

La aplicación de esta metodología permite evaluar la pertinencia de realizar una prueba específica, así como estructurar de manera anticipada su desarrollo, implementación y resultados esperados. Este enfoque facilita la interpretación de los resultados obtenidos a partir de las pruebas realizadas al equipo bajo prueba, al establecer desde etapas previas los alcances y limitaciones de cada ensayo. De no adoptarse este planteamiento metodológico, los resultados pueden carecer de sustento técnico suficiente para considerarse concluyentes. A continuación, se presenta el protocolo de pruebas definido con base en esta metodología.

5.2. Protocolo de pruebas y metodología de ensayos

Este enfoque permite estructurar y analizar las pruebas considerando las limitaciones de infraestructura, presupuesto y riesgo operativo propias de la coherencia experimental de alta potencia. A continuación, se presenta el protocolo de pruebas definido con base en esta metodología, el protocolo comprende únicamente pruebas de emisión en campo cercano y lejano, la razón de esto se debe a que las pruebas de susceptibilidad pueden comprometer los sistemas diseñados, una acción que tiene repercusiones operacionales y monetarias importantes, considerando que la coherencia experimental rara vez cuenta con presupuestos holgados. Con este protocolo se busca validar y comprobar que la metodología de diseño preventivo representa un pilar más importante frente a la corrección de errores. De igual forma es importante recalcar que los resultados bajo una prueba no son inapelables, es decir, Los resultados obtenidos pueden encontrarse fuera de los límites establecidos por una normativa específica; sin embargo, el sistema puede cumplir de manera operativa dentro del marco definido por un proyecto de coherencia experimental o por los lineamientos de una competencia.

La implementación de metodologías y protocolos permite realizar sistemas robustos, replicables y analizables donde la sistematización de los procesos previene errores y asegura una calidad para un subsistema, la escalabilidad comprende desde un diseño académico hasta la concepción de proyectos formales donde la implementación organizacional es más importante que el cumplimiento de una tarea.

Este protocolo esta adaptado para evaluar la bahía de aviónica del cohete experimental Xitle II, la bahía de aviónica comprende los siguientes subsistemas

1. Computadora de vuelo COTS modelo RRC3
2. Rastreador comercial Featherweight
3. Computadora de vuelo COTS “Azurita”
4. Computadora de vuelo SRAD “ASYB”

La Figura 3.15 muestra un esquema general de los componentes de la bahía de aviónica sometidos a prueba. A partir de esta sección, los componentes de la bahía de aviónica se considera como los EUT (*Equipment Under Test*, equipo bajo prueba), en tanto constituye el conjunto específico al que se aplican los ensayos descritos.

Es importante el análisis del EUT ya que forma parte del vehículo Xitle II y realiza una de las tareas más importantes para un cohete experimental, la recuperación; la computadora de vuelo ‘ASYB’ y la redundancia deben cumplir con esta tarea central para que la misión alcance su objetivo de inicio a fin.

El EUT debe operar en condiciones lo más cercanas posibles a las de vuelo, con una consideración importante: las señales de radiofrecuencia presentan niveles de potencia mayores que el resto de las señales internas del sistema. Por ello, en pruebas de campo lejano es necesario realizar modificaciones para evitar la transmisión no intencional. En el caso de subsistemas comerciales, como el rastreador, cuyo código no es accesible para su modificación, se emplea una carga puramente resistiva (*dummy load*) de 50 Ohms, correspondiente a la impedancia de salida del transmisor, con el fin de suprimir la radiación.

5.2.1. Consideraciones generales del ensayo

El ensayo se realizó en una cámara semianecoica perteneciente a la Facultad de Ciencias, diseñada para la ejecución de pruebas de compatibilidad electromagnética conforme a normativas internacionales. De acuerdo con la información técnica proporcionada en el tríptico del recinto, la cámara cumple con los lineamientos establecidos en la norma *ANSI C63.4-1992*, la cual especifica los métodos de medición para emisiones electromagnéticas radiadas y conducidas en equipos eléctricos y electrónicos.

La cámara fue diseñada para operar dentro del intervalo de frecuencias indicado en el tríptico técnico del recinto, el cual corresponde al rango de trabajo para el que fueron seleccionados los materiales absorbentes y la geometría del espacio, permitiendo condiciones de campo electromagnético controladas y repetibles durante la ejecución de los ensayos.

El acondicionamiento electromagnético del recinto se logra mediante el uso de absorbentes piramidales de espuma combinados con paneles de ferrita, dispuestos estratégicamente sobre las superficies internas de la

cámara. Esta configuración permite una atenuación efectiva de reflexiones electromagnéticas tanto en bajas como en altas frecuencias.

Las dimensiones aproximadas del recinto son de $6 \times 9 \times 5$ m, lo que proporciona un volumen adecuado para la realización de ensayos de emisiones radiadas y susceptibilidad electromagnética en equipos de tamaño pequeño a mediano, garantizando la separación mínima requerida entre el dispositivo bajo prueba y los elementos absorbentes.

El dispositivo bajo prueba EUT se colocó sobre una mesa de madera, material eléctricamente no conductor, con una altura aproximada de 1 m respecto al plano de referencia. Esta configuración es consistente con las recomendaciones establecidas en las normas de ensayo indicadas en el tríptico, y permite reducir perturbaciones no deseadas en el acoplamiento electromagnético durante las mediciones.

Asimismo, no se dispone de datos específicos sobre el control o estabilidad de las condiciones ambientales internas, tales como temperatura y humedad, por lo que dichas variables no fueron consideradas como parámetros controlados dentro del alcance del presente ensayo.

5.2.2. Instrumentación y recursos

Los instrumentos principales a utilizar son los siguientes

1. **Analizador de espectros de la marca Advantest:** El rango de frecuencias de operación va de 9kHz a 3GHz. Previo a la adquisición de datos de emisiones electromagnéticas, se caracterizó el piso de ruido del sistema de medición con el equipo bajo prueba apagado. El piso de ruido obtenido presentó una variación dependiente de la frecuencia y de la configuración instrumental, con valores comprendidos entre -93.28 dBm y -71.68 dBm. Este rango define el nivel mínimo detectable del sistema y fue considerado como referencia para la identificación de emisiones propias del EUT
2. **Sonda de campo cercano magnético ETS-Lindgren 7504-901:** Sonda pasiva tipo bucle (H-field) utilizada para el diagnóstico de emisiones electromagnéticas en la región de campo cercano. Permite la localización espacial de fuentes dominantes de emisión asociadas a corrientes de alta frecuencia en tarjetas electrónicas, cables y planos de retorno. Es una herramienta de medición relativa empleada en análisis EMC, especialmente útil para identificar bucles de corriente y mecanismos de acoplamiento inductivo antes de ensayos en campo lejano.

Cuadro 5.1: Características técnicas típicas de la sonda ETS-Lindgren 7504-901

Parámetro	Valor típico
Tipo de campo	Magnético (H-field)
Geometría	Loop circular
Diámetro del loop	~6 cm
Banda de frecuencia	kHz – varios GHz (uso diagnóstico)
Conector	BNC
Impedancia	50 Ω
Calibración	Relativa (no absoluta)

La selección de la sonda de campo cercano magnético ETS-Lindgren 7504-901 se fundamenta en su capacidad para identificar directamente fuentes de emisión asociadas a corrientes de alta frecuencia, las cuales constituyen uno de los principales mecanismos físicos responsables de las emisiones electromagnéticas radiadas en sistemas electrónicos. A diferencia de las sondas de campo eléctrico, la sonda H-field permite localizar bucles de corriente de retorno y acoplamientos inductivos con mayor precisión, lo que resulta especialmente relevante en el análisis EMC de sistemas aeroespaciales. Adicionalmente, esta sonda formaba parte del instrumental disponible en el laboratorio, lo que permitió su integración práctica en la metodología experimental sin requerir equipamiento adicional.

3. **Sonda de campo cercano eléctrico ETS-Lindgren 7405-904:** Sonda pasiva de campo eléctrico (E-field) utilizada para el diagnóstico de emisiones electromagnéticas en la región de campo cercano. Esta sonda permite identificar regiones con altas concentraciones de voltaje y acoplamientos capacitivos en tarjetas electrónicas, pistas de señal y terminales de componentes. Su uso es complementario al de las sondas magnéticas, ya que facilita el análisis de mecanismos de emisión asociados a gradientes de potencial eléctrico.

Cuadro 5.2: Características técnicas típicas de la sonda ETS-Lindgren 7405-904

Parámetro	Valor típico
Tipo de campo	Eléctrico (E-field)
Geometría	Sonda tipo balón
Diámetro efectivo	~10 mm
Banda de frecuencia	kHz – varios GHz (uso diagnóstico)
Conector	BNC
Impedancia	50 Ω
Calibración	Relativa (no absoluta)

La sonda ETS-Lindgren 7405-904 fue seleccionada debido a su capacidad para detectar emisiones asociadas a acoplamientos capacitivos y distribuciones locales de voltaje, que complementan el análisis realizado con sondas de campo magnético. El uso combinado de sondas E-field y H-field permite una caracterización más completa de los mecanismos de emisión electromagnética presentes en el sistema bajo estudio. Asimismo, esta sonda se encontraba disponible dentro del instrumental del laboratorio, lo que facilitó su incorporación directa en la metodología experimental.

5.2.3. Criterios de calidad del ensayo

Con el objetivo de asegurar la validez, confiabilidad y consistencia de los resultados obtenidos, se establecieron criterios de calidad durante la ejecución de los ensayos de emisiones electromagnéticas. Estos criterios permiten sustentar que las mediciones realizadas sean representativas del comportamiento electromagnético del sistema bajo prueba y que los resultados presentados en el capítulo de resultados puedan ser analizados de manera objetiva y reproducible.

Repetibilidad Los ensayos fueron repetidos en dos ocasiones, manteniendo la misma configuración experimental, incluyendo el uso de las mismas sondas de medición, la misma disposición espacial y el mismo modo de operación del sistema bajo prueba. La repetición de las mediciones permite verificar la consistencia de las emisiones observadas y confirmar que los fenómenos registrados corresponden al comportamiento inherente del sistema y no a variaciones aleatorias del entorno o del proceso de medición.

Control de variables Durante la realización de los ensayos se mantuvieron constantes las variables que influyen directamente en la medición de emisiones electromagnéticas. El sistema bajo prueba operó en todo momento con la misma configuración de alimentación y el mismo modo funcional. Asimismo, la posición del objeto bajo prueba EUT se mantuvo fija a lo largo de todas las mediciones, evitando variaciones asociadas a cambios geométricos o de acoplamiento con el entorno de prueba.

Identificación de ruido ambiental Con el fin de minimizar la influencia de fuentes externas de interferencia, los ensayos se llevaron a cabo dentro de una cámara semianecoica, la cual proporciona un entorno electromagnéticamente controlado. Durante las pruebas no se operaron dispositivos adicionales dentro de la cámara, lo que permitió reducir la presencia de emisiones externas y facilitar la identificación de las emisiones propias del sistema bajo prueba.

Registro de datos El registro de los datos se realizó de manera sistemática mediante la captura de imágenes de las mediciones obtenidas en el analizador de espectro, manteniendo en todo momento la misma configuración instrumental. Este procedimiento garantiza la trazabilidad de los resultados y permite su análisis posterior bajo condiciones equivalentes, así como la comparación entre las distintas repeticiones del ensayo.

Estos criterios de calidad constituyen la base para la interpretación de los resultados presentados en el capítulo siguiente, asegurando que el análisis de las emisiones electromagnéticas se sustente en mediciones consistentes y técnicamente justificadas.

5.3. Ensayos de emisiones electromagnéticas: campo cercano y campo lejano

En esta sección se describen los ensayos de emisiones electromagnéticas realizados sobre la bahía de aviónica del cohete experimental Xitle II, considerada como el equipo bajo prueba EUT. Los ensayos se enfocaron en la caracterización de emisiones radiadas tanto en la región de campo cercano como en la región de campo lejano, con el objetivo de identificar fuentes dominantes de emisión, mecanismos de acoplamiento y el comportamiento electromagnético global del sistema.

Los ensayos se realizaron con el sistema operando en condiciones representativas de funcionamiento nominal, sin aplicar criterios normativos de cumplimiento, y con un enfoque orientado al análisis y diagnóstico EMC.

5.3.1. Ensayos de emisiones en campo cercano

Los ensayos de emisiones en campo cercano se realizaron con el propósito de identificar fuentes locales de emisión electromagnética y analizar los mecanismos de acoplamiento presentes dentro de la bahía de aviónica. Este tipo de ensayo permite evaluar de manera especialmente localizada las emisiones asociadas a corrientes de alta frecuencia y gradientes de potencial eléctrico, las cuales pueden contribuir posteriormente a emisiones radiadas en campo lejano.

Configuración del sistema bajo prueba

Durante los ensayos de campo cercano, el EUT estuvo conformado por los siguientes subsistemas electrónicos:

1. Computadora de vuelo COTS modelo RRC3
2. Rastreador comercial Featherweight
3. Computadora de vuelo COTS “Azurita”
4. Computadora de vuelo SRAD “ASYB”

Todos los subsistemas se encontraban operando de manera simultánea en su modo funcional normal. En particular, la computadora de vuelo ASYB y el rastreador comercial Featherweight se encontraban transmitiendo durante la realización de los ensayos, con el fin de evaluar el comportamiento electromagnético del sistema bajo condiciones operativas representativas.

Instrumentación utilizada

La medición de emisiones en campo cercano se realizó utilizando un analizador de espectros como instrumento principal de adquisición, en conjunto con sondas pasivas de campo cercano eléctrico y magnético. Las sondas empleadas fueron:

- Sonda de campo cercano magnético ETS-Lindgren 7405-901 (901B): Sonda pasiva tipo lazo (*loop probe*) empleada para el diagnóstico de emisiones electromagnéticas en la región de campo cercano. Su principio de operación se basa en la ley de inducción de Faraday, donde un campo magnético variable genera una tensión inducida proporcional a la variación temporal del flujo magnético que atraviesa el lazo de 6.0 cm de diámetro. Presenta un rechazo E/H típico de 41 dB y una frecuencia de resonancia superior de 790 MHz, lo que la hace adecuada para la localización de lazos de corriente y trayectorias de retorno en la bahía de aviónica.(ETS-Lindgren, 2024)



Figura 5.2: Sonda de campo magnético 7405-901

Cuadro 5.3: Especificaciones de la sonda de campo cercano magnético 901B del set ETS-Lindgren 7405.

Parámetro	Valor
Modelo	901B
Tipo de sensor	Campo magnético (H-Field)
Rechazo primario E/H	41 dB
Tipo de sonda	Lazo (Loop)
Diámetro del lazo	6.0 cm
Frecuencia de resonancia superior	790 MHz

- Sonda de campo cercano ETS-Lindgren 7405-904 (904B): Sonda pasiva tipo esfera (*ball probe*) de 3.6 cm, diseñada para la caracterización espacial de campos electromagnéticos en la región de campo cercano. Aunque su sensor primario está clasificado como H-Field, su geometría esférica proporciona una respuesta menos direccional comparada con las sondas tipo lazo. Presenta un rechazo E/H típico de 30 dB y una frecuencia de resonancia superior mayor a 1.0 GHz, lo que permite su uso en la identificación de regiones de alta actividad electromagnética en frecuencias medias y altas.(ETS-Lindgren, 2024)



Figura 5.3: Sonda de campo eléctrico 7405-904

Cuadro 5.4: Especificaciones de la sonda de campo cercano 904B del set ETS-Lindgren 7405.

Parámetro	Valor
Modelo	904B
Tipo de sensor	Campo magnético (H-Field)
Rechazo primario E/H	30 dB
Tipo de sonda	Esfera (Ball)
Diámetro de la sonda	3.6 cm
Frecuencia de resonancia superior	>1.0 GHz

Estas sondas permitieron evaluar de manera complementaria los mecanismos de emisión asociados a corrientes de retorno y a distribuciones locales de voltaje.

Sistema de referencia espacial

Con el fin de sistematizar las mediciones y asegurar la repetibilidad del ensayo, se definió un sistema de coordenadas cartesiano tridimensional asociado al volumen ocupado por la bahía de aviónica. El EUT fue modelado geométricamente como un prisma rectangular, dentro del cual se realizaron las mediciones de campo cercano.

El sistema de referencia se definió de la siguiente manera:

- El eje X corresponde al eje longitudinal del prisma.
- El eje Y corresponde al eje transversal.
- El eje Z corresponde al eje vertical.

Las mediciones se realizaron desplazando las sondas a lo largo de los ejes X , Y y Z , manteniendo una distancia cercana entre la sonda y las superficies del EUT.

Representación geométrica del sistema de referencia

La Figura 5.4 muestra una representación esquemática del prisma rectangular utilizado como referencia geométrica para las mediciones de campo cercano, así como el sistema de coordenadas asociado.

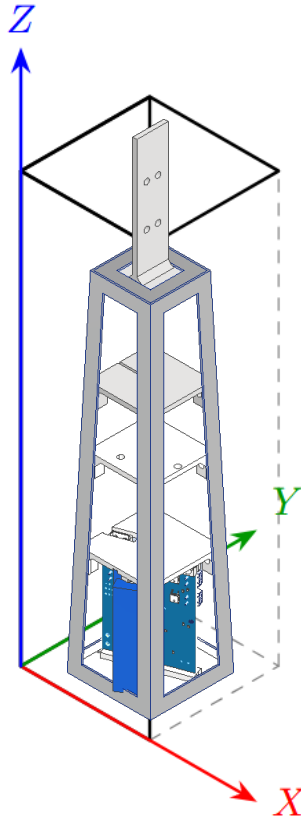


Figura 5.4: Ejes coordenados .

Metodología de medición

Las mediciones de campo cercano se realizaron desplazando las sondas sobre las superficies y regiones de interés del prisma de referencia, siguiendo trayectorias definidas a lo largo de los ejes X , Y y Z . El analizador de espectros se utilizó para registrar la respuesta espectral correspondiente a cada posición de medición, manteniendo constante la configuración instrumental durante todo el ensayo.

Este procedimiento permitió obtener una caracterización espacial relativa de las emisiones electromagnéticas del sistema bajo prueba, la cual sirve como base para el análisis presentado en el capítulo de resultados.

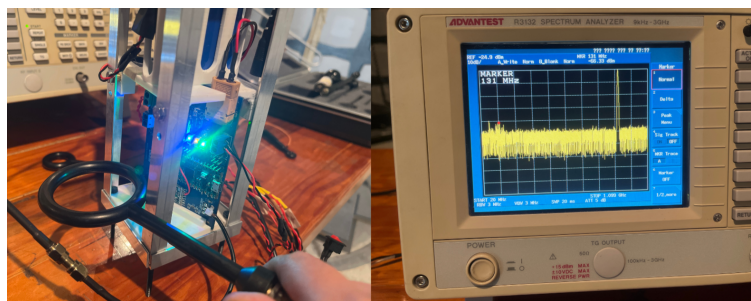


Figura 5.5: A la izquierda, medición con la sonda de campo magnético en el eje Z según el sistema coordenado, a la derecha los resultados de la medición

5.3.2. Ensayos de emisiones en campo lejano

Los ensayos de emisiones radiadas en campo lejano tienen como objetivo caracterizar el comportamiento electromagnético global del sistema bajo prueba en un régimen donde el campo electromagnético puede aproximarse al de radiación. Este tipo de ensayo permite identificar componentes espectrales dominantes y evaluar la posible interacción del sistema con su entorno electromagnético.

Ensayos de referencia según el marco teórico

De acuerdo con la literatura revisada y el marco teórico de este trabajo, los ensayos ideales para la caracterización de emisiones radiadas en un contexto aeroespacial incluyen pruebas basadas en normativa militar y espacial, particularmente los ensayos RE101 y RE102 definidos en la norma MIL-STD-461E, así como el ensayo de emisiones radiadas en campo eléctrico especificado en la norma ECSS-E-ST-20-07C.

El ensayo RE101 está orientado a la medición de emisiones en campo magnético a bajas frecuencias, mientras que el ensayo RE102 se enfoca en la medición de emisiones radiadas en campo eléctrico, típicamente en el rango de 30 MHz a 18 GHz. Estas pruebas establecen metodologías estandarizadas para la medición de emisiones radiadas bajo configuraciones controladas, con instrumentación, detectores, anchos de banda y geometrías de medición definidas para aplicaciones aeroespaciales.

No obstante, debido a limitaciones en la infraestructura y equipamiento disponibles en el laboratorio, no fue posible ejecutar directamente los ensayos conforme a dichas normativas. En su lugar, se implementó un ensayo alternativo de emisiones radiadas, disponible en el laboratorio, con el propósito de obtener una caracterización experimental reproducible del comportamiento radiado del EUT dentro de un entorno controlado.

Ensayo ejecutado: emisiones radiadas a 3 m (EN 55022)

El ensayo de campo lejano se realizó conforme a una configuración de medición basada en la norma EN 55022, empleando una distancia de medición de 3 m. La configuración proporcionada por el laboratorio incluyó el uso de una cámara semianecoica, una antena de medición logarítmica periódica y un receptor EMI, permitiendo la adquisición de niveles de campo eléctrico radiado bajo condiciones controladas y reproducibles.

La Figura 5.6 muestra una vista general de la cámara semianecoica utilizada durante los ensayos, donde se observa la disposición del EUT, la instrumentación de medición y los elementos absorbentes empleados para minimizar reflexiones electromagnéticas.



Figura 5.6: Vista general de la cámara semianecoica utilizada para los ensayos de emisiones radiadas en campo lejano, mostrando la disposición del equipo bajo prueba y la instrumentación de medición.

La configuración específica del ensayo se realizó con base en la disponibilidad instrumental del laboratorio y se resume a continuación:

- **Norma de referencia:** EN 55022 (emisiones radiadas).
- **Distancia de medición:** 3 m.
- **Unidad de medición:** $\text{dB}\mu\text{V/m}$.
- **Rango de frecuencias:** 30 MHz – 1 GHz.
- **Detector:** QuasiPeak (QP).
- **Ancho de banda IF:** 120 kHz.
- **Tiempo de medición:** 0.001 s.
- **Receptor EMI:** ESI26.
- **Antena de medición:** Antena logarítmica–periódica.
- **Configuración del sitio:** IUSA 3 m.

Si bien la norma EN 55022 está orientada a equipos de tecnología de la información, su aplicación en este trabajo se considera adecuada como una aproximación experimental para la caracterización de emisiones radiadas no intencionales. Desde el punto de vista conceptual, esta prueba presenta una equivalencia con el ensayo RE102 de la norma MIL-STD-461E y con el ensayo de emisiones radiadas en campo eléctrico definido en la norma ECSS-E-ST-20-07C, en tanto que todas ellas persiguen el objetivo de caracterizar emisiones radiadas a partir de 30 MHz mediante el uso de antenas linealmente polarizadas y detectores normalizados.

Condiciones operativas del sistema bajo prueba

Durante la realización del ensayo de campo lejano, la bahía de aviónica operó con todos los subsistemas encendidos y en funcionamiento nominal. No obstante, con el fin de evitar que la medición estuviera dominada por transmisiones intencionales de radiofrecuencia, se establecieron condiciones de operación controladas.

En particular, la computadora de vuelo SRAD "ASYB" permaneció operativa, pero sin transmisión, mientras que el rastreador comercial Featherweight se mantuvo encendido con su salida RF terminada mediante una carga puramente resistiva de $50\ \Omega$. La Figura 5.7 muestra la terminación empleada durante los ensayos, utilizada para impedir la radiación deliberada de energía electromagnética desde el rastreador comercial.



Figura 5.7: Terminación de la salida RF del rastreador comercial mediante una carga de $50\ \Omega$, utilizada para evitar transmisiones intencionales durante los ensayos de emisiones radiadas.

Estas condiciones permitieron evaluar las emisiones no intencionales del sistema bajo prueba en un estado representativo de operación, reduciendo la influencia de portadoras radiadas deliberadamente sobre el espectro medido.

Alcances y limitaciones del ensayo

Los ensayos realizados no sustituyen una campaña completa de pruebas conforme a MIL-STD-461E (RE101/RE102) o ECSS-E-ST-20-07C, particularmente en rangos de frecuencia superiores a 1 GHz o bajo configuraciones específicas de integración aeroespacial. No obstante, los ensayos descritos proporcionan una caracterización experimental válida y reproducible del comportamiento electromagnético radiado del sistema bajo prueba dentro de las capacidades disponibles del laboratorio, acorde con los objetivos académicos de este trabajo.

Capítulo 6

Resultados y discusión

En esta sección se presentan los resultados correspondientes a las mediciones de campo cercano, obtenidas mediante el uso de sondas de campo magnético *loops* y de campo eléctrico. Adicionalmente, se incluyen los resultados de las pruebas de campo lejano, realizadas en cámara semianecoica.

6.1. Resultados de pruebas de campo cercano

Las pruebas de campo cercano permiten caracterizar el comportamiento electromagnético del EUT en su entorno inmediato, evaluando de manera independiente las contribuciones del campo eléctrico y del campo magnético. Este tipo de mediciones resulta especialmente útil para la identificación de fuentes locales de emisión asociadas a relojes digitales, convertidores de potencia y trayectorias de corriente dentro de la bahía de aviónica.

Las pruebas de campo cercano se realizaron con el objetivo de identificar fuentes locales de emisión electromagnética asociadas a la operación interna de los subsistemas electrónicos que conforman la bahía de aviónica. Los resultados se resumen en los cuadros 6.2 y 6.1, donde se presentan las frecuencias y magnitudes correspondientes a las mediciones con cada sonda.

Verificación de la frecuencia e incertidumbre instrumental Durante la ejecución de las mediciones se realizó una verificación cruzada entre la medición en dominio temporal mediante osciloscopio para detectar señales puntuales y la medición en dominio de la frecuencia mediante analizador de espectros que fue utilizado con las sondas de campo eléctrico y campo magnético, con el objetivo de evaluar la consistencia metrológica entre instrumentos.

Para la señal analizada, la medición directa en el dominio temporal indicó:

$$f_{osc} = 91,3 \text{ MHz} \quad (6.1)$$

Mientras que el analizador de espectros reportó:

$$f_{AE} = 92 \text{ MHz} \quad (6.2)$$

La diferencia observada fue:

$$\Delta f = f_{AE} - f_{osc} = 0,7 \text{ MHz} \quad (6.3)$$

El analizador de espectros fue configurado con un ancho de banda de resolución (RBW) de 3 MHz y un ancho de banda de video (VBW) de 3 MHz. Bajo estas condiciones, la incertidumbre asociada a la localización precisa del máximo espectral puede ser del orden de la resolución instrumental empleada. En consecuencia, la

discrepancia observada se encuentra dentro del margen esperado de incertidumbre instrumental y no modifica la identificación espectral de la señal ni la correlación posterior con los posibles mecanismos de emisión.

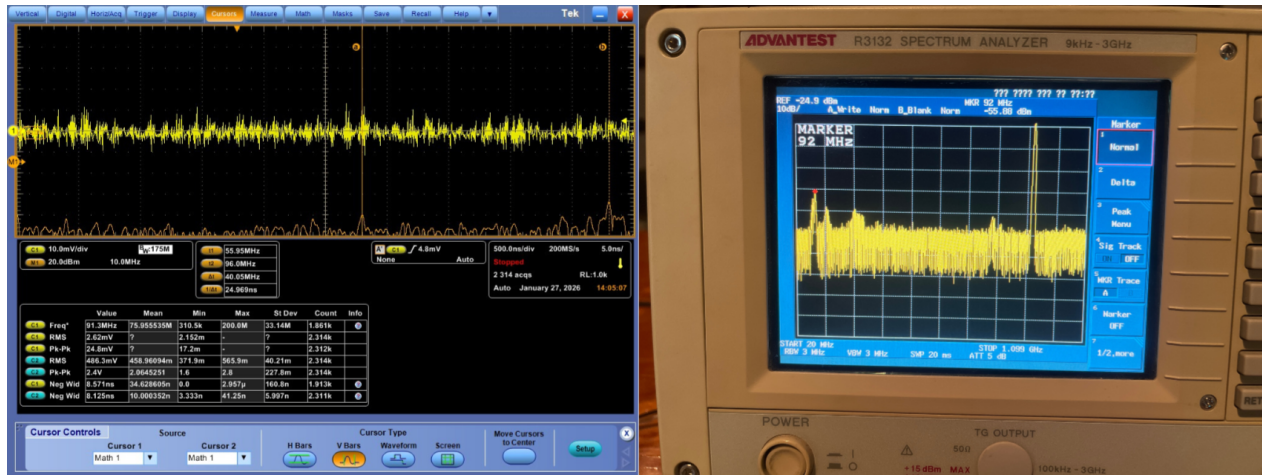


Figura 6.1: Verificación cruzada de frecuencia entre instrumentos. A la izquierda se muestra la medición en dominio temporal obtenida mediante osciloscopio ($f_{osc} = 91,3 \text{ MHz}$). A la derecha se presenta la medición en dominio frecuencial realizada con el analizador de espectros ($f_{AE} = 92 \text{ MHz}$). La diferencia observada es consistente con la resolución instrumental empleada ($RBW = 3 \text{ MHz}$).

Esta validación experimental sustenta la confiabilidad de las mediciones reportadas en este capítulo y fortalece la interpretación de los resultados presentados en los cuadros 6.2 y 6.1.

6.1.1. Resultados de mediciones de campo magnético

La sonda de campo magnético modelo 7405-901 fue empleada para la detección de emisiones electromagnéticas de tipo magnético en configuración de campo cercano. Este tipo de sonda permite identificar regiones con alta densidad de corriente y localizar posibles trayectorias de retorno no deseadas dentro del EUT, lo cual resulta particularmente útil para el análisis de subsistemas electrónicos con alta actividad de conmutación.

El uso de esta sonda permite realizar un barrido localizado sobre regiones específicas de cada subsistema, facilitando la correlación posterior entre las componentes espectrales medidas y los elementos electrónicos internos responsables de su generación.

Cuadro de resultados: campo magnético de la sonda 7405-901

Cuadro 6.1: Picos dominantes identificados en mediciones de campo cercano magnético (sonda 7405-901) en notación ingenieril.

Subsistema	Eje X			Eje Y			Eje Z		
	f [MHz]	dBm	Potencia	f [MHz]	dBm	Potencia	f [MHz]	dBm	Potencia
Azurita	372	-66.37	231 nW	158	-68.08	156 nW	904	-19.80	10.47 mW
	366	-66.16	242 nW	85	-64.61	346 nW	91	-69.58	110 nW
	358	-65.99	252 nW	36	-65.90	257 nW	—	—	—
	307	-68.45	143 nW	—	—	—	—	—	—
Featherweight	70	-66.95	202 nW	92	-67.57	175 nW	903	-20.21	9.53 mW
	137	-64.37	366 nW	—	—	—	—	—	—
	236	-68.45	143 nW	—	—	—	—	—	—
	307	-64.33	369 nW	—	—	—	—	—	—
	903	-25.69	2.70 mW	—	—	—	—	—	—
ASYB	147	-52.23	5.98 μ W	69	-62.92	592 nW	158	-67.83	165 nW
	213	-61.55	700 nW	137	-59.78	1.05 μ W	131	-66.33	233 nW
	245	-63.95	403 nW	114	-64.16	384 nW	112	-67.25	188 nW
	322	-66.28	236 nW	88	-64.37	366 nW	69	-64.54	352 nW
	—	—	—	70	-62.20	603 nW	—	—	—
COTS	86	-68.05	157 nW	903	-36.50	224 μ W	251	-69.35	116 nW
	155	-67.68	171 nW	—	—	—	144	-65.81	262 nW
	249	-66.97	201 nW	—	—	—	92	-64.76	334 nW
	374	-67.94	161 nW	—	—	—	—	—	—

6.1.2. Resultado de mediciones de campo eléctrico

La sonda de campo eléctrico modelo 7405-904 fue utilizada para la caracterización de emisiones electromagnéticas asociadas principalmente a acoplamientos capacitivos y a regiones con altos gradientes de potencial eléctrico en configuración de campo cercano. Este tipo de sonda es especialmente sensible a tensiones variables y a estructuras que actúan como antenas eléctricas no intencionadas dentro del EUT.

A diferencia de las sondas de campo magnético, cuya respuesta está dominada por corrientes de retorno y *loopss* conductores, la sonda de campo eléctrico permite identificar puntos donde existen acoplamientos capacitivos relevantes, tales como pistas de alta impedancia, líneas de señal rápidas, planos flotantes o cables mal referenciados. Estas características la convierten en una herramienta clave para el análisis de emisiones radiadas cuyo origen es un campo eléctrico en subsistemas electrónicos de la bahía de aviónica.

Durante las mediciones, la sonda fue posicionada a distancias muy cortas de las superficies del EUT, siguiendo barridos localizados sobre los subsistemas bajo prueba. Esto permitió obtener información espacial detallada de las fuentes dominantes de campo eléctrico y facilitar la correlación entre las componentes espectrales medidas y los elementos electrónicos internos responsables de su generación.

Cuadro de resultados: campo eléctrico de la sonda 7405-904

Cuadro 6.2: Picos dominantes identificados en mediciones de campo cercano eléctrico (sonda 7405-904) en notación ingenieril.

Subsistema	Eje X			Eje Y			Eje Z		
	f [MHz]	dBm	Potencia	f [MHz]	dBm	Potencia	f [MHz]	dBm	Potencia
Azurita	92	-55.88	2.58 μ W	903	-20.76	8.39 mW	381	-62.28	592 nW
	132	-62.88	515 nW	782	-64.03	395 nW	328	-63.16	483 nW
	241	-64.06	393 nW	323	-66.20	240 nW	240	-63.93	405 nW
	755	-66.10	245 nW	252	-64.29	372 nW	160	-67.13	194 nW
	—	—	—	157	-62.52	560 nW	137	-66.60	219 nW
	—	—	—	136	-56.92	2.03 μ W	85	-62.23	598 nW
Featherweight	91	-55.09	3.10 μ W	91	-54.05	3.94 μ W	85	-64.43	361 nW
	158	-66.38	230 nW	760	-62.74	532 nW	155	-66.18	241 nW
	235	-64.59	348 nW	786	-63.68	429 nW	246	-61.47	713 nW
	308	-67.17	192 nW	—	—	—	329	-63.16	483 nW
	751	-66.04	249 nW	—	—	—	—	—	—
	786	-65.67	271 nW	—	—	—	—	—	—
ASYB	92	-62.98	504 nW	91	-58.44	1.43 μ W	92	-54.06	3.93 μ W
	322	-66.30	234 nW	136	-62.13	612 nW	131	-57.39	1.82 μ W
	788	-69.53	111 nW	15.8	-63.24	474 nW	267	-62.78	527 nW
	—	—	—	295	-66.41	229 nW	300	-56.83	2.07 μ W
	—	—	—	338	-64.56	350 nW	361	-64.53	352 nW
	—	—	—	751	-67.05	197 nW	411	-67.88	163 nW
COTS RRC3	91	-54.67	3.41 μ W	85	-63.54	443 nW	91	-57.84	1.64 μ W
	158	-65.19	303 nW	161	-66.64	217 nW	159	-67.20	191 nW
	755	-64.55	351 nW	304	-67.65	172 nW	321	-63.74	423 nW
	781	-66.20	240 nW	360	-64.93	321 nW	399	-62.81	524 nW

6.2. Resultados de pruebas de campo lejano

A diferencia de las mediciones de campo cercano, enfocadas en la identificación y localización de fuentes específicas de emisión, las pruebas de campo lejano proporcionan una visión integral del impacto electromagnético del sistema una vez integrados los distintos subsistemas, permitiendo la comparación directa de los niveles medidos con los límites normativos establecidos.

6.2.1. Configuración de la prueba

Las mediciones se llevaron a cabo empleando un barrido de frecuencia de 30 MHz a 1 GHz, con detector cuasi-pico, conforme a los lineamientos de la norma EN 55022 para mediciones a 3 m. Durante la prueba, el EUT fue operado en un estado funcional representativo del modo de vuelo, con el fin de reproducir condiciones realistas de operación del sistema.

El cuadro 6.3 resume el modo de operación y las condiciones de prueba de cada uno de los subsistemas evaluados durante las mediciones de campo lejano.

Cuadro 6.3: Configuración y modo de operación de los subsistemas durante la prueba de campo lejano conforme a EN 55022 CPQP a 3 m.

Configuración de prueba – Campo lejano (EN 55022, CPQP, 3 m)		
Subsistema	Modo de operación	Especificaciones de la prueba
Computadora de vuelo "Azurita"	Modo vuelo	Subsistema encendido y operando en condiciones nominales de vuelo durante el barrido de 30 MHz a 1 GHz.
Rastreador GPS Featherweight	Modo vuelo	Subsistema encendido en modo vuelo con una antena monopolo que acompañaba al modulo de fabrica, sin modificaciones adicionales
Computadora comercial COTS (RRC3)	Modo vuelo	Subsistema encendido y operando en modo vuelo, con procesamiento interno activo y sin modificaciones adicionales durante la prueba.
Computadora de vuelo "ASYB"	Modo vuelo	Subsistema encendido en modo vuelo, con el envío de datos por antena habilitado, subsistema con la configuración de vuelo

Esta configuración permitió evaluar las emisiones radiadas tal cual el sistema opera, así es posible evaluar el desempeño real de un subsistema. Las mediciones aisladas no permiten ver el comportamiento en conjunto de un subsistema.

6.2.2. Resultados de emisiones radiadas

La Figura 6.2 presenta el espectro de emisiones radiadas medido a 3 m, junto con el límite correspondiente de la norma EN 55022 para equipos de Clase B. En la mayor parte del rango de frecuencias evaluado, los niveles de emisión se mantienen por debajo del límite normativo. No obstante, se identifican componentes espectrales que se aproximan y, en determinadas regiones del espectro, superan el límite establecido, particularmente hacia el extremo superior del rango de frecuencias.

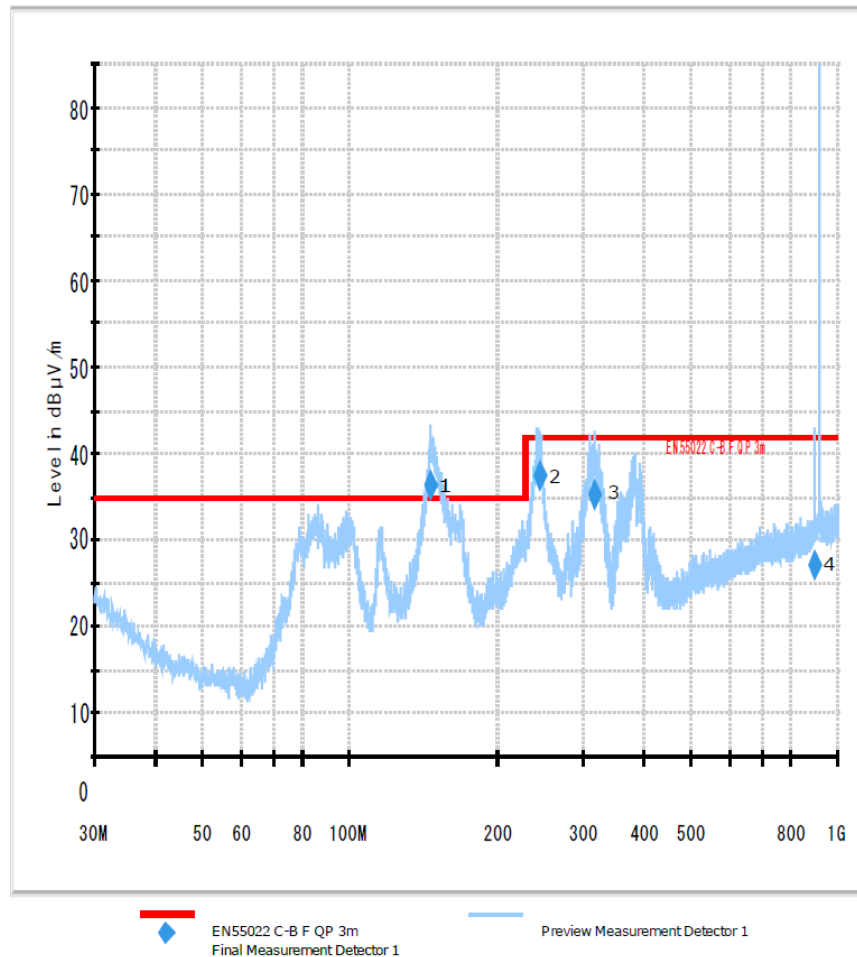


Figura 6.2: Resultados de emisiones radiadas en campo lejano conforme a EN 55022 CPQP a 3 m.

Las emisiones señaladas con un diamante en la Figura 6.2 fueron obtenidas a partir del barrido preliminar de emisiones radiadas y posteriormente evaluadas mediante detector quasi-pico, conforme a los criterios establecidos en la norma EN 55022 para mediciones a 3 m. Cada marcador numerado corresponde a una frecuencia específica en la que se identificó una emisión potencialmente relevante, asociada a señales periódicas del EUT. Los valores reportados representan el nivel quasi-pico en $\text{dB}\mu\text{V/m}$, el cual pondera la amplitud de la señal en función de su tasa de repetición, proporcionando una estimación más representativa del impacto real de la interferencia.

6.3. Discusión

Las pruebas de campo lejano y campo cercano, junto con el análisis cualitativo y cuantitativo de los subsistemas mostrado en el capítulo 4, permiten identificar los mecanismos de acoplamiento electromagnético presentes en los sistemas analizados. Este enfoque integral proporciona criterios técnicos concretos para evaluar el desempeño electromagnético del sistema y sustentar la metodología propuesta.

Particularmente, en el análisis de emisiones radiadas se presta especial atención a los “diamantes” identificados en las gráficas del analizador de espectros, los cuales representan los niveles promedio calculados mediante la técnica de detección quasi-pico. Estos puntos señalan frecuencias críticas donde el sistema presenta emisiones significativas. Asimismo, se analizan las regiones espectrales que pudieron caracterizarse por patrones recurrentes de emisión, asociándolas con posibles fuentes internas como relojes digitales, convertidores de potencia o líneas de transmisión.

En la siguiente figura se muestran los diamantes y áreas que se analizarán en relación a los resultados obtenidos

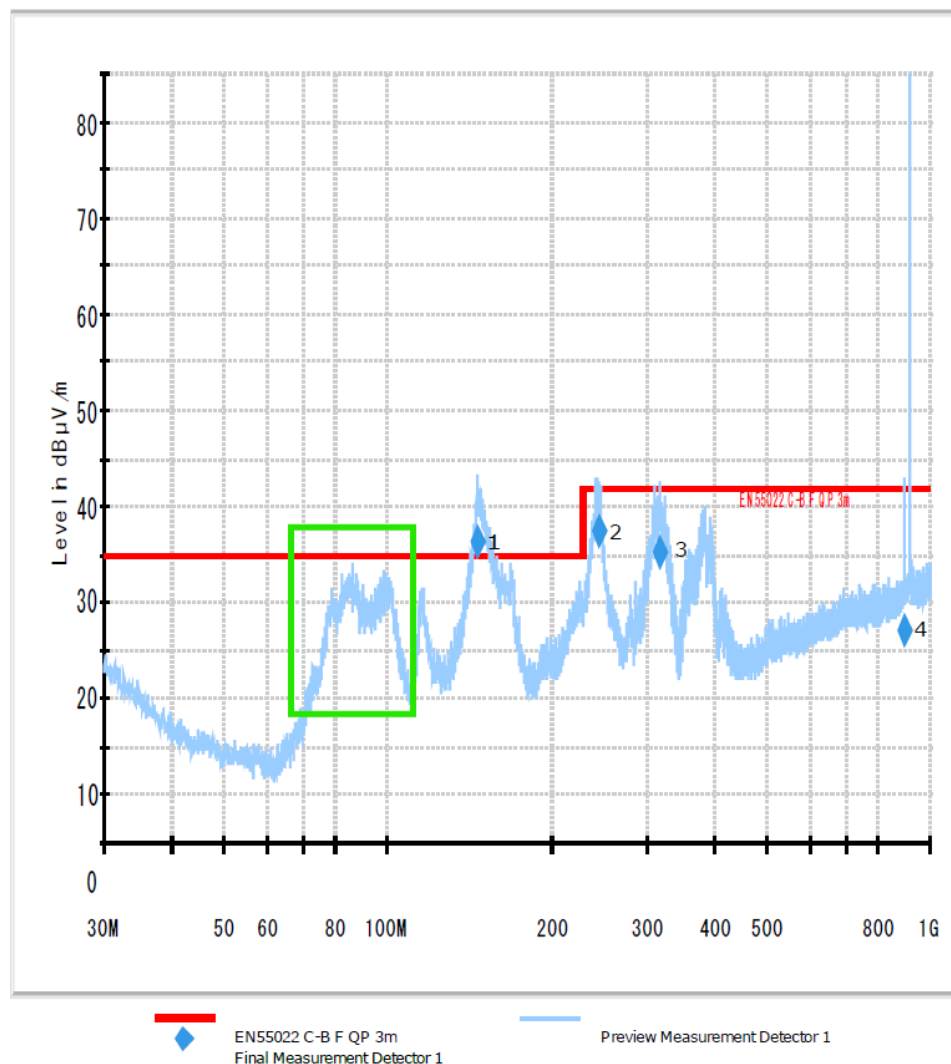


Figura 6.3: Resultados de emisiones radiadas en campo lejano conforme a EN 55022 señaladas

Cuadro 6.4: Valores estimados de los “diamantes” resultantes en la prueba EN 55022 a 3 metros (notación ingenieril).

Emisión señalada	Frecuencia [MHz]	Nivel [dB μ V/m]
Emisión 1	146.36	31.62
Emisión 2	241.66	32.86
Emisión 3	320.80	30.94
Emisión 4	915.72	27.51

6.3.1. Criterio de análisis de las emisiones señaladas

Las emisiones identificadas en la Figura 6.3 fueron seleccionadas para análisis detallado por representar máximos locales relevantes dentro del espectro medido mediante detector quasi-pico. Si bien la emisión 1 excede el límite normativo, no se presentaron anomalías operativas aunque su estudio resulta fundamental para comprender los mecanismos físicos que gobiernan el comportamiento radiado del sistema.

El análisis que se presenta a continuación no se limita a la comparación con el límite normativo, sino que busca establecer una correlación directa entre las frecuencias detectadas en campo lejano y las fuentes locales previamente identificadas en las mediciones de campo cercano. De esta manera, se pretende construir una relación causal entre fenómenos internos del EUT y su manifestación en el dominio radiado.

6.3.2. Análisis individual de las emisiones señaladas

Emisión 1 – 146.36 MHz

Identificación espectral Se identificó una componente estrecha centrada en

$$f_0 = 146,36 \text{ MHz},$$

ubicada en la banda VHF. En este rango de frecuencias, las dimensiones físicas del cableado pueden volverse eléctricamente significativas, favoreciendo mecanismos de radiación no intencional cuando existen trayectorias conductoras extensas.

Hipótesis de origen físico Una posible fuente de esta emisión es el cable coaxial que conecta la computadora de vuelo con la antena Moxon. Ambos elementos se encuentran ubicados en extremos opuestos de la estructura en sentido vertical, por lo que el coaxial atraviesa longitudinalmente la bahía de aviónica.

En condiciones ideales, un cable coaxial confina el campo electromagnético en el interior del dieléctrico, evitando la radiación externa. Sin embargo, en presencia de desbalances de impedancia, discontinuidades en la terminación del blindaje, diferencias de potencial entre referencias estructurales, puede excitarse corriente de modo común sobre la superficie externa de la malla. En ese caso, el blindaje deja de comportarse como elemento puramente apantallante y puede actuar como un conductor lineal radiador.

Análisis de longitud de onda y condición resonante La longitud de onda asociada a la frecuencia detectada se calcula como:

$$\lambda = \frac{c}{f_0} = \frac{2,9979 \times 10^8 \text{ m/s}}{146,36 \times 10^6 \text{ Hz}} \approx 2,05 \text{ m} \quad (6.4)$$

Para un conductor excitado en modo común respecto a una referencia estructural, la condición de máxima eficiencia de radiación ocurre cuando su longitud eléctrica es una fracción impar de un cuarto de longitud de onda:

$$L_{\text{res}} \approx \frac{(2n+1)\lambda}{4}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (6.5)$$

El primer modo resonante corresponde a:

$$\frac{\lambda}{4} \approx 0,512 \text{ m} \quad (6.6)$$

Asimismo, una configuración equivalente a un dipolo de media onda estaría dada por:

$$\frac{\lambda}{2} \approx 1,02 \text{ m} \quad (6.7)$$

Si la longitud física del tramo vertical del coaxial, o la trayectoria efectiva de la corriente de modo común a través del blindaje y la estructura, como es nuestro caso cuyo cable mide 65 cm aproximadamente, como se muestra en la Figura 6.4, entonces el sistema puede presentar una condición cercana a resonancia en torno a 146 MHz. En tal situación, pequeñas corrientes de modo común pueden producir niveles apreciables de radiación en campo lejano.



Figura 6.4: Medición física del cable coaxial que conecta la computadora de vuelo con la antena Moxón

Mecanismo electromagnético propuesto El mecanismo físico puede describirse en términos de conversión de modos. Las corrientes diferenciales internas del coaxial, asociadas a señales de RF o ruido digital proveniente de la computadora de vuelo, pueden convertirse parcialmente en corriente de modo común debido a desbalances en las terminaciones o en la referencia de tierra.

Una vez establecida, la corriente de modo común circula por la superficie externa del blindaje y retorna a través de la estructura del vehículo, formando un sistema equivalente a un monopolo excitado respecto a un plano de referencia imperfecto. Cuando la longitud eléctrica del conjunto coincide con una fracción significativa de la longitud de onda, el sistema adquiere eficiencia radiativa en la banda VHF, justificando la emisión observada en 146.36 MHz.

Coherencia con la integración física del vehículo La orientación vertical del coaxial y su recorrido longitudinal a lo largo de la estructura favorecen un patrón de radiación compatible con un monopolo estructural. Además, la presencia de la antena en uno de los extremos introduce una discontinuidad electromagnética natural que puede modificar la distribución de corriente y facilitar la excitación de modo común si el blindaje no se encuentra terminado con contacto circunferencial continuo.

En consecuencia, desde el punto de vista electromagnético y geométrico, la hipótesis del coaxial actuando como elemento resonante en modo común resulta físicamente consistente con la frecuencia detectada.

Emisión 2 – 241.66 MHz

Identificación espectral La emisión detectada a 241.66 MHz presenta un nivel quasi-pico de 32.86 dB μ V/m durante la prueba de emisiones radiadas conforme a EN 55022.

Posible origen físico Se identificó que esta componente corresponde a un armónico del reloj principal de la Raspberry Pi Pico empleada en la computadora de vuelo ASYB.

Mediante medición directa con osciloscopio se verificó que la frecuencia del oscilador es aproximadamente 12.08 MHz, como se muestra en la Figura 6.5.

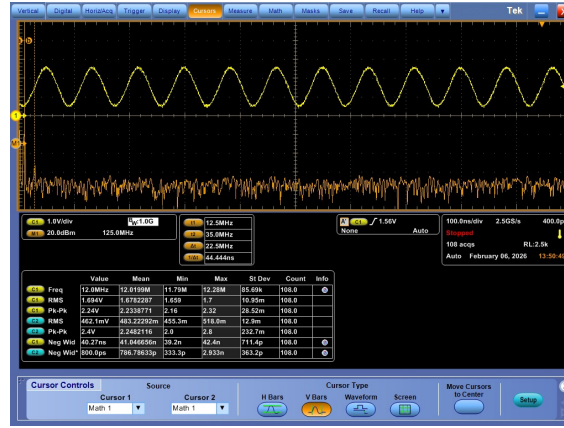


Figura 6.5: Medición del reloj principal de la Raspberry Pi Pico mediante osciloscopio.

La relación armónica puede estimarse como:

$$n = \frac{241,66 \text{ MHz}}{12,08 \text{ MHz}} \approx 20 \quad (6.8)$$

lo cual indica que la emisión corresponde aproximadamente al armónico de orden 20 del reloj digital.

La presencia de armónicos elevados es consistente con señales digitales de flancos rápidos, donde el contenido espectral se extiende ampliamente en frecuencia.

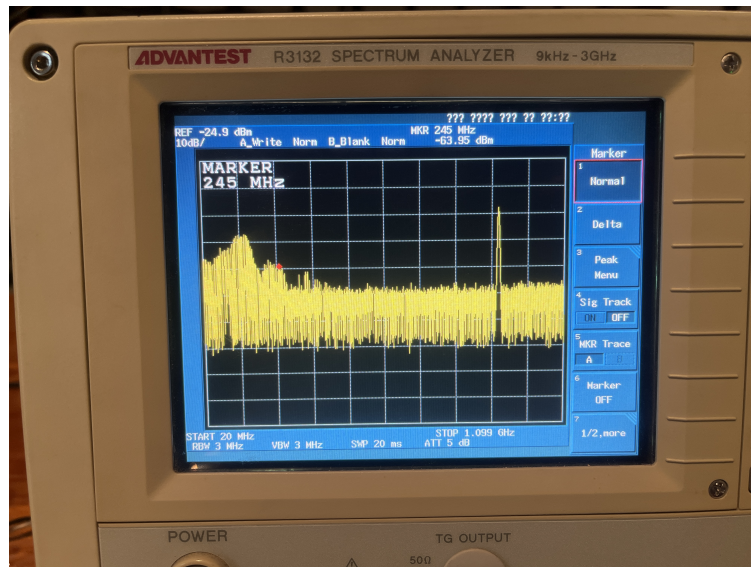


Figura 6.6: Componente espectral asociada al reloj de la Raspberry Pi Pico observada en el analizador de espectros con la sonda de campo eléctrico

Mecanismo de radiación Dado que la emisión fue detectada con mayor intensidad mediante la sonda de campo magnético, el fenómeno en el origen se clasifica como **acoplamiento inductivo**.

Las corrientes asociadas al reloj digital circulan por trayectorias de ida y retorno dentro del PCB. Las discontinuidades en el plano de referencia, cambios de capa o rutas extensas pueden favorecer la conversión de corrientes diferenciales a modo común.

Una vez que estas corrientes alcanzan el arnés o segmentos estructurales cuya longitud eléctrica es fracción significativa de la longitud de onda asociada:

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{241,66 \times 10^6} \approx 1,24 \text{ m}$$

segmentos de aproximadamente $\lambda/4 \approx 0,31 \text{ m}$ pueden comportarse como radiadores eficientes.

Correlación experimental La coincidencia entre:

- la frecuencia del reloj medida experimentalmente,
- la relación armónica calculada,
- la detección en campo cercano magnético,
- y la presencia en campo lejano,

confirma que la emisión en 241.66 MHz se origina en el reloj digital de la computadora de vuelo ASYB y se manifiesta externamente por conversión a modo común.

Lo relevante de esta detección es que la fuente primaria corresponde al reloj de la tarjeta de desarrollo Raspberry Pi Pico, la cual se encuentra integrada como módulo dentro de la computadora de vuelo ASYB. Aun cuando la ASYB incorpora desacoplo local en la alimentación del módulo (capacitores de *bypass/decoupling*), la emisión persiste debido a que el mecanismo dominante no depende únicamente del ruido conducido por la línea de potencia.

En este caso, el contenido armónico del reloj digital se genera por conmutación interna y se acopla principalmente a través de trayectorias de corriente de alta frecuencia y retornos en el PCB, así como por capacitancias parásitas entre planos, pistas y estructuras cercanas. Por ello, el desacoplo de alimentación reduce principalmente componentes conducidas de baja y media frecuencia, pero no elimina armónicos en VHF/UHF que se radian cuando existen *loops* de corriente, discontinuidades del plano de referencia o conversión de modo diferencial a modo común en interfaces y cableado.

Emisión 3 – 320.80 MHz

Identificación espectral La componente en 320.80 MHz presenta un nivel de 30.94 dB μ V/m durante la prueba de emisiones radiadas conforme a EN 55022. La señal se detecta de manera consistente en distintas configuraciones del sistema, lo cual sugiere que su origen está asociado a un subsistema común de alimentación.

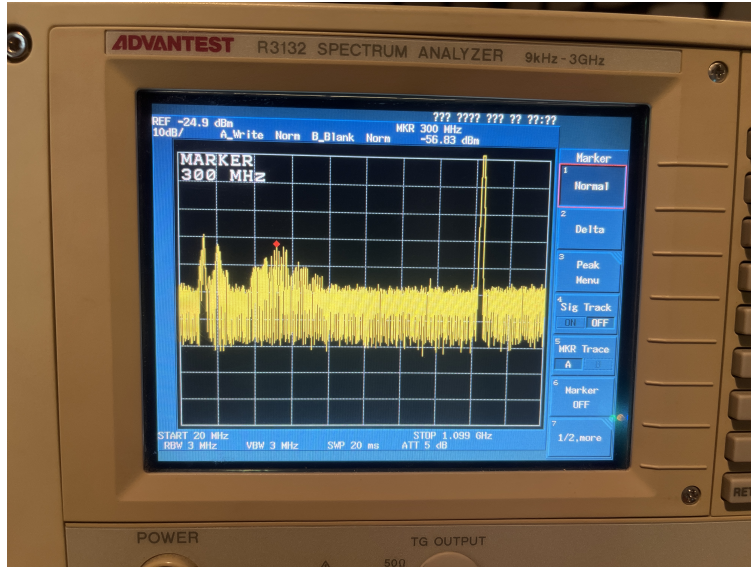


Figura 6.7: Componente espectral correspondiente al tercer diamante en 320.80 MHz durante la prueba de emisiones radiadas.

Análisis electromagnético La longitud de onda asociada a esta frecuencia puede estimarse como:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Sustituyendo:

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{320,80 \times 10^6 \text{ Hz}}$$

$$\lambda \approx 0,935 \text{ m}$$

Por lo tanto, una fracción significativa de esta longitud de onda (por ejemplo $\lambda/4 \approx 0,23 \text{ m}$) puede coincidir con dimensiones físicas del arnés de alimentación, pistas extensas en PCB o trayectorias estructurales dentro de la bahía de aviónica, permitiendo que dichas estructuras se comporten como radiadores eficientes a esta frecuencia.

Aunque el regulador Mini 560 Step Down opera con una frecuencia fundamental de conmutación de 500 kHz, los flancos rápidos del nodo de conmutación generan contenido armónico de amplio espectro debido al alto dV/dt . Estos armónicos pueden excitar resonancias estructurales cuando coinciden con dimensiones eléctricamente significativas.

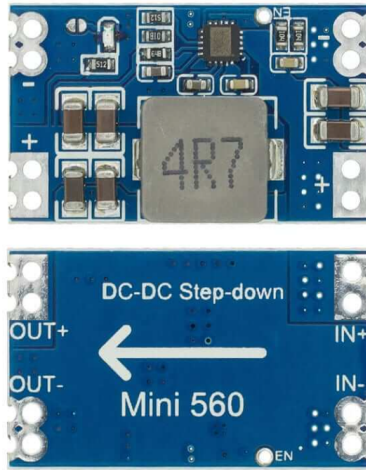


Figura 6.8: Módulo regulador Mini 560 Step Down. Se observa la bobina de potencia y la disposición compacta del nodo de conmutación, principales fuentes de ruido de alta frecuencia.

Datos del fabricante (Capítulo 4) El cuadro 6.5 resume los parámetros eléctricos del regulador conmutado Mini 560 Step Down reportados por el fabricante y utilizados previamente en el Capítulo 4. Estos valores respaldan que el subsistema de alimentación opera con conmutación fija a 500 kHz, condición que genera transitorios rápidos capaces de producir emisiones armónicas y excitación de resonancias en VHF/UHF.

Cuadro 6.5: Parámetros eléctricos del regulador conmutado Mini 560 Step Down.

Fuente Conmutada – Mini 560 Step Down					
Subsistema	Tipo de señal	f [Hz]	V_{op} [V]	I_{op} [A]	Notas
Mini 560 Step Down	Analógica (conmutada DC/DC)	500 000	4–23 (entrada) / 5 (salida)	< 5	Convertor buck síncrono de frecuencia fija, eficiencia máxima del 99 %. Rango térmico de operación: -40 a $+85$ °C.

Mecanismo dominante Dado que la emisión presenta mayor intensidad al emplear la sonda de campo eléctrico, el fenómeno en el origen se clasifica como **acoplamiento capacitivo**.

El alto dV/dt presente en el nodo de conmutación del convertidor buck genera corrientes de desplazamiento a través de capacitancias parásitas hacia el plano de referencia y el arnés de alimentación. Estas corrientes pueden convertirse en modo común y excitar conductores externos cuya longitud eléctrica sea comparable a una fracción de λ , produciendo radiación electromagnética detectable en campo lejano.

En consecuencia, el mecanismo primario dentro del sistema es capacitivo, mientras que la manifestación externa corresponde a radiación debida a conversión a modo común.

Emisión 4 - 915.72 MHz

Identificación espectral (campo lejano, EN 55022) La emisión #4 se identificó en una frecuencia aproximada de 915.72 MHz, con un nivel *quasi-peak* de 27.51 dB μ V/m durante la prueba de emisiones radiadas conforme a EN 55022. La señal se localiza dentro de la banda UHF y coincide con la banda ISM de 915 MHz utilizada por el subsistema de telemetría del vehículo.

Correlación con mediciones de campo cercano Para identificar el origen físico de la emisión, se realizaron mediciones de campo cercano eléctrico y magnético en la región del subsistema de telemetría. Se

observó que la respuesta en 915.72 MHz es significativamente mayor al emplear la sonda de campo magnético (ETS-Lindgren 7405-901), lo cual indica que el fenómeno está gobernado principalmente por corrientes de RF circulando en el sistema.

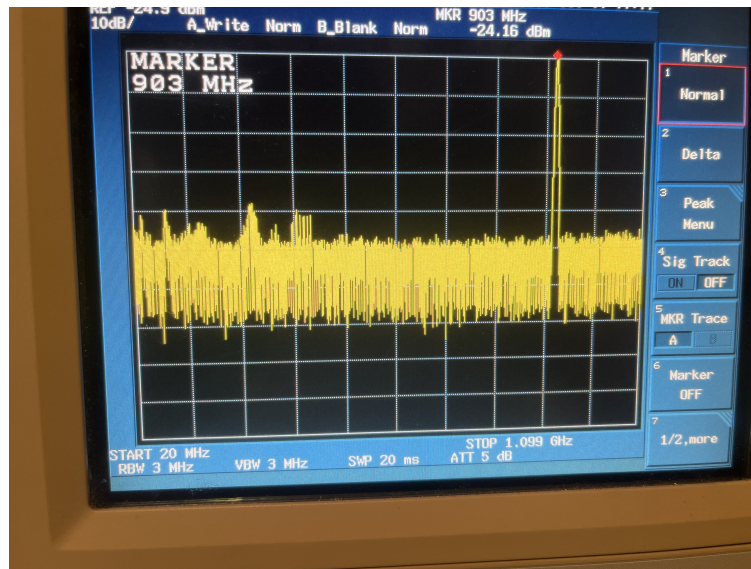


Figura 6.9: Medición de campo cercano magnético realizada con la sonda ETS-Lindgren 7405-901 sobre el subsistema Azurita, donde se observa un máximo espectral en 915.72 MHz.

La Figura 6.9 muestra el máximo espectral correspondiente al cuarto diamante. La dominancia del campo magnético respecto al campo eléctrico confirma que el mecanismo primario en el origen está asociado a trayectorias de corriente y *loopss* de retorno de alta frecuencia.

Respaldo con información del fabricante La frecuencia observada coincide con la frecuencia nominal de operación del transceptor LoRa RFM95W reportada en el Capítulo 4. Para fines de correlación, se presenta una versión resumida de los parámetros relevantes:

Cuadro 6.6: Parámetros relevantes del transceptor LoRa RFM95W en la banda ISM de 915 MHz.

Modo	Tipo de señal	f [MHz]	V_{op} [V]	Notas
TX / RX	RF analógica	915	3.3	Operación en banda ISM; potencia TX hasta +20 dBm.

La coincidencia entre la frecuencia especificada por el fabricante y la emisión detectada experimentalmente confirma que el cuarto diamante corresponde a la operación nominal del sistema de telemetría.

Mecanismo de acoplamiento Dado que la emisión presenta mayor intensidad en la medición de campo cercano magnético, el acoplamiento dominante en el origen se clasifica como **acoplamiento inductivo**, asociado a corrientes de RF generadas durante la operación del transceptor.

Para que la energía electromagnética sea detectada en campo lejano bajo EN 55022, dichas corrientes deben convertirse en corrientes de modo común sobre el arnés o la estructura del sistema, permitiendo que el conjunto actúe como una antena equivalente. En consecuencia, el mecanismo final de transferencia hacia el entorno es radiación electromagnética no intencional, mientras que el fenómeno primario dentro del sistema es de naturaleza inductiva.

Conclusión del diamante Por lo tanto, la emisión en 915.72 MHz se atribuye a la operación nominal del transceptor de telemetría, donde el fenómeno interno dominante es inductivo y la manifestación externa corresponde a radiación generada por corrientes de modo común.

Otras emisiones

Habiendo analizado los puntos mas representativos arrojados por la prueba de campo lejano, en el proceso se detectaron emisiones de distintas fuentes las cuales se caracterizaron, en la figura 6.3 podemos identificar mediciones entre 80 y 100 MHz

Identificación espectral (campo lejano, EN 55022) La emisión identificada en el rango de 92–96 MHz presenta un máximo espectral centrado en aproximadamente 92 MHz durante la prueba de emisiones radiadas conforme a EN 55022. La señal se localiza dentro de la banda VHF, donde estructuras conductoras del orden de decenas de centímetros pueden comportarse como radiadores eficientes.

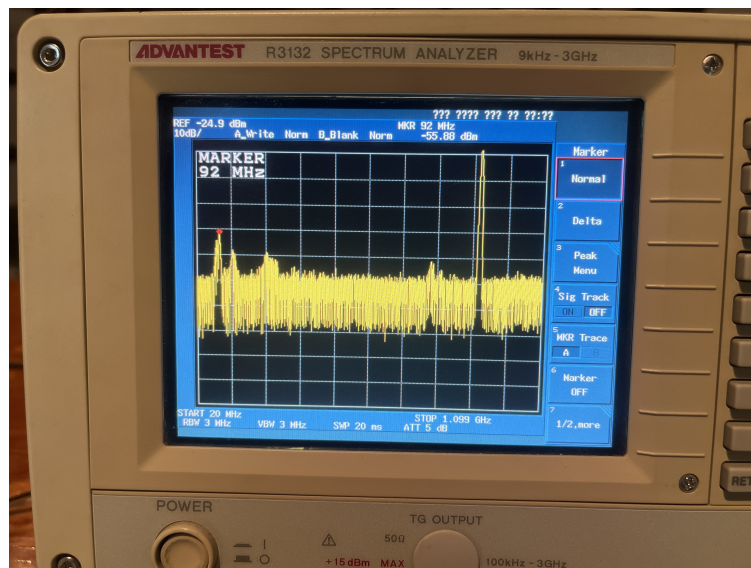


Figura 6.10: Medición en analizador de espectros donde se identifica la emisión centrada en aproximadamente 92 MHz.

Correlación con mediciones de campo cercano Para identificar el origen físico de la emisión, se realizaron mediciones de campo cercano eléctrico y magnético sobre la computadora de vuelo *Azurita*. Se observó que la respuesta en 92 MHz es significativamente mayor al emplear la sonda de campo eléctrico (ETS-Lindgren 7405-904), lo que indica que el fenómeno está gobernado principalmente por variaciones rápidas de potencial respecto al plano de referencia.

La máxima intensidad del campo eléctrico se localizó en las proximidades de la memoria flash de la PCB, sugiriendo que la fuente primaria de la emisión está asociada a la actividad de conmutación del dispositivo.

Respaldo con mediciones en dominio temporal Las mediciones realizadas con osciloscopio en los nodos asociados a la memoria flash muestran flancos rápidos de señal y contenido espectral coherente con la frecuencia detectada en campo lejano.

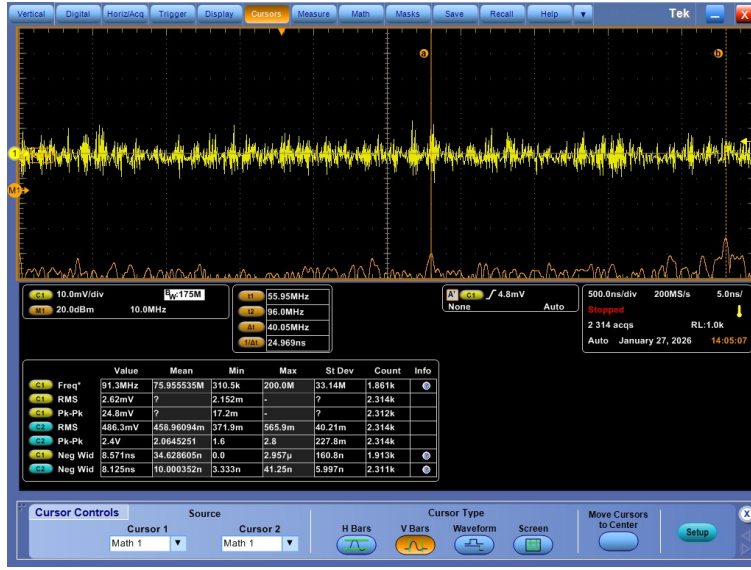


Figura 6.11: Señal temporal medida en osciloscopio en las proximidades de la memoria flash.

Respaldo con información del fabricante De acuerdo con la documentación técnica del fabricante, la memoria flash opera con una frecuencia nominal de reloj de:

$$f_{reloj} = 12 \text{ MHz} \quad (6.9)$$

Al comparar esta frecuencia con la emisión detectada experimentalmente, se obtiene:

$$n = \frac{f_{emision}}{f_{reloj}} = \frac{92}{12} \approx 7,67 \quad (6.10)$$

Este resultado indica que la emisión es consistente con un armónico superior del reloj digital. En particular, el octavo armónico corresponde a:

$$8 \times 12 \text{ MHz} = 96 \text{ MHz} \quad (6.11)$$

La diferencia entre 92 MHz y 96 MHz puede atribuirse a tolerancias instrumentales, variaciones en la frecuencia efectiva de operación o interacción con otras señales digitales presentes en la PCB.

El contenido armónico de una señal digital con tiempos de subida rápidos decrece aproximadamente como:

$$A_n \propto \frac{1}{n} \quad (6.12)$$

lo que explica la presencia de componentes significativas en la banda VHF.

Observaciones de arquitectura física (inspección visual) Durante la inspección visual de la computadora de vuelo *Azurita* se observó que la disposición de los componentes no sigue una segmentación clara por bloques funcionales, lo cual dificulta la separación física entre dominios digitales ruidosos y circuitería sensible. En este contexto, la memoria flash queda ubicada en una región eléctricamente activa y su contribución se vuelve dominante durante el diagnóstico con sonda.

Asimismo, no se identificó desacoplo localizado evidente asociado a la alimentación o nodos críticos de la memoria flash, lo cual puede incrementar la impedancia de retorno a altas frecuencias y favorecer mayores variaciones de potencial respecto al plano de referencia. Adicionalmente, se detectó un enrutamiento complejo de pistas asociadas a señales críticas, con trayectorias extendidas y retornos potencialmente compartidos, lo que incrementa la probabilidad de acoplamiento interno y excitación de corrientes de modo común.

Mecanismo de acoplamiento La mayor respuesta observada con la sonda de campo cercano eléctrico (ETS-Lindgren 7405-904) en la vecindad de la memoria flash sugiere que, a nivel local, la emisión está dominada por una **excitación por conmutación digital** asociada a altos valores de dV/dt en líneas de reloj/datos y nodos de referencia compartidos. En otras palabras, el fenómeno observado en campo cercano corresponde principalmente a **campo eléctrico cercano** generado por la actividad de la memoria y su interconexión inmediata.

No obstante, para que dicha energía sea detectable en campo lejano bajo EN 55022, es necesario un mecanismo de conversión hacia una estructura radiadora equivalente. En este caso, la evidencia de **segmentación funcional deficiente, ausencia de desacoplo localizado evidente y enrutamiento complejo de señales críticas** favorece desequilibrios de retorno y el establecimiento de corrientes de **modo común** sobre el arnés o trayectorias conductoras extendidas.

Dado que la emisión se ubica en VHF, estructuras conductoras de longitud comparable a una fracción de la longitud de onda pueden radiar de forma eficiente. Para $f \approx 96 \text{ MHz}$:

$$\lambda = \frac{c}{f} \approx \frac{3 \times 10^8}{9,6 \times 10^7} \approx 3,1 \text{ m} \quad (6.13)$$

$$\frac{\lambda}{10} \approx 0,31 \text{ m} \quad (6.14)$$

Por lo tanto, el fenómeno puede interpretarse como una secuencia física coherente en la que la conmutación digital de la memoria flash genera contenido armónico de orden superior; estos armónicos producen una excitación electromagnética local predominantemente asociada al campo eléctrico cercano debido a los elevados valores de dV/dt en los nodos digitales. Posteriormente, debido a desequilibrios en las trayectorias de retorno, ausencia de desacoplo localizado evidente y enrutamiento extendido de señales críticas, parte de esta energía se transforma en corrientes de modo común sobre el arnés y estructuras conductoras del sistema. Finalmente, dichas corrientes excitan longitudes conductoras comparables a una fracción significativa de la longitud de onda en VHF, dando lugar a la radiación electromagnética no intencional detectada en la prueba de campo lejano.

Capítulo 7

Conclusiones

En el presente trabajo se desarrolló y aplicó una metodología de análisis de compatibilidad electromagnética EMC sobre el diseño de un vehículo experimental de propulsión híbrida, integrando mediciones de campo cercano (sondas de campo magnético y de campo eléctrico), pruebas de campo lejano en cámara semianecoica y un análisis cualitativo y cuantitativo del diseño físico y eléctrico de los subsistemas.

El objetivo no se limitó a verificar el cumplimiento frente a un límite normativo, sino a establecer una correlación directa entre los fenómenos electromagnéticos internos del sistema y su manifestación radiada en campo lejano, con el fin de comprender los mecanismos de acoplamiento presentes y validar una metodología de diagnóstico aplicable al contexto de coherencia experimental.

Criterio de aceptación y uso de estándares

Se definió como criterio de aceptación que las emisiones radiadas medidas en configuración equivalente a EN 55022 a 3 m, empleando detector cuasi-pico, no excedieran los límites establecidos por la norma para el rango evaluado. Este criterio proporciona una referencia cuantitativa objetiva y reproducible para evaluar el desempeño electromagnético del sistema.

Sin embargo, es importante reconocer que los estándares aportan estructura metodológica y disciplina de ingeniería, pero no siempre pueden implementarse en su totalidad dentro de un proyecto académico debido a limitaciones de infraestructura, escalabilidad y recursos. En particular, aunque el barrido normativo cubre el rango de 30 MHz a 1 GHz, el sistema analizado presenta comportamientos relevantes en frecuencias menores (kHz), lo cual sugiere que una caracterización más amplia sería deseable en campañas futuras. No obstante, la prueba realizada permite evaluar el comportamiento en la región donde la radiación es más eficiente, proporcionando información diagnóstica suficiente para el alcance del proyecto.

Correlación entre campo cercano y campo lejano

Las mediciones de campo cercano permitieron identificar fuentes locales dominadas por corrientes, acoplamiento inductivo, o por variaciones rápidas de potencial; acoplamiento capacitivo. Por su parte, la prueba en cámara semianecoica permitió observar el efecto integral del sistema ya ensamblado y operando en condiciones representativas de vuelo.

La coincidencia entre frecuencias detectadas en campo cercano y los picos observados en campo lejano confirma la existencia de mecanismos coherentes de:

- generación de armónicos por conmutación digital y electrónica de potencia;
- conversión de corrientes diferenciales a modo común debido a desbalances de retorno o discontinuidades;
- radiación eficiente cuando las dimensiones físicas del cableado son eléctricamente significativas.

Síntesis de emisiones dominantes

El estudio se centró en los cuatro picos quasi-pico más representativos del espectro radiado (146.36 MHz, 241.66 MHz, 320.80 MHz y 915.72 MHz), no por ser las únicas emisiones presentes, sino por constituir máximos locales relevantes bajo el criterio normativo adoptado. El análisis de estos máximos permitió identificar mecanismos físicos dominantes y su relación con la arquitectura eléctrica y geométrica del sistema.

- **Excitación estructural por modo común (146.36 MHz):**

La emisión en 146.36 MHz es consistente con la hipótesis de excitación de corriente de modo común sobre el blindaje externo del cable coaxial que conecta la computadora de vuelo con la antena. Dado que la longitud de onda asociada es aproximadamente 2.05 m, una fracción de $\lambda/4 \approx 0,51$ m resulta comparable a la longitud efectiva del tramo vertical del cable, favoreciendo una condición cercana a resonancia tipo monopolo y explicando la radiación observada.

- **Armónicos digitales internos (241.66 MHz):**

La emisión en 241.66 MHz se correlaciona con el armónico aproximado de orden 20 del reloj digital de la Raspberry Pi Pico integrada en la computadora de vuelo ASYB. La detección predominante mediante la sonda de campo magnético indica que el fenómeno se origina en corrientes de alta frecuencia asociadas a la conmutación digital, que posteriormente se convierten en modo común y se manifiestan en campo lejano.

- **Contenido armónico amplio por conmutación de potencia (320.80 MHz):**

La emisión en 320.80 MHz se asocia con el convertidor conmutado Mini 560 Step Down. Aunque su frecuencia fundamental es de 500 kHz, los flancos rápidos del nodo de conmutación generan contenido armónico amplio que puede excitar estructuras resonantes en VHF/UHF. La mayor intensidad detectada con la sonda de campo eléctrico indica un mecanismo primario capacitivo, seguido de conversión a modo común y radiación.

- **Radiación intencional del subsistema RF (915.72 MHz):**

La emisión en 915.72 MHz corresponde a la operación nominal del transceptor de telemetría en banda ISM. La dominancia en campo magnético cercano confirma que el fenómeno está gobernado por corrientes de RF propias del transmisor, cuya manifestación en campo lejano depende de la integración geométrica y del control de retornos.

- **Armónicos de memoria flash y debilidades de integración en PCB (92–96 MHz):**

Adicionalmente, se identificaron emisiones en el rango de 92–96 MHz asociadas a armónicos del reloj de la memoria flash de la computadora *Azurita*. La respuesta predominante en campo eléctrico cercano y la inspección del diseño del PCB indican que la ausencia de segmentación funcional clara, el enrutamiento complejo y la falta de desacoplo localizado favorecen variaciones de potencial y conversiones a modo común, coherentes con la radiación detectada.

7.1. Validación de las hipótesis de diseño mediante resultados experimentales

Un aspecto relevante de este trabajo es que las especulaciones realizadas durante el análisis cualitativo y cuantitativo del diseño coinciden con los resultados obtenidos en las pruebas experimentales de campo cercano y campo lejano.

En particular, durante la evaluación de la computadora de vuelo *Azurita* se identificó que la disposición física de los componentes no presenta una segmentación clara por bloques funcionales, y que el enrutamiento de señales críticas no evidencia un control explícito de trayectorias de retorno o minimización de áreas de lazo. Estas observaciones, inicialmente planteadas como hipótesis derivadas del análisis geométrico y eléctrico del sistema, se reflejan posteriormente en las mediciones experimentales.

Las emisiones detectadas tanto en campo cercano como en campo lejano muestran componentes espectrales coherentes con:

- presencia de armónicos digitales significativos;
- posibles conversiones a modo común por retornos compartidos;
- estructuras conductoras con longitudes eléctricamente relevantes.

La correspondencia entre análisis de diseño y resultados medidos confirma que el diagnóstico del sistema desde su arquitectura física y eléctrica posee un alto valor predictivo. En este sentido, el trabajo demuestra que comprender la naturaleza de las señales, su frecuencia de operación, sus trayectorias de retorno y su integración geométrica permite anticipar comportamientos incluso antes de realizar pruebas formales.

Por lo tanto, si bien las pruebas con instrumentación especializada representan un apoyo fundamental para la validación experimental, para equipos de coherencia que no cuenten con acceso a laboratorios o infraestructura avanzada puede ser suficiente realizar un análisis sistemático del diseño, considerando:

- la naturaleza espectral de las señales presentes
- las longitudes físicas del cableado y estructuras
- la segmentación funcional del sistema a analizar o diseñar
- el control de planos de referencia y retornos.

Este enfoque permite realizar una implementación más correcta desde etapas tempranas, reduciendo la probabilidad de emisiones no intencionales y mejorando la integración entre subsistemas.

Finalmente, se concluye que la implementación de metodologías formales de análisis y diseño en compatibilidad electromagnética no sólo permite evaluar el desempeño del sistema, sino que constituye un mecanismo estructurado para asegurar su robustez. Dichas metodologías facilitan la identificación de fallas potenciales en etapas tempranas del desarrollo, disminuyen iteraciones de rediseño y fortalecen la confiabilidad del sistema completo dentro del entorno aeroespacial experimental.

Impacto de la integración mecánica en el desempeño electromagnético del sistema

A pesar de que uno de los equipos electrónicos integrados en la bahía de aviónica fue diseñado considerando criterios explícitos de compatibilidad electromagnética, la integración final del conjunto respondió primordialmente a restricciones mecánicas, tales como disponibilidad de espacio, accesibilidad y facilidad de manufactura. En el desarrollo del Xitle II no existió una interacción sistemática entre los responsables del diseño eléctrico-electrónico y el equipo encargado de la integración estructural, lo cual impidió una optimización conjunta del desempeño electromagnético del sistema.

Desde la perspectiva de compatibilidad electromagnética a nivel sistema, la inmunidad y las emisiones no son propiedades estrictamente locales de un subsistema aislado, sino propiedades emergentes de la arquitectura global, incluyendo la disposición física, las trayectorias de retorno, la configuración del arnés y la filosofía de referencia eléctrica común. En sistemas aeroespaciales, la integración electromagnética debe abordarse desde etapas tempranas de diseño, de manera coordinada con el diseño mecánico y estructural.

En el caso analizado, no se estableció una referencia eléctrica común claramente definida entre los distintos subsistemas contenidos en la bahía de aviónica. Los módulos comparten alimentación, estructura metálica y trayectorias longitudinales de cableado, pero no se implementó una filosofía explícita de control de retornos ni de equipotencialización estructural. Bajo estas condiciones, las corrientes asociadas a señales digitales y convertidores de potencia pueden presentar componentes en modo común.

Si se consideran dos conductores con tensiones instantáneas V_1 y V_2 respecto a una referencia arbitraria, la componente en modo común puede expresarse como:

$$V_{cm} = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (7.1)$$

Cuando la trayectoria de retorno no coincide geoméricamente con el conductor de ida, parte de la energía asociada a la señal diferencial se convierte en corriente en modo común. Estas corrientes pueden cerrar su trayectoria a través de la estructura metálica del vehículo, blindajes de cableado o superficies conductoras extensas, transformando al sistema en un radiador no intencional.

Dado que la bahía de aviónica presenta una disposición longitudinal de los equipos y conductores, la estructura y el arnés pueden comportarse electromagnéticamente como monopolos eléctricos fraccionarios cuando su longitud eléctrica es comparable con una fracción significativa de la longitud de onda de las componentes espectrales presentes. En consecuencia, pequeñas tensiones en modo común pueden producir niveles de radiación apreciables en el entorno de campo lejano.

El caso estudiado, si bien presentó un comportamiento funcional adecuado durante su desempeño en la competencia, constituye un ejemplo práctico de la relevancia de integrar criterios de compatibilidad electromagnética desde la fase conceptual del sistema. La planeación por jerarquía de nivel, la segmentación por bloques funcionales, la definición de una referencia eléctrica común, el control explícito de trayectorias de retorno y la minimización de áreas de lazo son decisiones que deben adoptarse de manera coordinada con las restricciones mecánicas y estructurales.

En síntesis, la experiencia obtenida en la integración de la bahía de aviónica demuestra que una arquitectura definida exclusivamente por criterios mecánicos puede satisfacer los requerimientos funcionales inmediatos, pero dejar vulnerabilidades electromagnéticas latentes que sólo se manifiestan durante las pruebas experimentales. Este resultado evidencia la necesidad de adoptar una metodología de diseño integral, en la cual la compatibilidad electromagnética se considere un requisito estructural del sistema y no únicamente una verificación posterior.

En este contexto, dicha metodología no depende exclusivamente de la disponibilidad de equipo especializado o de instalaciones de laboratorio, sino que se fundamenta en el análisis sistemático de las características eléctricas, geométricas y funcionales del sistema. Este enfoque permite comprender su comportamiento electromagnético y, en consecuencia, identificar vulnerabilidades y anticipar problemas de compatibilidad desde etapas tempranas del diseño.

Trabajo futuro

Como trabajo futuro se recomienda ampliar el rango de caracterización hacia frecuencias menores para capturar fenómenos conducidos, implementar estrategias específicas de mitigación de modo común en conexiones y cableado, mejorar la segmentación funcional y el desacoplo localizado en PCBs críticas, y complementar el estudio con pruebas de inmunidad que permitan cerrar el ciclo completo de evaluación EMC del sistema.

Apéndice A

Glosario de abreviaturas

]

AC	Corriente alterna. 14, 122
BOM	Lista de materiales(Bill of Materials). 62, 122
CAR	Canadian Association of Rocketry. 33, 122
CMRR	Common Mode Rejection Ratio (Relación de rechazo en modo común). 17, 122
COTS	Componente comercial disponible en el mercado. 34, 35, 59, 81, 122
DC	Corriente directa. 14, 122
EMC	Compatibilidad Electromagnética. 10–13, 15, 21–23, 48, 50–52, 56, 58, 62, 66, 73, 75, 79, 89, 118, 122
EME	Emisiones electromagnéticas. 122
EMI	Interferencia Electromagnética. 10–13, 18, 21, 26, 27, 37, 39, 47, 50–53, 63, 64, 74, 75, 87, 89, 122
EMS	Susceptibilidad electromagnética. 122
ESD	Descargas electrostáticas. 24, 122
EUT	Equipo bajo prueba. 22, 91–94, 96, 98, 101, 103–106, 108, 122
GSE	Estación terrena de llenado. 44, 73, 74, 79, 122
IMU	Unidad de Medición Inercial ,IMU, por sus siglas en inglés. 60, 122
ISM	Industrial, Scientific and Medical (bandas industriales, científicas y médicas). 37, 47, 81, 122
Lion	Iones de Litio. 122

LiPo	Polímero de litio. 122
MCU	Unidad microcontroladora ,MCU, por sus siglas en inglés. 60, 63, 122
NAR	National Association of Rocketry. 33, 122
PLA	Ácido Poliláctico. 122
QD	Desconexión rápida por sus siglas en inglés. 40, 122
RF	Radio frecuencia. 21, 63, 122
SAC	Spaceport America Cup. 30, 33, 34, 58, 71, 80, 122
SMA	Es un tipo de conector para antena sus siglas (SubMiniature version A). 63, 122
SRAD	Diseño e investigación a cargo de estudiantes. 34, 35, 59, 60, 80, 81, 99, 122
TRA	Tripoli Rocketry Association. 33, 122
UKRA	United Kingdom Rocketry Association. 33, 122

Bibliografía

- Agencia Espacial Mexicana. (2022). *Publican Norma Mexicana “NMX-AE-003-SCFI-2021” para impulsar la industria espacial nacional (Comunicado)* [Accessed: 2026-01-11]. <https://www.gob.mx/aem/prensa/publican-norma-mexicana-nmx-ae-003-scfi-2021-para-impulsar-la-industria-espacial-nacional-303582>
- Agencia Espacial Mexicana. (s.f.). Cuando el futuro nos alcanza [Consultado en junio de 2025]. <https://elmirador.sct.gob.mx/cuando-el-futuro-nos-alcanza/agencia-espacial-mexicana>
- Coordinación de Electromagnetismo, Facultad de Ciencias, UNAM. (2024). Unidad 2. Teoría para análisis de ruido por emisión [Incluye fundamentos sobre radiación electromagnética, antenas, y acoplos relacionados con EMC].
- Department of Defense. (1999). *MIL-STD-461E: Requisitos para el control de interferencias electromagnéticas* (inf. téc.) (Consultado en junio de 2025). United States Department of Defense.
- Duarte, C. (2024). La historia no contada del desarrollo espacial en México [Consultado en junio de 2025]. *Aviación 21*. <https://a21.com.mx/era-espacial/2024/12/03/la-historia-no-contada-del-desarrollo-espacial-en-mexico>
- Electronics Stack Exchange. (2020). Relationship between harmonics amplitude and square waves tr and pw [Consultado en marzo de 2026]. <https://electronics.stackexchange.com/questions/490339/relationship-between-harmonics-amplitude-and-square-waves-tr-and-pw>
- ETS-Lindgren. (2024). *Near-Field Magnetic Loop Probe (Model 7504-901)* [Accessed: 2026-01-01]. ETS-Lindgren. <https://www.ets-lindgren.com>
- European Cooperation for Space Standardization. (2008). *Space Engineering – Electromagnetic Compatibility (ECSS-E-ST-20-07C)* (inf. téc.). European Cooperation for Space Standardization.
- Experimental Sounding Rocket Association. (2024). SA Cup IREC Rules and Requirements Document (Version 1.4) [Consultado en junio de 2025]. https://www.soundingrocket.org/uploads/9/0/6/4/9064598/sa_cup_irec_rules_and_requirements_document_-2024_v1.4.20240304.pdf
- Ferrer-Pérez, J. A., Romo Fuentes, C., & Chávez Moreno, R. G. (2023). Spaceflight Environmental Test Facilities at UNAM to Develop Space Projects [Sección 4.3, referencia a la Norma Mexicana NMX-AE-003-SCFI-2021]. En *Space Fostering Latin American Societies* (pp. 167-173). Springer.
- Garcés, L., & Silva, D. Y. (2018). Key aspects in designing for electromagnetic compatibility for astronomical instrumentation. *Proceedings of SPIE, 10705*, 107052A. <https://doi.org/10.1117/12.2312759>
- Hayt, W. H., & Buck, J. A. (2012). *Engineering Electromagnetics* (8th). McGraw-Hill Education.
- International Electrotechnical Commission. (2008). *IEC 61000-4-2:2008 – Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-2: Testing and measurement techniques – Electrostatic discharge immunity test* (inf. téc.) (Consultado en junio de 2025). https://www.itu.int/en/ITU-D/Technology/Documents/Events2016/CI_Training_ARB_Tunis_April16/Session8/IEC_61000-4-2.2008.pdf
- International Electrotechnical Commission. (2014). *IEC 60601-1-2:2014/A1:2020, Equipo eléctrico médico – Parte 1-2: Requisitos generales de seguridad básica y rendimiento esencial – Norma complementaria: Perturbaciones electromagnéticas – Requisitos y ensayos* (inf. téc.) (Consultado en junio de 2025). IEC. <http://www.sft-lab.com.cn/uploads/IEC%2060601-1-2.pdf>
- International Electrotechnical Commission. (2015). *IEC 60533: Electrical and electronic installations in ships – Electromagnetic compatibility (EMC) – Ships with a metallic hull* (inf. téc.) (Consultado en junio de 2025). <https://webstore.iec.ch/publication/22324>
- International Organization for Standardization. (2002). *ISO 14302: Space systems - Electromagnetic compatibility requirements* (inf. téc.) (Consultado en junio de 2025). ISO.
- International Organization for Standardization. (2005). *ISO 11452-1: Road vehicles — Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy — Part 1: Ge-*

- neral principles and terminology (inf. téc.) (Consultado en junio de 2025). <https://www.iso.org/standard/37058.html>
- Leach, R., & Alexander, M. (1995). *Electronic Systems Failures and Anomalies Attributed to Electromagnetic Interference* (inf. téc. N.º NASA RP-1374) (pp. 2–3). NASA, Marshall Space Flight Center.
- Módulo Mini-560 Regulador Step-Down [Consultado el 31 de agosto de 2025]. (2025). UElectronics. <https://uelectronics.com/producto/mini-560-regulador-step-down/>
- National Association of Rocketry. (s.f.). Standard Motor Codes [Consultado el 23 de junio de 2025]. https://ftp.demec.ufpr.br/foguete/apostila/codigo_padrao_motores_da_NAR.pdf
- Ott, H. W. (2009). *Electromagnetic Compatibility Engineering*. Wiley.
- Perez, R. J. (Ed.). (2019). *Handbook of Aerospace Electromagnetic Compatibility*. John Wiley & Sons, Inc.; IEEE Press.
- Polo Pérez, E. S. (2024). *Diseño, implementación y evaluación de sistema para monitoreo/encendido de motores cohete híbridos* [Tesis de Licenciatura]. Universidad Nacional Autónoma de México [Consultado en junio de 2025]. https://tesiumam.dgb.unam.mx/F/7F4FKP4RF49VKQI6NFQGKF1821FETGDQR1KLX8BH4X94A2JPL9-02017?func=full-set-set&set_number=097537&set_entry=000001&format=999
- Rocketry, W. (2024). *Subsystems Overview* [Accessed: 2025-10-06]. University of Waterloo. <https://www.waterloorocketry.com/subsystems>
- RRC3 – Rocket Recovery Controller 3 User Manual [Consultado el 31 de agosto de 2025]. (2014). Apogee Components. <https://www.apogeerockets.com/downloads/PDFs/RRC3-user-manual.pdf>
- RTCA. (2018). *DO-160G: Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment* (inf. téc.) (Consultado en junio de 2025). <https://do160.org/power-input/>
- Secretaría de Economía. (2021a). *Programa Nacional de Infraestructura de la Calidad: Comité Técnico de Normalización Nacional del Espacio (COTENNE)* [Accessed: 2026-01-11]. https://onncce.org.mx/images/Eventos/SPNIC_2021_fpDOF_23.08.2021.pdf
- Secretaría de Economía. (2021b). *Programa Nacional de Normalización 2021 (DOF 23/08/2021): Sección 3.2.6 Comité Técnico de Normalización Nacional del Espacio (COTENNE)* [Accessed: 2026-01-11]. <https://docs.mexico.justia.com/recursos/covid-19/2021-08-23/secretaria-de-economia-01.pdf>
- Secretaría de Economía. (2022a). *NMX-AE-003-SCFI-2021 – Catálogo Mexicano de Normas (PLATIICA)* [Accessed: 2026-01-11]. <https://platiica.economia.gob.mx/normalizacion/nmx-ae-003-scfi-2021/>
- Secretaría de Economía. (2022b). *NMX-AE-003-SCFI-2021: Sistemas Espaciales–Requisitos de compatibilidad electromagnética* [Accessed: 2026-01-11]. <https://platiica.economia.gob.mx/normalizacion/nmx-ae-003-scfi-2021/>
- Sevgi, L. (2009). Electromagnetic Compatibility Engineering Education. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 17(3), 251-262. <https://doi.org/10.3906/elk-0901-13>
- Soni, A. (2023, marzo). How to Save Your Chips From Electromagnetic Coupling [Consultado en junio de 2025]. <https://www.ansys.com/blog/saving-chips-from-electromagnetic-coupling>
- UElectronics. (2025a). HX711 Módulo A/D para celdas de carga [Consultado: 4 septiembre 2025].
- UElectronics. (2025b). NCE6020AK MOSFET N 60V 20A SMD [Consultado: 4 septiembre 2025].
- UElectronics. (2025c). Raspberry Pi 5 [Consultado el 4 de septiembre de 2025]. <https://uelectronics.com/producto/raspberry-pi-5/?srsltid=AfmBOopC9ZIGPqiddB634x70t0R68uYiShzKPeMk-dsra29Xh58G9YOU>
- UNAM, E. P. (2025). Documentación técnica de la estación terrena SRAD [Disponible como archivo anexo en la tesis].
- Weston, D. A. (2016). *Electromagnetic Compatibility: Methods, Analysis, Circuits, and Measurement* (Third [2017 by Taylor & Francis Group, LLC]. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Zepeda Sandoval, X., Baños Mancilla, O. H., Monroy Montaña, L. E., & Roldán Cruz, N. J. (2024). Análisis de la Compatibilidad Electromagnética en Cohetes de Alta Potencia: Desafíos y Soluciones [Trabajo técnico de investigación aplicada, Propulsión UNAM]. *Facultad de Ingeniería, UNAM*.