

Carga Útil Store & Forward para satélite tipo CubeSat

Número de Documento: 01501P01PDR001

Proyecto: BIFROST

Preparado por:

DTS SpA / Nicolás Seguel

Preparado para:



||

INVAP

IMPORTANTE

Este documento y la información contenida en él son propiedad de DTS SpA. Cualquier reproducción, transferencia o uso por terceros está prohibido salvo autorización escrita de DTS SpA. Los receptores de este documento aceptan la responsabilidad de mantener la confidencialidad de su contenido de acuerdo a la clasificación indicada en el encabezamiento.

	Nombre	Cargo	Firma
Elabora	Nicolás Seguel	Ingeniero Civil Eléctrico (Práctica Profesional)	
Revisa	Juan Carlos Sepúlveda	Ing. Desarrollo Espacial	
	Alvaro Valenzuela	PhD Sistemas Espaciales	
Aprueba	Lino Acuña	Jefe Departamento I+D+i	

 filial de  DTS SpA	INTERNO Proyecto BIFROST	18-febrero-2026
I+D+i	Diseño de Carga Útil Store & Forward	Revisión: 1.0

HISTORIA DE REVISIONES

NUMERO DE REVISION	FECHA DE REVISION	PAGINAS AFECTADAS
1.0	2026-02-18	Primera edición

Este documento y la información contenida en él son propiedad de DTS SpA. Cualquier reproducción, transferencia o uso por terceros está prohibido salvo autorización escrita de DTS SpA. Los receptores de este documento aceptan la responsabilidad de mantener la confidencialidad de su contenido de acuerdo a la clasificación indicada en el encabezamiento.	Página 2 de 43
01501P01PDR001	

Contenido

1.	INTRODUCCIÓN.....	5
1.1	Documentación Complementaria.....	6
1.2	Glosario de Términos.....	7
1.3	Acrónimos.....	7
2.	DOCUMENTACIÓN ENTREGABLE Y COMPLEMENTARIA.....	9
2.1.1	Matriz de Trazabilidad y Requerimientos (TRM).....	9
2.1.2	Modelo de Ingeniería de Sistemas (MBSE) en Eclipse Capella.....	9
2.1.3	Herramienta de Simulación Orbital y Presupuesto de Enlace (Link Budget).....	10
2.1.4	Planificación del Proyecto (Carta Gantt).....	10
2.1.5	Alcance del documento.....	10
3.	CONTEXTO Y MOTIVACIÓN.....	11
4.	DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA.....	11
4.1	Visión de alto nivel.....	11
4.2	Actores del Sistema.....	12
4.3	Entorno operacional.....	12
5.	CONCEPTO DE OPERACIÓN.....	12
5.1	¿Qué es el sistema?.....	12
5.2	¿Por qué se desarrolla?.....	13
5.3	¿Quiénes participan?.....	13
5.3.1	Participantes del proyecto:.....	13
5.3.2	Usuarios y clientes potenciales:.....	13
5.3.3	Entidades relacionadas con el proyecto:.....	13
5.4	¿Dónde opera?.....	14
5.5	¿Cuándo opera?.....	14
5.5.1	Fases del proyecto.....	14
5.5.2	Marco de operación en órbita.....	15



5.6	¿Cómo opera?	15
6.	ESCENARIOS OPERACIONALES	15
6.1	Operación nominal.....	15
6.2	Interrupciones de conectividad	16
6.3	Operación bajo efectos de radiación y errores.....	17
6.4	Actualizaciones de software y firmware desde el Centro de Control de Misión	18
7.	CAPACIDADES Y RESTRICCIONES OPERACIONALES	18
7.1	Restricciones de plataforma y mecánicas.....	18
7.2	Restricciones del entorno orbital y materiales	19
8.	EVUALUACIÓN DE RIESGOS	20
8.1	Metodología.....	20
8.2	Resultados de la evaluación.....	20
9.	INTERFACES OPERACIONALES.....	21
9.1	Interfaz con la Plataforma (Bus GomSpace 12U).....	21
9.2	Sistema de Antenas del Payload	21
9.3	Interfaz Canal Uplink.....	21
9.4	Interfaz Canal Downlink (Uso de Recurso de Bus).....	22
10.	DESARROLLO DE INGENIERÍA.....	22
10.1	Entornos operacionales, capacidades y misión del proyecto.....	22
10.2	Definición de la carga útil como sistema	23
10.2.1	Desarrollo de la Arquitectura Lógica del sistema	25
10.3	Arquitectura Física del sistema	26
10.4	Cálculo de Presupuesto de Enlace y Potencia de Transmisión	28
10.4.1	Presupuesto de Uplink	28
	28
10.4.2	Presupuesto de Downlink	30
11.	VALIDACIÓN Y DEMOSTRACIÓN	30

11.1	Pruebas en Tierra (Ground Testing).....	30
11.1.1	Ensayos Funcionales y Eléctricos	30
11.1.2	Ensayos Ambientales Térmicos.....	31
11.1.3	Ensayos Mecánicos y Dinámicos	31
11.1.4	Compatibilidad Electromagnética (EMC)	31
11.2	Validación en Órbita (IOV)	31
12.	EVOLUCIÓN Y ESCALABILIDAD	32
13.	TRAZABILIDAD DEL SISTEMA.....	32
14.	ESTIMACIÓN DE COSTOS	33
14.1	Supuestos de estimación	33
14.2	Desglose de costos estimados	33
15.	ANEXOS	34
15.1	Tabla 1: User Requirements.....	¡Error! Marcador no definido.
15.2	Tabla 2: System Requirement	¡Error! Marcador no definido.
15.3	Tabla 4: Riesgos de UR	¡Error! Marcador no definido.
15.4	Tabla 5: Riesgos de SR.....	¡Error! Marcador no definido.
15.5	Tabla 5: Ensayos preliminares.....	¡Error! Marcador no definido.

1. INTRODUCCIÓN

En el contexto del Desarrollo de Capacidades Espaciales que forman parte del Plan Estratégico de DTS para el periodo 2025 – 2029, se considera el formar capital humano y adquirir nuevas capacidades. Asimismo, DTS e INVAP han firmado un acuerdo de cooperación que considera los siguientes aspectos asociados al área espacial:

- Explorar y desarrollar estrategias conjuntas para la transferencia de conocimientos y tecnología en temas relacionados con el desarrollo de tecnología espacial y de radares, incluyendo la fabricación, soporte, mantenimiento y asesoría en temáticas afines.
- Explorar y desarrollar estrategias conjuntas para la ejecución de proyectos relacionados con la integración, ensamblado y prueba (AIT, por sus siglas en inglés) de tecnología satelital y de

 filial de  DTS SpA	<p style="text-align: center;">INTERNO</p> <p style="text-align: center;">Proyecto BIFROST</p>	<p style="text-align: right;">18-febrero-2026</p>
I+D+i	Diseño de Carga Útil Store & Forward	Revisión: 1.0

radares como, asimismo, la fabricación y comercialización de esta tecnología en Chile o en el contexto internacional.

- c. Integrar y articular la estructura y red local que ejecuta la transferencia de conocimiento y tecnología y el desarrollo de temas relacionados con el ámbito espacial y de radares, considerando cursos, capacitaciones, entrenamientos y/o otros procesos afines.

Este proyecto constituye una plataforma de validación tecnológica que permitirá a DTS consolidar experiencia en sistemas satelitales, al mismo tiempo que contribuye a mejorar la conectividad y resiliencia de las comunicaciones en el territorio nacional.


1.1 Documentación Complementaria

Referencia [1]: Memorándum de entendimiento ENAER – DTS – INVAP, marzo de 2025

Referencia [2]: 03200C00FOR001-01 Manual de Formato de Publicaciones, DTS, revisión 2.0, marzo 2008.

Referencia [3]: 03200C00PRO005-01 Procedimiento de Identificación de Documentos, DTS, revisión 2.0, marzo 2008.

<p>Este documento y la información contenida en él son propiedad de DTS SpA. Cualquier reproducción, transferencia o uso por terceros está prohibido salvo autorización escrita de DTS SpA. Los receptores de este documento aceptan la responsabilidad de mantener la confidencialidad de su contenido de acuerdo a la clasificación indicada en el encabezamiento.</p>	<p style="text-align: center;">Página 6 de 43</p>
<p style="text-align: center;">01501P01PDR001</p>	

 DTS SpA <small>filial de ENAER</small>	INTERNO Proyecto BIFROST	18-febrero-2026
I+D+i	Diseño de Carga Útil Store & Forward	Revisión: 1.0

1.2 Glosario de Términos


Término	Definición
CONOPS	Concepto de Operación. Documento que describe las características de un sistema propuesto desde la perspectiva del usuario.
CubeSat	Estándar de nanosatélite con un formato cúbico de 10x10x10 cm por unidad (1U), escalable a unidades mayores (ej. 12U).
Store & Forward	(Almacenar y Reenviar). Técnica de comunicación en la que la información se envía a una estación intermedia donde se guarda temporalmente antes de ser reenviada a su destino final.
LEO	<i>Low Earth Orbit</i> (Órbita Terrestre Baja). Región orbital alrededor de la Tierra con una altitud de hasta 2,000 km.
UHF	<i>Ultra-High Frequency</i> (Frecuencia Ultra Alta). Banda del espectro electromagnético que abarca el rango de 300 MHz a 3 GHz.
COTS	<i>Commercial Off-The-Shelf</i> . Componentes comerciales estándar, disponibles en el mercado para su compra.
ARGOS	Red internacional de recolección de datos ambientales vía satélite. La versión más actual corresponde a ARGOS-3 con comunicación bidireccional.
Capella	Software de código abierto dedicado a modelar sistemas complejos y ayudar con el desarrollo de ingeniería en sistemas de un proyecto.

1.3 Acrónimos

Acrónimo	Significado
DTS	Desarrollo de Tecnologías y Sistemas
INVAP	Investigaciones Aplicadas
CEN	Centro Espacial Nacional
OBC	<i>On-Board Computer</i> (Computador a Bordo)
CAN	<i>Controller Area Network Bus</i>
DCS	<i>Data Collection System</i>
DCP	<i>Data Collection Platform</i>

Este documento y la información contenida en él son propiedad de DTS SpA. Cualquier reproducción, transferencia o uso por terceros está prohibido salvo autorización escrita de DTS SpA. Los receptores de este documento aceptan la responsabilidad de mantener la confidencialidad de su contenido de acuerdo a la clasificación indicada en el encabezamiento.	Página 7 de 43
01501P01PDR001	

Acrónimo	Significado
MCC	<i>Mission Control Center</i>
OC	<i>Operational Capability</i>
SA	<i>System Actor</i>

 filial de ENAER DTS SpA	INTERNO Proyecto BIFROST	18-febrero-2026
I+D+i	Diseño de Carga Útil Store & Forward	Revisión: 1.0

2. DOCUMENTACIÓN ENTREGABLE Y COMPLEMENTARIA

El proyecto BIFROST se sustenta en un ecosistema integral compuesto por una serie de documentos, modelos, simulaciones y matrices que actúan en conjunto como la fuente única de verdad (*Single Source of Truth*) del sistema. A continuación, se detalla la estructura de estas herramientas y entregables que complementan y respaldan el diseño preliminar de la carga útil *Store & Forward*.

2.1.1 Matriz de Trazabilidad y Requerimientos (TRM)

El documento **01501P01TRM006 - TraceabilityRequirimentsMatrix** es el archivo central de gestión de requisitos del proyecto. Este documento consolida la información técnica y programática, asegurando que cada decisión de diseño esté justificada. Contiene:

- **Requerimientos de Usuario y Sistema:** Listado exhaustivo de las necesidades de la misión y su traducción a especificaciones técnicas.
- **Matriz de Trazabilidad:** Mapeo bidireccional que asegura que todos los requerimientos de usuario tengan un requerimiento de sistema asociado (y viceversa).
- **Matriz de Riesgos y Mitigaciones:** Identificación de riesgos técnicos, programáticos y operacionales, junto con sus respectivos planes de contingencia.
- **Matriz de Ensayos:** Definición de los métodos de verificación (análisis, inspección, ensayo o demostración) para cada requerimiento, fundamental para las futuras fases PDR y CDR.


2.1.2 Modelo de Ingeniería de Sistemas (MBSE) en Eclipse Capella

El esqueleto fundamental del proyecto BIFROST está modelado íntegramente en **Eclipse Capella**, una herramienta de código abierto para la Ingeniería de Sistemas Basada en Modelos (MBSE).

Este modelo se fundamenta en la **Metodología Arcadia** (Architecture Analysis & Design Integrated Approach), la cual estructura el diseño en cuatro fases sucesivas y trazables:

1. **Análisis Operacional (OA):** Define qué deben lograr los usuarios (ej. Estaciones Remotas, Centro de Control) y el entorno de la misión.
2. **Análisis del Sistema (SA):** Trata al sistema BIFROST como una "caja negra", definiendo sus funciones, fronteras y los intercambios de datos con los actores externos.
3. **Arquitectura Lógica (LA):** Abre la caja negra para agrupar las funciones en componentes lógicos, independientemente de su implementación tecnológica.
4. **Arquitectura Física (PA):** Asigna las funciones y componentes lógicos a hardware y software concreto.

Este documento y la información contenida en él son propiedad de DTS SpA. Cualquier reproducción, transferencia o uso por terceros está prohibido salvo autorización escrita de DTS SpA. Los receptores de este documento aceptan la responsabilidad de mantener la confidencialidad de su contenido de acuerdo a la clasificación indicada en el encabezamiento.	Página 9 de 43
01501P01PDR001	

 DTS SpA	INTERNO Proyecto BIFROST	18-febrero-2026
I+D+i	Diseño de Carga Útil Store & Forward	Revisión: 1.0

Acceso y Entregables del Modelo: Para facilitar la revisión por parte de los *stakeholders* y el equipo de ingeniería, el modelo de Capella se entrega en múltiples formatos:

- **Formato Nativo (Importación/Exportación):** *El modelo completo se entrega como un archivo comprimido (.zip). Cualquier usuario con Capella instalado puede importar el proyecto directamente a su espacio de trabajo (Workspace) para editar o navegar por el modelo y sus diagramas.*
- **Exportación Web (HTML):** *Se provee una versión exportada en HTML. Esto permite a los revisores navegar interactivamente por todos los diagramas, jerarquías y descripciones del modelo directamente desde un navegador web, sin necesidad de instalar el software.*
- **Imágenes:** Todos los diagramas clave (cadenas funcionales, arquitecturas y escenarios) han sido exportados como imágenes para su inclusión en la documentación.

2.1.3 Herramienta de Simulación Orbital y Presupuesto de Enlace (Link Budget)

Para validar la viabilidad de las comunicaciones, se desarrolló un entorno de simulación propio en Python, alojado en el directorio `link_budget/`. Esta herramienta interactiva permite simular una órbita *Sun-Synchronous* (SSO) en 3D y calcular en tiempo real el presupuesto de enlace.

Estructura del Código:

- **3d_orbit.py:** Script principal de ejecución y visualización interactiva.
- **config.py:** Archivo central de parámetros (altura, parámetros de la estación terrena, margen Eb/N0, etc.).
- **orbital_mechanics.py & link_budget_core.py:** Módulos matemáticos base.
- **turnstile_pattern.py & monopole_pattern.py:** Modelamiento realista de los diagramas de radiación de las antenas del satélite y de tierra.


2.1.4 Planificación del Proyecto (Carta Gantt)

Finalmente, el proyecto cuenta con una **Carta Gantt** maestra. Este documento detalla el cronograma de actividades, las dependencias entre las distintas fases de diseño (SRR, PDR, CDR), los hitos de revisión crítica, el aprovisionamiento de componentes y los tiempos estimados para integración y ensayos.

2.1.5 Alcance del documento

Este documento presenta la Revisión de Diseño Preliminar (PDR) para la carga útil *Store & Forward* del proyecto BIFROST. Si bien el informe establece una línea base mediante la definición del Concepto de Operaciones (CONOPS), los escenarios operacionales y las restricciones, su propósito fundamental es

Este documento y la información contenida en él son propiedad de DTS SpA. Cualquier reproducción, transferencia o uso por terceros está prohibido salvo autorización escrita de DTS SpA. Los receptores de este documento aceptan la responsabilidad de mantener la confidencialidad de su contenido de acuerdo a la clasificación indicada en el encabezamiento.	Página 10 de 43
01501P01PDR001	

 filial de ENAER DTS SpA	INTERNO Proyecto BIFROST	18-febrero-2026
I+D+i	Diseño de Carga Útil Store & Forward	Revisión: 1.0

demostrar la viabilidad técnica y arquitectónica de la solución antes de avanzar hacia la fase de diseño detallado.

En consecuencia, el enfoque central de esta revisión recae en el desarrollo de la ingeniería del sistema. A partir del modelado MBSE, se definen en profundidad los entornos operacionales y se desglosa el sistema de la carga útil desde su concepción de alto nivel hasta la consolidación de su Arquitectura Lógica y Arquitectura Física.

Finalmente, el alcance del documento se extiende a las etapas de cierre del ciclo de vida del desarrollo. Se detallan las estrategias de validación y demostración mediante ensayos funcionales y ambientales, acompañadas de una evaluación de riesgos actualizada, la matriz de trazabilidad completa y una estimación preliminar de costos, asegurando la madurez necesaria para transitar hacia la Revisión Crítica de Diseño (CDR).

3. CONTEXTO Y MOTIVACIÓN

Chile presenta una geografía extensa y compleja, caracterizada por la presencia de zonas aisladas, territorios extremos y áreas con limitada infraestructura de comunicaciones terrestres. A ello se suma la alta exposición del país a fenómenos naturales como sismos, eventos meteorológicos severos y otras situaciones de emergencia, lo que refuerza la necesidad de contar con sistemas de comunicación resilientes, redundantes e independientes de la infraestructura terrestre.

La tecnología CubeSat se consolida como una plataforma idónea para misiones de validación tecnológica como la presente. Su bajo costo relativo, rapidez de desarrollo y estandarización permiten ejecutar proyectos experimentales de alto valor, mitigando riesgos y acelerando la curva de aprendizaje nacional en el ámbito espacial.

Este proyecto se enmarca en una colaboración estratégica en la cual **DTS** asume el rol de desarrollador integral de la carga útil, mientras **INVAP** participa como contraparte técnica, aportando experiencia y herencia tecnológica en sistemas de recolección de datos satelitales tipo **DCS/ARGOS**.

4. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA

4.1 Visión de alto nivel

La carga útil consiste en un sistema de comunicaciones **Store & Forward**, basado en un receptor UHF que escucha transmisiones autónomas provenientes de DCP. El sistema es capaz de demodular, validar, temporalizar y almacenar los mensajes recibidos, para posteriormente descargarlos a estaciones terrenas mediante un enlace en Banda S, bajo comando del OBC del satélite.

Este documento y la información contenida en él son propiedad de DTS SpA. Cualquier reproducción, transferencia o uso por terceros está prohibido salvo autorización escrita de DTS SpA. Los receptores de este documento aceptan la responsabilidad de mantener la confidencialidad de su contenido de acuerdo a la clasificación indicada en el encabezamiento.	Página 11 de 43
01501P01PDR001	

 <small>filial de</small> ENAER DTS SpA	INTERNO Proyecto BIFROST	18-febrero-2026
I+D+i	Diseño de Carga Útil Store & Forward	Revisión: 1.0

4.2 Actores del Sistema

- **Plataformas remotas (DCP):** sensores meteorológicos, sismológicos y/o vulcanológicos autónomos.
- **Carga útil Store & Forward:** subsistema de recepción, almacenamiento y gestión de datos.
- **OBC del satélite:** control operativo, temporización y gestión de comandos y enlaces.
- **Estaciones terrenas:** recepción de datos, validación, procesamiento y distribución.

4.3 Entorno operacional

- **Órbita:** Órbita terrestre baja (LEO) de tipo **Sol-Sincrónica (SSO)** a una altitud nominal de **650 km**. La inclinación orbital se estima en **96°**.
- **Vida útil:** 5 años de operación continua.
- **Dinámica de RF:** Variaciones de frecuencia por efecto Doppler significativo debido a la velocidad relativa del satélite (~7.5 km/s).
- **Ambiente radiativo LEO:** Exposición constante a partículas cargadas y rayos cósmicos galácticos, lo que incrementa el riesgo de:
 - **Single Event Effects (SEE):** Como el *Single Event Upset* (SEU) que puede corromper datos en, y el *Single Event Latch-up* (SEL) que puede causar sobrecorrientes.
 - **Total Ionizing Dose (TID):** Degradación acumulativa de los componentes semiconductores que puede limitar la vida operativa de la electrónica.

5. CONCEPTO DE OPERACIÓN



5.1 ¿Qué es el sistema?

El sistema es una carga útil de comunicaciones del tipo **Store & Forward**, integrada en una plataforma **CubeSat 12U**. Su función principal es actuar como un repetidor no instantáneo de mensajes digitales provenientes de estaciones remotas autónomas.

Las capacidades clave del sistema incluyen:

- **Operar** un sistema de recolección de datos en la **banda UHF (~402 MHz)**, compatible con estaciones remotas alineadas al estándar ARGOS.
- **Garantizar** el almacenamiento temporal de mensajes en memoria a bordo, permitiendo recibir información en un punto de la órbita y descargarla posteriormente a estaciones terrenas mediante un enlace en **Banda UHF (~466 MHz)** a través de la antena propia de la carga útil.

Este documento y la información contenida en él son propiedad de DTS SpA. Cualquier reproducción, transferencia o uso por terceros está prohibido salvo autorización escrita de DTS SpA. Los receptores de este documento aceptan la responsabilidad de mantener la confidencialidad de su contenido de acuerdo a la clasificación indicada en el encabezamiento.	Página 12 de 43
01501P01PDR001	

 filial de  DTS SpA	INTERNO Proyecto BIFROST	18-febrero-2026
I+D+i	Diseño de Carga Útil Store & Forward	Revisión: 1.0

- **Integrarse** con los sistemas principales del satélite a través del **bus de datos CAN**, para el intercambio de telemetría, comandos, estado operativo y actualizaciones de software y firmware.

5.2 ¿Por qué se desarrolla?

El desarrollo de esta carga útil responde a necesidades estratégicas y tecnológicas para el país:

- **Proveer** conectividad en zonas remotas y de geografía compleja, donde la infraestructura terrestre es inexistente o poco confiable.
- **Aumentar** la resiliencia nacional mediante un canal de comunicaciones redundante y soberano, relevante para la gestión de emergencias y desastres naturales.
- **Desarrollar** y validar capacidades espaciales nacionales, fortaleciendo el ecosistema tecnológico en línea con los objetivos del CEN.
- **Servir** como plataforma experimental para validar un concepto tecnológico con proyección comercial, particularmente en aplicaciones de monitoreo remoto e IoT satelital.

5.3 ¿Quiénes participan?

5.3.1 Participantes del proyecto:

- **DTS:** responsable del desarrollo integral de la carga útil, desde el diseño conceptual hasta la integración y las pruebas.
- **INVAP:** contraparte técnica, proporcionando asesoría, guía y supervisión basadas en su experiencia en sistemas espaciales.


5.3.2 Usuarios y clientes potenciales:

- Universidades y centros de investigación.
- Centros de monitoreo meteorológico, sismológico y vulcanológico.
- Organismos de gestión de emergencias.
- Empresas privadas interesadas en servicios de IoT satelital.

5.3.3 Entidades relacionadas con el proyecto:

- Estaciones remotas compatibles con el sistema ARGOS (DCP).
- Centro de Control de Misión (MCC).

Este documento y la información contenida en él son propiedad de DTS SpA. Cualquier reproducción, transferencia o uso por terceros está prohibido salvo autorización escrita de DTS SpA. Los receptores de este documento aceptan la responsabilidad de mantener la confidencialidad de su contenido de acuerdo a la clasificación indicada en el encabezamiento.	Página 13 de 43
01501P01PDR001	

 filial de ENAER DTS SpA	INTERNO Proyecto BIFROST	18-febrero-2026
I+D+i	Diseño de Carga Útil Store & Forward	Revisión: 1.0

- Estaciones terrenas de descarga.
- Plataforma satelital y la computadora a bordo (OBC).

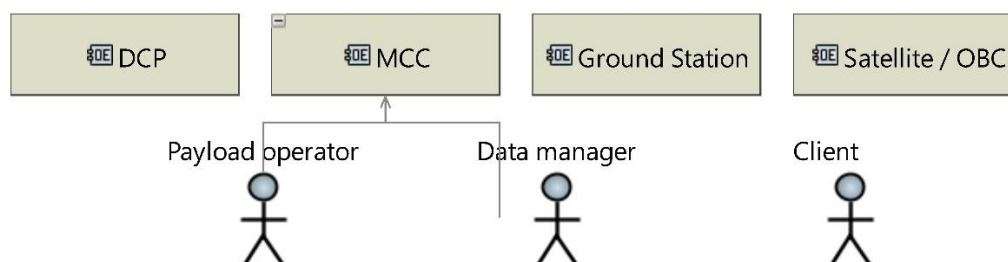


Ilustración 1: Entidades Operacionales

Todos los bloques simbolizan X, las personas simbolizan Y.

5.4 ¿Dónde opera?

El sistema opera en tres segmentos interrelacionados:


- **Segmento espacial:** La carga útil opera a bordo de un CubeSat en órbita terrestre baja (LEO de tipo Sol-Sincrónica o SSO) a una altitud nominal de 650 km y una inclinación de 96°.
- **Segmento terrestre y cobertura:** El servicio está diseñado para cubrir el territorio chileno continental, zonas extremas, territorio insular y antártico, con posibilidad de expansión futura hacia Argentina y otras regiones.
- **Segmento espectral:** El enlace uplink se realiza en la banda UHF (~402 MHz) y el enlace downlink en Banda UHF (~466 MHz), conforme a la normativa internacional vigente. El OBC utiliza la Banda S para transmitir y recibir su telemetría.

5.5 ¿Cuándo opera?

5.5.1 Fases del proyecto

- **Enero-2026:** fase de desarrollo de concepto y tecnología.
- **Febrero-2026:** fase de diseño preliminar.
- **2026–2027:** fase de diseño detallado, integración de componentes y ejecución de pruebas funcionales y ambientales.

Este documento y la información contenida en él son propiedad de DTS SpA. Cualquier reproducción, transferencia o uso por terceros está prohibido salvo autorización escrita de DTS SpA. Los receptores de este documento aceptan la responsabilidad de mantener la confidencialidad de su contenido de acuerdo a la clasificación indicada en el encabezamiento.	Página 14 de 43
01501P01PDR001	

 <small>filial de</small> ENAER DTS SpA	INTERNO Proyecto BIFROST	18-febrero-2026
I+D+i	Diseño de Carga Útil Store & Forward	Revisión: 1.0

5.5.2 Marco de operación en órbita

- **Vida útil:** operación continua durante los 5 años de vida útil del satélite.
- **Ventanas de comunicación:** la órbita LEO permite entre 4 a 5 pasadas diarias sobre el territorio nacional, con ventanas de contacto del orden de 10 minutos por pasada.

5.6 ¿Cómo opera?

1. Las estaciones remotas transmiten mensajes de forma autónoma en **402 MHz**.
2. La carga útil escucha activamente dentro de las ventanas definidas por la misión a través de la antena integrada en la carga útil.
3. Las señales recibidas son compensadas por efecto Doppler, demoduladas y validadas.
4. Los mensajes válidos se temporalizan y almacenan en memoria no volátil a bordo.
5. Durante una pasada con estación terrena y bajo comando del OBC, los datos almacenados se descargan mediante el enlace downlink en **466 MHz** a través de la antena integrada en la carga útil.

6. ESCENARIOS OPERACIONALES

6.1 Operación nominal

En condiciones nominales, la carga útil opera como un sistema de recolección de datos de baja tasa, recibiendo mensajes transmitidos de forma autónoma por plataformas remotas a una **tasa de datos de 400 bps**, con tamaños de mensaje comprendidos entre **32 y 256 bits**. Los mensajes válidos son almacenados en una memoria no volátil a bordo con una capacidad mínima de **16 Gb**, lo que permite el almacenamiento de hasta **1.000.000 de mensajes** sin pérdida.

La descarga de datos se realiza durante ventanas de visibilidad con estaciones terrenas nacionales, con una duración promedio de **8 minutos por pasada**, permitiendo la transferencia de al menos **10.000 mensajes por ventana**, mediante un enlace de downlink en Banda S, bajo comando explícito del OBC.

Este documento y la información contenida en él son propiedad de DTS SpA. Cualquier reproducción, transferencia o uso por terceros está prohibido salvo autorización escrita de DTS SpA. Los receptores de este documento aceptan la responsabilidad de mantener la confidencialidad de su contenido de acuerdo a la clasificación indicada en el encabezamiento.	Página 15 de 43
01501P01PDR001	

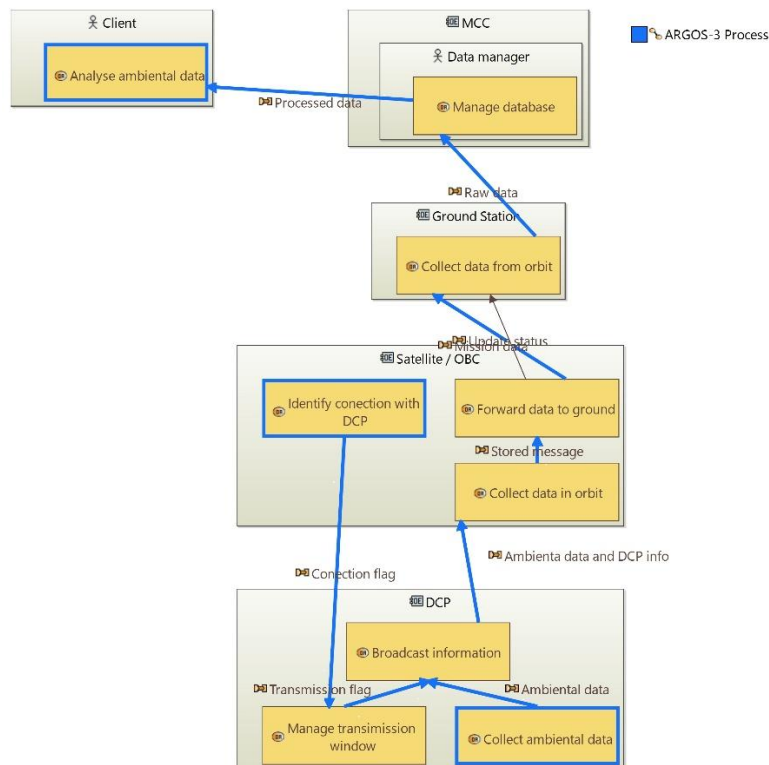



Ilustración 2: Escenario Operacional de recolección de datos para ARGOS-3

6.2 Interrupciones de conectividad

Ante pérdidas temporales de enlace con estaciones terrenas, ya sea por geometría orbital, fallas de estación o restricciones operativas, el sistema mantiene la totalidad de los datos almacenados durante un período mínimo equivalente a **15 órbitas consecutivas**, sin provocar pérdidas ni corrupción de la información. Durante este período, la carga útil continúa operando en modo de recepción UHF conforme a la planificación de misión.

 DTS <small>filial de</small> ENAER DTS SpA	<div>INTERNO</div> <div>18-febrero-2026</div> <div>Proyecto BIFROST</div>	
I+D+i	Diseño de Carga Útil Store & Forward	Revisión: 1.0

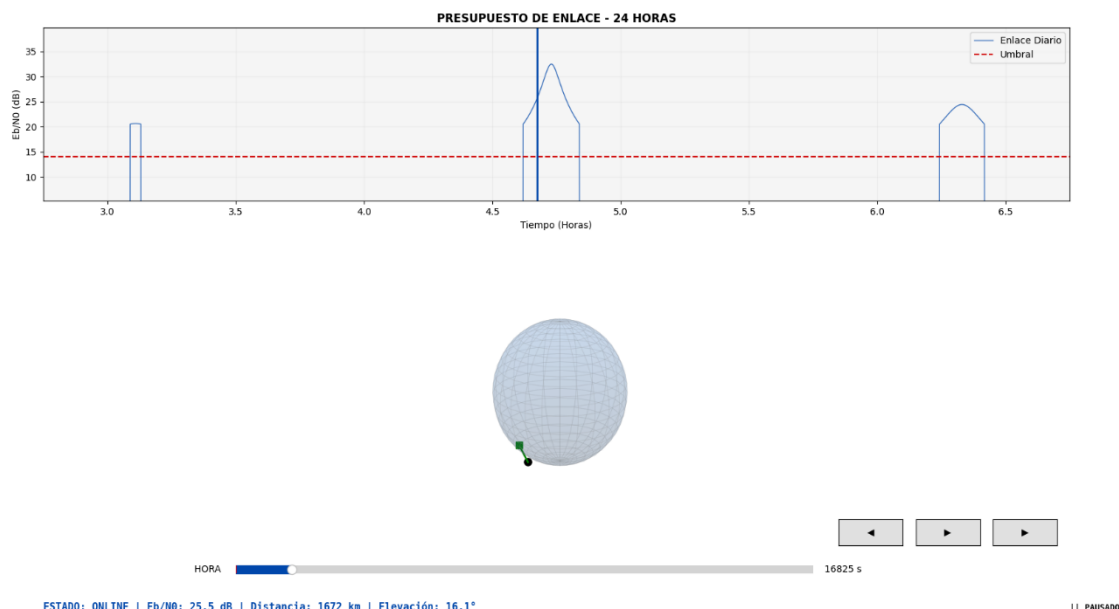



Ilustración 3: Ventanas de conexión Downlink

6.3 Operación bajo efectos de radiación y errores

Dado el entorno de radiación en LEO, se esperan efectos de radiación que pueden afectar o dañar algunos componentes de la carga útil. Frente a la ocurrencia de alguno de estos eventos el sistema debe tener la capacidad de volver a una operación nominal y recuperar cualquier información dañada o perdida. Para ello se implementan medidas de protección a nivel de hardware y software para mitigar *Single Event Upsets* (SEU) y asegurar la integridad de los datos:

1. **Arquitectura de Redundancia:** Se incorpora redundancia de componentes críticos, incluyendo un procesador secundario y bancos de memoria duplicados para el almacenamiento de la trama de datos.
2. **Integridad de Datos:** La información crítica (Store & Forward) se almacenará simultáneamente en múltiples direcciones de memoria física. Se utilizarán algoritmos de comprobación (CRC/EDAC) para detectar y corregir errores de bit antes de la transmisión.
3. **Monitoreo de Salud (Watchdogs):** Se implementan *Watchdog Timers* externos dedicados que reiniciarán el subsistema de comunicaciones en caso de bloqueo del procesador principal (Latch-up o error de software), garantizando la recuperación autónoma del sistema.

Este documento y la información contenida en él son propiedad de DTS SpA. Cualquier reproducción, transferencia o uso por terceros está prohibido salvo autorización escrita de DTS SpA. Los receptores de este documento aceptan la responsabilidad de mantener la confidencialidad de su contenido de acuerdo a la clasificación indicada en el encabezamiento.	Página 17 de 43
01501P01PDR001	

 DTS SpA <small>filial de ENAER</small>	INTERNO Proyecto BIFROST	18-febrero-2026
I+D+i	Diseño de Carga Útil Store & Forward	Revisión: 1.0

6.4 Actualizaciones de software y firmware desde el Centro de Control de Misión

Descripción del proceso de actualización de la carga útil y

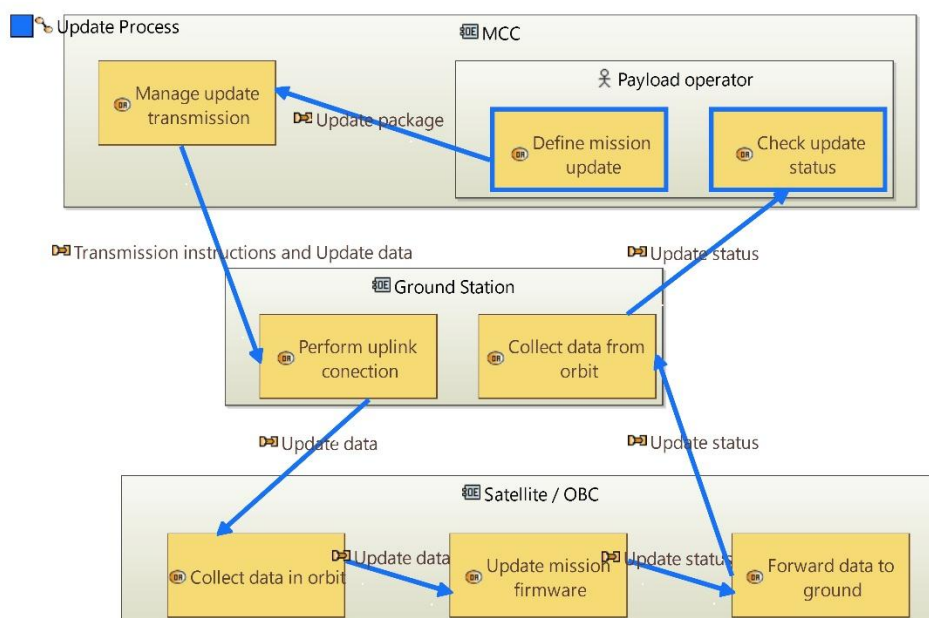


Ilustración 4: Diagrama Operacional de actualizaciones OTA del sistema



7. CAPACIDADES Y RESTRICCIONES OPERACIONALES

Las características del sistema se encuentran condicionadas por las limitaciones propias de la plataforma CubeSat 12U, los estándares de seguridad de lanzamiento y el entorno espacial de órbita baja.

7.1 Restricciones de plataforma y mecánicas

- **Potencia:** Consumo máximo de 10 W en operación nominal, alimentado de forma continua por el sistema de potencia del satélite. El diseño debe contemplar picos de corriente durante la transmisión.
- **Masa:** La masa total de la carga útil es una restricción fija de 3.0 kg (valor máximo).
- **Centro de Gravedad (CoG):** Para garantizar la estabilidad del sistema de control de actitud (ADCS), el CoG de la carga útil debe estar alineado con su centro geométrico con una tolerancia de ± 2 mm en los ejes X, Y y Z.

Este documento y la información contenida en él son propiedad de DTS SpA. Cualquier reproducción, transferencia o uso por terceros está prohibido salvo autorización escrita de DTS SpA. Los receptores de este documento aceptan la responsabilidad de mantener la confidencialidad de su contenido de acuerdo a la clasificación indicada en el encabezamiento.	Página 18 de 43
01501P01PDR001	



 filial de  DTS SpA	INTERNO Proyecto BIFROST	18-febrero-2026
I+D+i	Diseño de Carga Útil Store & Forward	Revisión: 1.0

- **Volumen:** Dimensiones máximas de 20 cm × 20 cm × 10 cm, incluyendo conectores y cableado interno.
- **Interfaces internas:** Comunicación exclusiva con el OBC mediante Bus CAN.
- **Restricciones de Lanzamiento y Separación:** La estructura debe soportar estrés mecánico (vibraciones aleatorias y senoidales) especificado por el proveedor de lanzamiento.

7.2 Restricciones del entorno orbital y materiales

- **Ambiente radiativo LEO:** Los componentes deben garantizar operación bajo una dosis acumulada estimada para 5 años en LEO (~10-20 krad dependiendo del blindaje).
 - Uso de componentes COTS con herencia de vuelo o mitigaciones (redundancia, watchdogs) para eventos de tipo SEE (SEU/SEL).
- **Restricciones de Outgassing:** Para evitar la contaminación de sensores ópticos y paneles solares del satélite, todos los materiales no metálicos deben cumplir con:
 - TML (Total Mass Loss): < 1.0%
 - CVCM (Collected Volatile Condensable Material): < 0.1%
- **Condiciones Térmicas:** La electrónica debe operar de forma segura entre -20 °C y +60 °C.
 - Rango de Supervivencia: Entre -40 °C y +80 °C.
 - El diseño debe considerar la disipación por conducción térmica hacia la estructura principal en vacío.
- **Compatibilidad Electromagnética (EMC) y Protección:**
 - **Grounding:** El chasis de la carga útil debe estar referenciado a la estructura del satélite, así como incorporar una filosofía **Single-Point Ground (SPG)**.
 - **ESD (Electrostatic Discharge):** Implementación de protección contra descargas electrostáticas en todas las interfaces externas y manipulación.
 - **EMI:** Minimizar las emisiones electromagnéticas que puedan interferir con los receptores de GPS o telemetría del bus.

Este documento y la información contenida en él son propiedad de DTS SpA. Cualquier reproducción, transferencia o uso por terceros está prohibido salvo autorización escrita de DTS SpA. Los receptores de este documento aceptan la responsabilidad de mantener la confidencialidad de su contenido de acuerdo a la clasificación indicada en el encabezamiento.	Página 19 de 43
01501P01PDR001	

 filial de  DTS SpA	INTERNO Proyecto BIFROST	18-febrero-2026
I+D+i	Diseño de Carga Útil Store & Forward	Revisión: 1.0

- **EMC:** Ser compatible electromagnéticamente con todo el proceso de lanzamiento y despliegue, así como con la plataforma satelital en órbita y con sus propios componentes internos.
- **Efecto Doppler:** El receptor UHF debe compensar variaciones de frecuencia de hasta ± 10 kHz para asegurar el cierre del enlace con estaciones terrestres dinámicas.
- **Cobertura discontinua:** Obliga a una operación Store & Forward con gestión de memoria robusta para periodos de eclipse y falta de visibilidad.

8. EVUALUACIÓN DE RIESGOS

Dentro del desarrollo del proyecto BIFROST, es importante identificar los principales factores de riesgo, por lo que se ha realizado una evaluación preliminar de riesgos asociada a los requerimientos de usuario y de sistema definidos para la carga útil Store & Forward.

El objetivo de esta evaluación es identificar riesgos técnicos relevantes, estimar su impacto y probabilidad de ocurrencia, y definir medidas de mitigación iniciales acordes al nivel de madurez actual del diseño.

8.1 Metodología

Cada riesgo ha sido evaluado considerando dos parámetros principales:

- **Impacto**, entendido como el efecto potencial sobre el cumplimiento de la misión, el desempeño del sistema o su vida útil.
- **Probabilidad de ocurrencia**, estimada en función de la complejidad técnica, las restricciones de la plataforma y la tecnología disponible.



Ambos parámetros se clasifican en una escala discreta de tres niveles (Bajo, Medio y Alto). El **nivel de riesgo** se determina a partir de la combinación de impacto y probabilidad, permitiendo su clasificación en **Bajo, Medio o Alto**.

8.2 Resultados de la evaluación

Los resultados de la evaluación de riesgos se presentan en las matrices asociadas a los **User Requirements (UR)** y **System Requirements (SR)** incluidas en los anexos del presente documento.

Para los riesgos clasificados como **Medios** y **Altos** se han definido medidas de mitigación preliminares orientadas a reducir la probabilidad de ocurrencia y/o el impacto, mediante decisiones de diseño temprano, incorporación de márgenes y validación progresiva mediante pruebas en tierra.

Este documento y la información contenida en él son propiedad de DTS SpA. Cualquier reproducción, transferencia o uso por terceros está prohibido salvo autorización escrita de DTS SpA. Los receptores de este documento aceptan la responsabilidad de mantener la confidencialidad de su contenido de acuerdo a la clasificación indicada en el encabezamiento.	Página 20 de 43
01501P01PDR001	

 filial de  DTS SpA	INTERNO Proyecto BIFROST	18-febrero-2026
I+D+i	Diseño de Carga Útil Store & Forward	Revisión: 1.0

9. INTERFACES OPERACIONALES

El sistema interactúa con otros elementos del segmento espacial y terrestre a través de interfaces claramente definidas, tanto a nivel físico como funcional.

9.1 Interfaz con la Plataforma (Bus GomSpace 12U)

Para garantizar la integración exitosa, la carga útil debe alinearse con las capacidades del proveedor de la plataforma. Se definen los siguientes puntos críticos de interfaz:

- **Uso del Transponder de Plataforma:** La descarga de datos de la carga útil (Payload Data) se realizará a través del transponder de Banda S provisto por la plataforma GomSpace.
- **Protocolo de Comunicación:** Uso de **CAN Bus** integrado en la plataforma CubeSat 12U de GomSpace.
- **Gestión de Interrupciones:** Definición de líneas de interrupción prioritarias para eventos críticos de la carga útil hacia el OBC.
- **Presupuesto de Potencia:** La carga útil operará bajo las líneas de alimentación estándar del bus (ej. 3.3V, 5V y/o 12V). Se requiere el perfil de consumo detallado para cada estado operativo del payload.
- **Estados Operativos:** Definición clara de estados para la coordinación con la gestión de energía del satélite.

9.2 Sistema de Antenas del Payload

El sistema de comunicaciones requiere un conjunto de antenas optimizado para las bandas UHF (Uplink) y Banda S (Downlink).

- **Banda de Operación:**
 - **Uplink:** 401–403 MHz (Ancho de banda conforme a DCS).
 - **Downlink:** 2200–2290 MHz (Antenas integradas en la plataforma).
- **Cobertura Angular:** Se requiere un patrón de radiación de 88° que garantice visibilidad durante los pasos orbitales sobre Chile.
- **Polarización:** Polarización Circular Derecha (RHCP) o Lineal.

9.3 Interfaz Canal Uplink

- **Tipo de enlace:** Unidireccional (uplink) dedicado a la recolección de datos ambientales.
- **Banda:** UHF, 401–403 MHz.
- **Modulación:** Compatible con sistemas DCS/ARGOS (BPSK / Biphase-L).

Este documento y la información contenida en él son propiedad de DTS SpA. Cualquier reproducción, transferencia o uso por terceros está prohibido salvo autorización escrita de DTS SpA. Los receptores de este documento aceptan la responsabilidad de mantener la confidencialidad de su contenido de acuerdo a la clasificación indicada en el encabezamiento.	Página 21 de 43
01501P01PDR001	

- **Tasa de datos:** 400 bps.
- **Hardware:** Receptor y antenas independientes integrados en el módulo de la carga útil.

9.4 Interfaz Canal Downlink (Uso de Recurso de Bus)

- **Tipo de enlace:** Bidireccional half-duplex, compartido con las funciones de TM/TC del satélite.
- **Función:** Descarga de datos almacenados (*Store & Forward*) y recepción de telecomandos de misión y configuración.
- **Arquitectura:** La carga útil actúa como un cliente de datos que entrega paquetes al subsistema de comunicaciones de la plataforma mediante el bus CAN.
- **Condición de operación:** La descarga se activa bajo lógica del OBC durante ventanas de visibilidad sobre la estación terrestre, cumpliendo con la normativa ITU para servicios de exploración de la tierra por satélite.

10. DESARROLLO DE INGENIERÍA

10.1 Entornos operacionales, capacidades y misión del proyecto

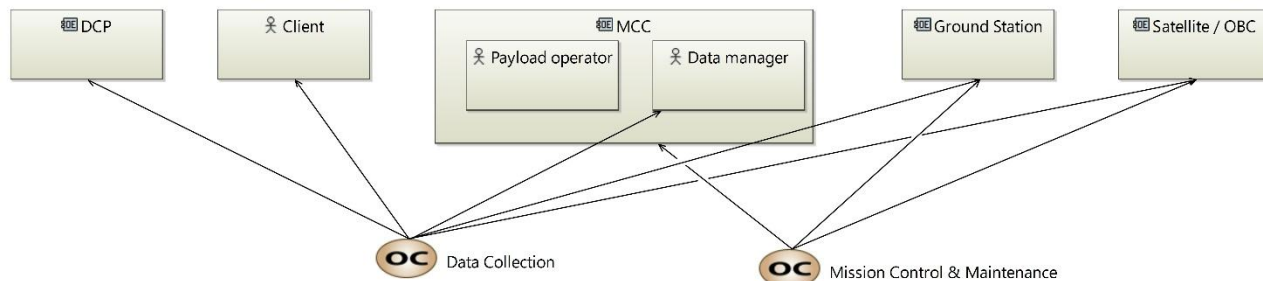


Ilustración 5: Capacidades operacionales y relación con actores

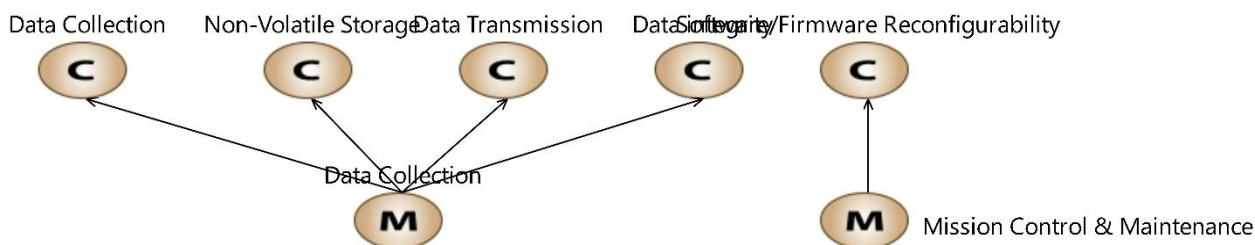


Ilustración 6: Misión del sistema y Capacidades

Este documento y la información contenida en él son propiedad de DTS SpA. Cualquier reproducción, transferencia o uso por terceros está prohibido salvo autorización escrita de DTS SpA. Los receptores de este documento aceptan la responsabilidad de mantener la confidencialidad de su contenido de acuerdo a la clasificación indicada en el encabezamiento.

01501P01PDR001

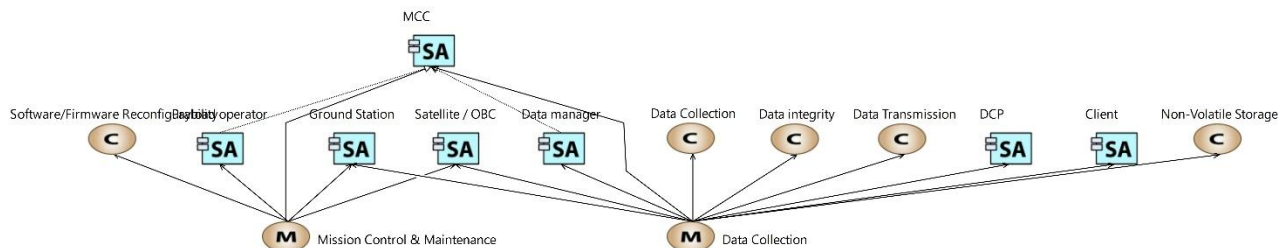


Ilustración 7: Misiones, Capacidades y Actores del sistema

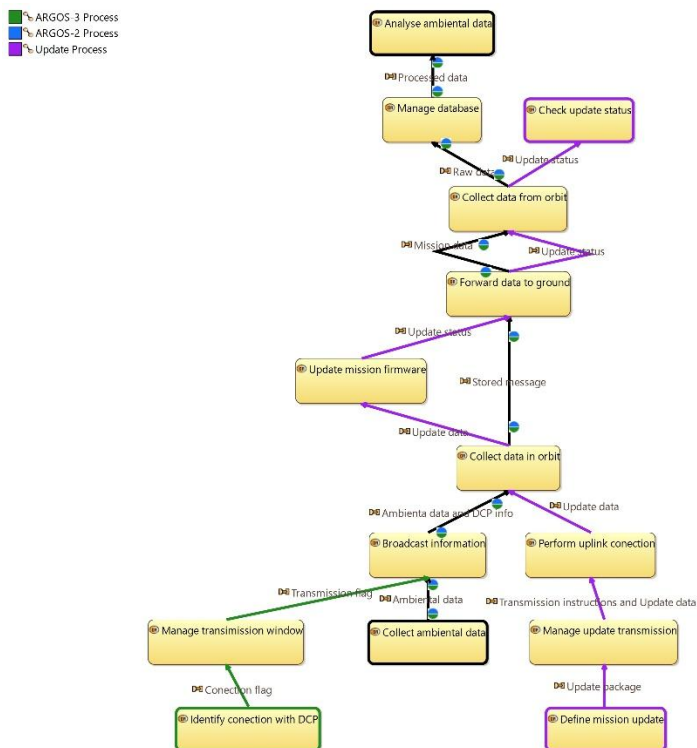


Ilustración 8: Diagrama de escenarios básicos del sistema

10.2 Definición de la carga útil como sistema

Este documento y la información contenida en él son propiedad de DTS SpA. Cualquier reproducción, transferencia o uso por terceros está prohibido salvo autorización escrita de DTS SpA. Los receptores de este documento aceptan la responsabilidad de mantener la confidencialidad de su contenido de acuerdo a la clasificación indicada en el encabezamiento.

01501P01PDR001

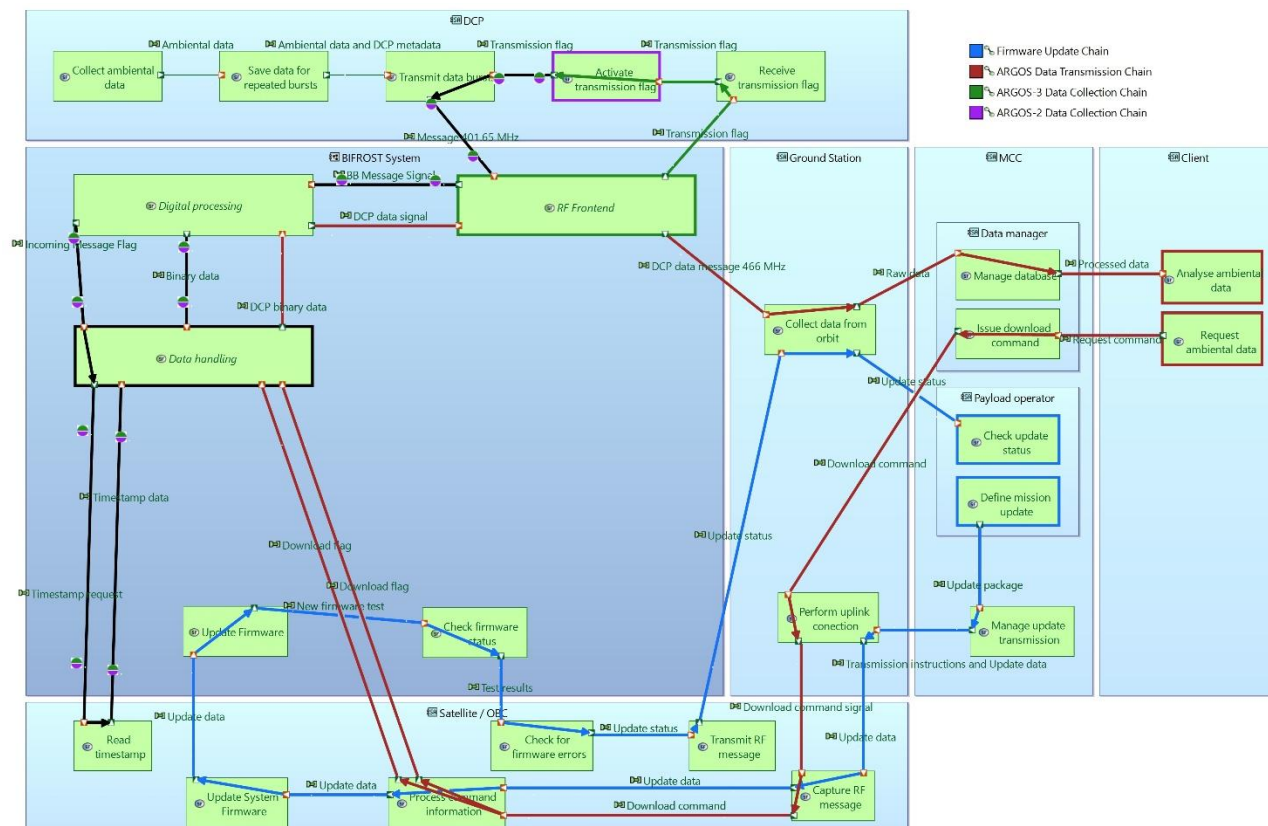


Ilustración 9: Diagrama de alto nivel del funcionamiento del sistema

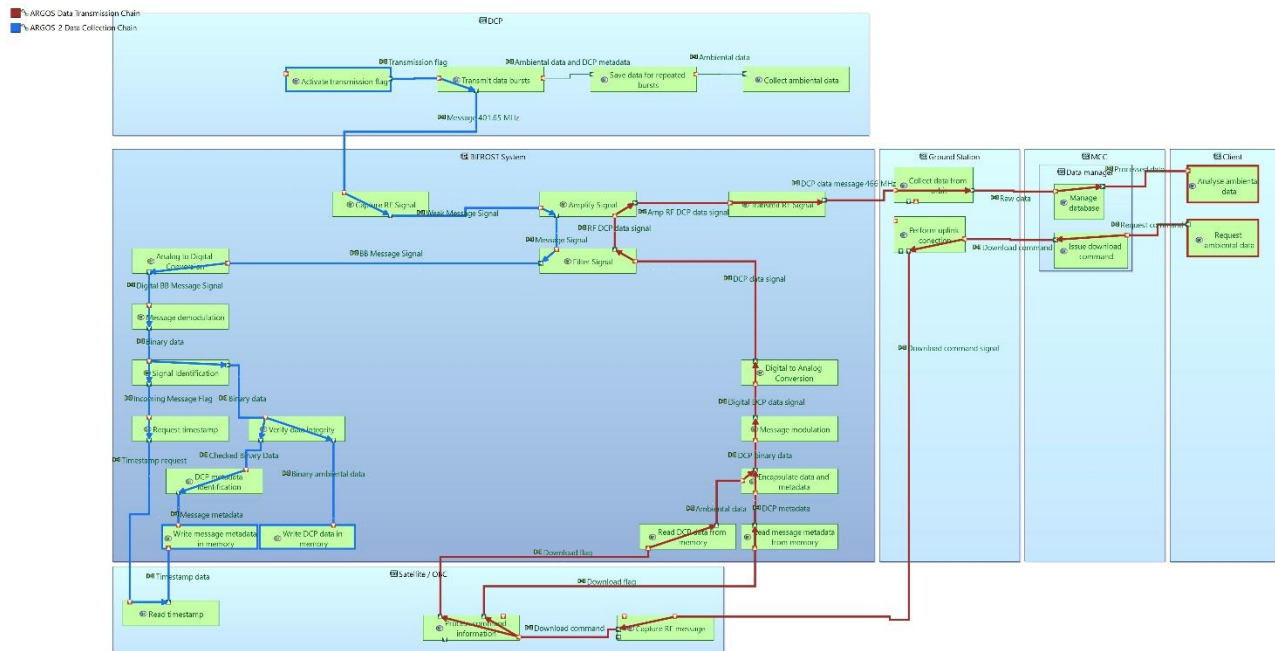


Ilustración 10: Diagrama de nivel medio del funcionamiento del sistema

10.2.1 Desarrollo de la Arquitectura Lógica del sistema

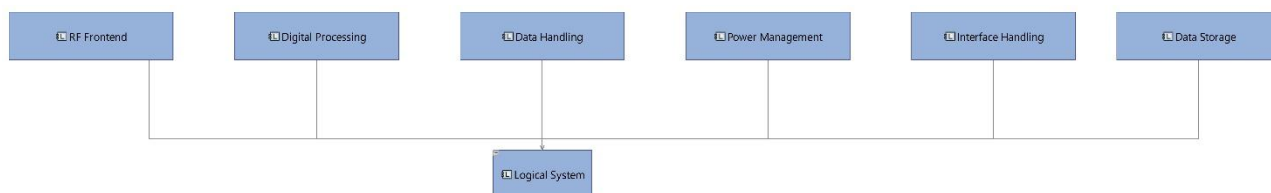


Ilustración 11: Arquitectura Lógica de alto nivel del sistema

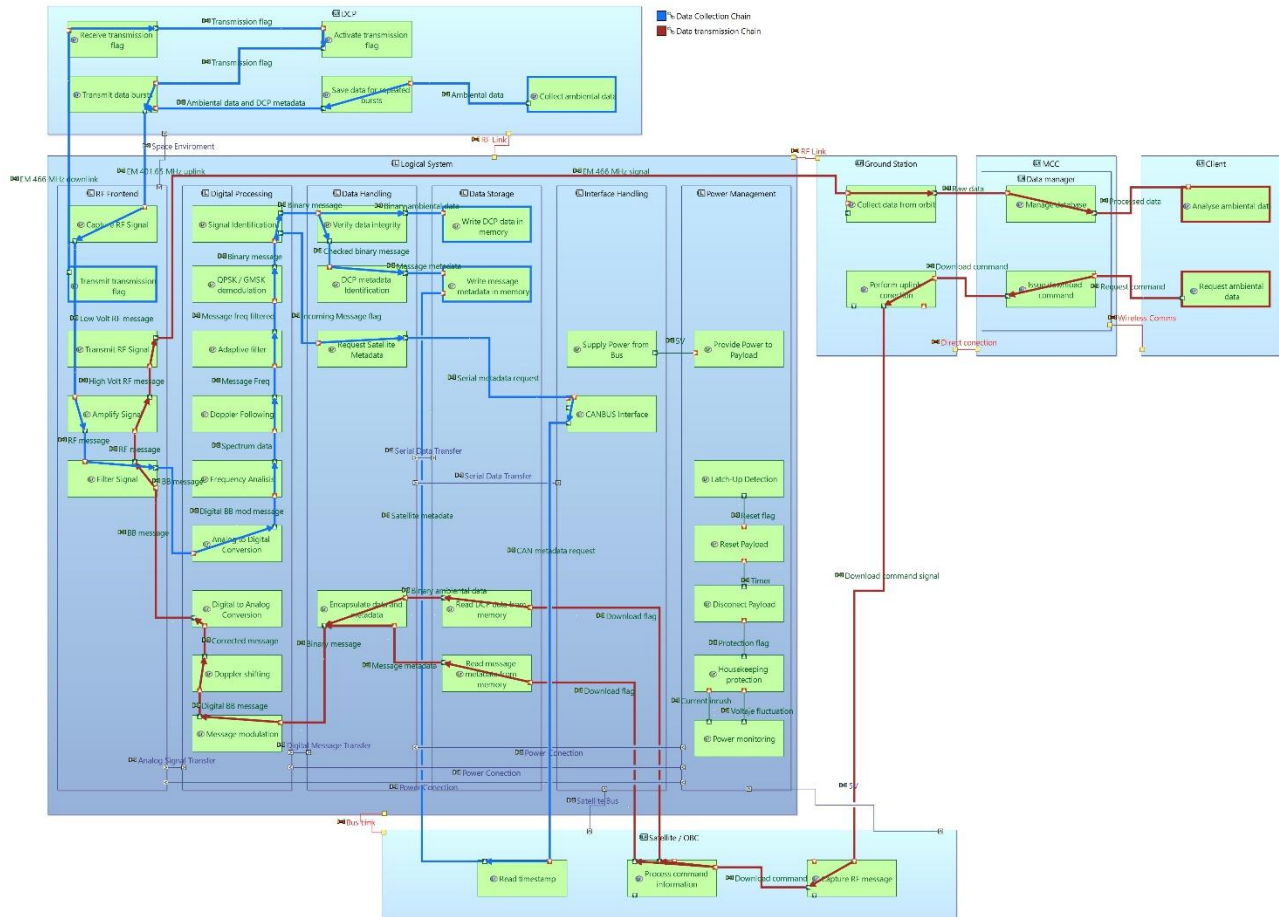


Ilustración 12: Diagrama de bajo nivel de la Arquitectura Lógica del sistema

10.3 Arquitectura Física del sistema

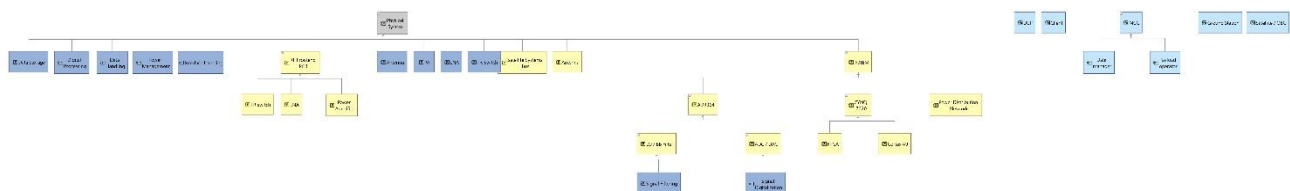


Ilustración 13: Arquitectura Física de alto nivel del sistema

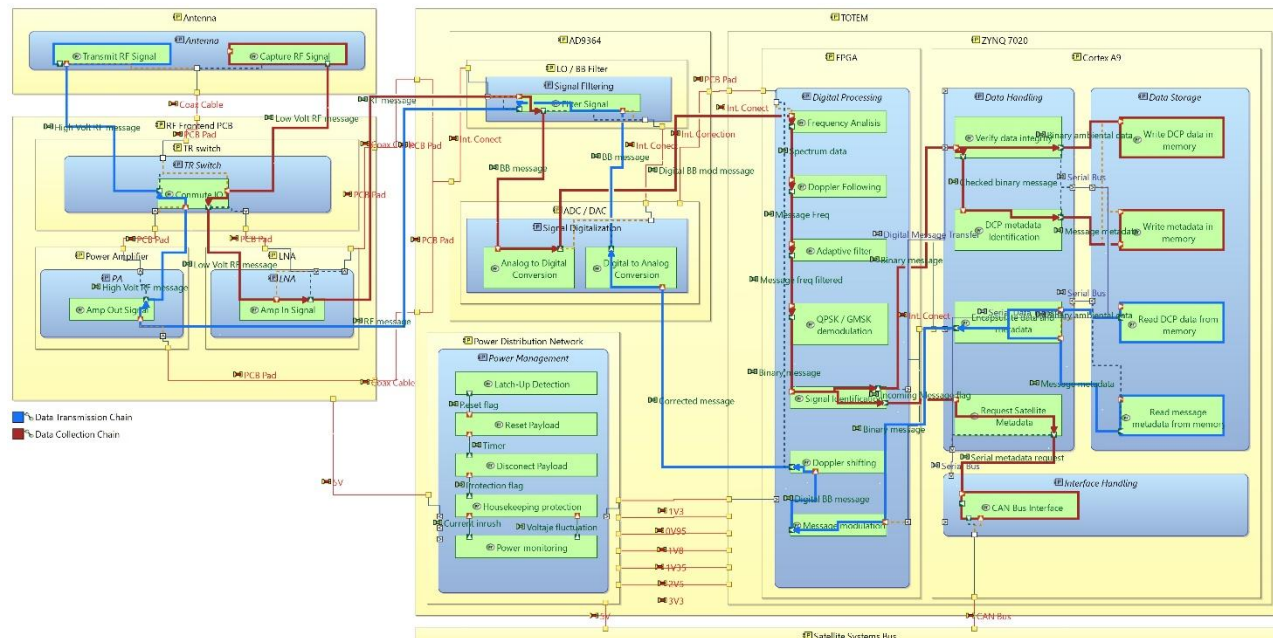


Ilustración 14: Diagrama de bajo nivel de la Arquitectura Física del sistema

10.4 Cálculo de Presupuesto de Enlace y Potencia de Transmisión

10.4.1 Presupuesto de Uplink

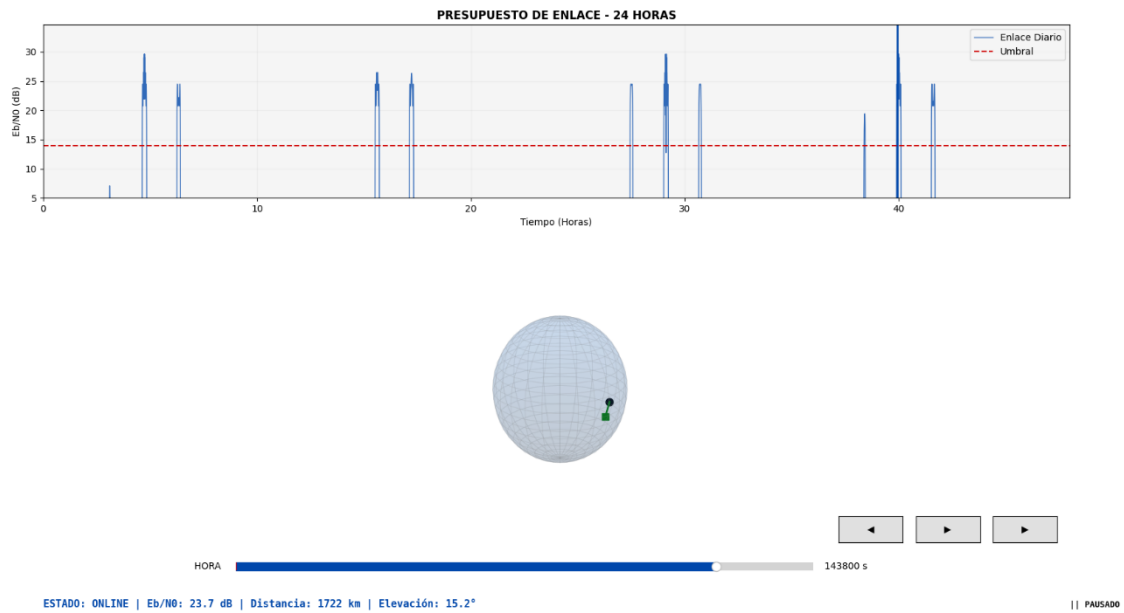


Ilustración 15: Simulación de Presupuesto de enlace Uplink para dos días

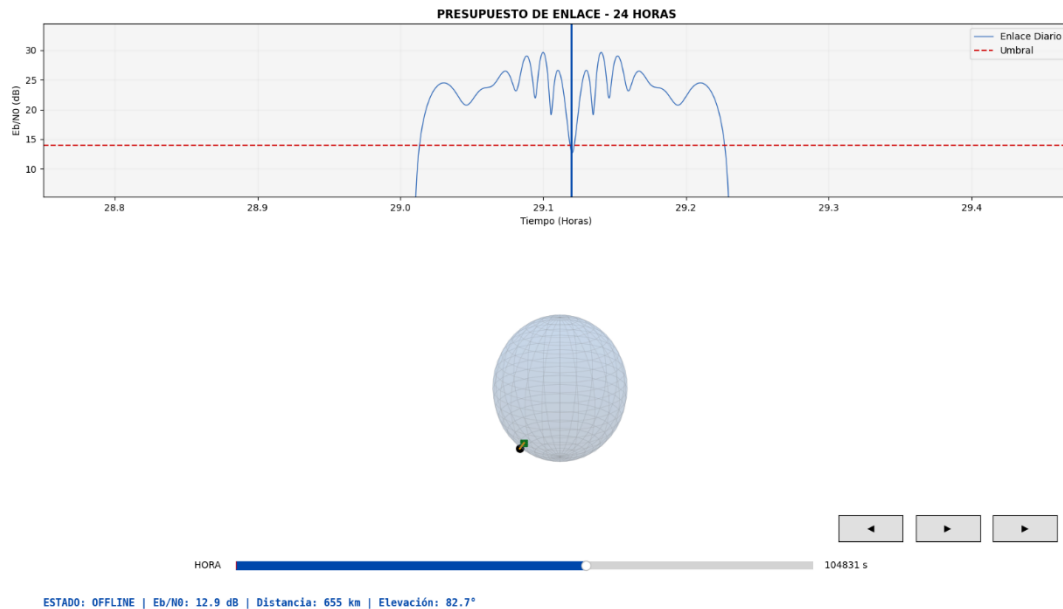



Ilustración 16: Ventana de conexión Uplink

 DTS SpA <small>filial de ENAER</small>	<div>INTERNO</div> <div>18-febrero-2026</div> <div>Proyecto BIFROST</div>	
I+D+i	Diseño de Carga Útil Store & Forward	Revisión: 1.0

10.4.2 Presupuesto de Downlink

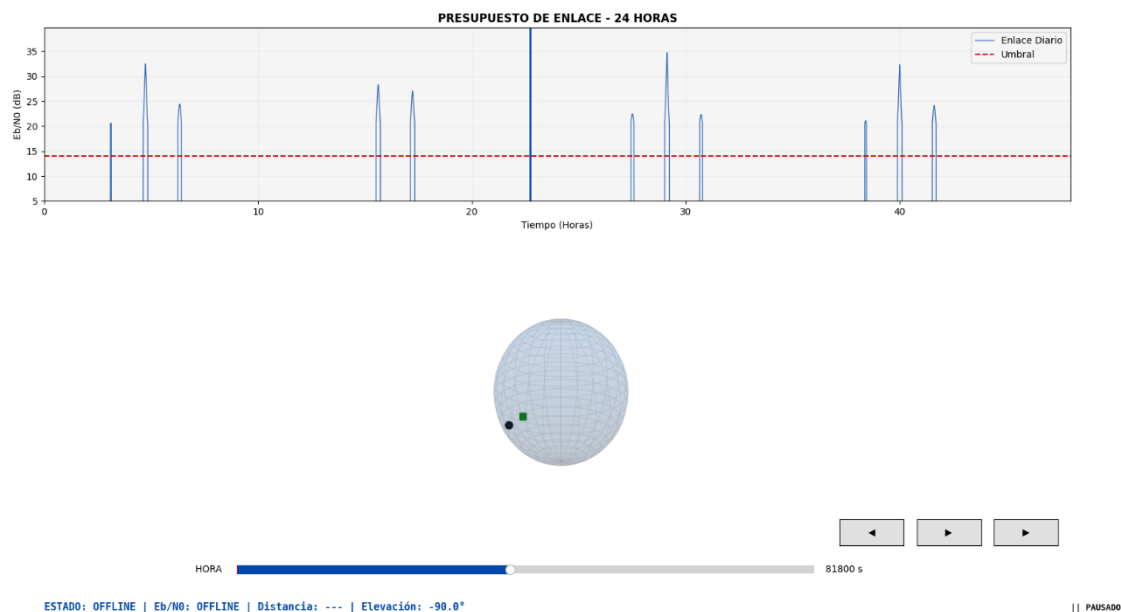


Ilustración 17: Simulación de Presupuesto de enlace Downlink para dos días

11. VALIDACIÓN Y DEMOSTRACIÓN

La estrategia de verificación del proyecto BIFROST sigue un enfoque incremental, validando el cumplimiento de los requerimientos desde el nivel de componente hasta el sistema integrado en el satélite.

11.1 Pruebas en Tierra (Ground Testing)


Las pruebas se llevarán a cabo en las instalaciones del Centro Espacial Nacional (CEN) siguiendo la matriz de verificación definida:

11.1.1 Ensayos Funcionales y Eléctricos

Validación del desempeño nominal y manejo de fallas.

- Caracterización de Potencia:** Verificación del consumo en todos los modos (Sleep < 2W, Peak TX < 10W) y medición de corrientes de arranque (*Inrush*).
- Desempeño RF:** Verificación de sensibilidad (-115 dBm) y selectividad del receptor UHF en 401-403 MHz.

Este documento y la información contenida en él son propiedad de DTS SpA. Cualquier reproducción, transferencia o uso por terceros está prohibido salvo autorización escrita de DTS SpA. Los receptores de este documento aceptan la responsabilidad de mantener la confidencialidad de su contenido de acuerdo a la clasificación indicada en el encabezamiento.	Página 30 de 43
01501P01PDR001	

 <small>filial de</small> ENAER DTS SpA	<p style="text-align: center;">INTERNO</p> <p style="text-align: center;">Proyecto BIFROST</p>	<p style="text-align: right;">18-febrero-2026</p>
I+D+i	Diseño de Carga Útil Store & Forward	Revisión: 1.0

- **Integridad de Datos:** Pruebas de tasa de error de bit (BER) y validación de algoritmos CRC/EDAC tras almacenamiento masivo.
- **Interfaces:** Verificación de la comunicación CAN Bus con el OBC (protocolo CSP) y entrega de datos al transponder Banda S.
- **Seguridad (Failsafe):** Prueba funcional de *Watchdog Timers* externos y recuperación ante inyección de fallos.

11.1.2 Ensayos Ambientales Térmicos

Validación de la operación bajo las condiciones extremas del entorno LEO.

- **Ciclado Térmico:** Ciclos de estrés (-30°C a +70°C) para detectar defectos de fabricación en soldaduras.
- **Vacío Térmico (TVAC):** Ensayo de balance térmico y desgasificación (*Bake-out*) para cumplir con los límites de *Outgassing* (TML < 1.0%).

11.1.3 Ensayos Mecánicos y Dinámicos

Aseguramiento de la integridad estructural durante el lanzamiento.

- **Vibración Aleatoria y Sinusoidal:** Simulación del perfil de lanzamiento (ej. Falcon 9) para verificar la rigidez estructural y supervivencia de la electrónica.
- **Propiedades de Masa:** Medición precisa del peso (< 3.0 kg) y ubicación del Centro de Gravedad (CoG) con tolerancia de ± 2 mm.
- **Mecanismos:** Prueba funcional del despliegue de antenas UHF con mecanismos de liberación redundantes.

11.1.4 Compatibilidad Electromagnética (EMC)

- **Auto-compatibilidad:** Verificación de que la transmisión/recepción no afecta al bus del satélite.
- **Emisiones y Susceptibilidad:** Medición de ruido conducido en líneas de potencia y validación de inmunidad ante el transmisor Banda S de la plataforma.

11.2 Validación en Órbita (IOV)

Una vez completada la fase LEOP (*Launch and Early Orbit Phase*), se ejecutará la demostración operacional (Commissioning) que incluirá:

1. **Verificación de Enlace:** Recepción exitosa de mensajes desde plataformas patrón (DCP) certificadas en tierra.

<p>Este documento y la información contenida en él son propiedad de DTS SpA. Cualquier reproducción, transferencia o uso por terceros está prohibido salvo autorización escrita de DTS SpA. Los receptores de este documento aceptan la responsabilidad de mantener la confidencialidad de su contenido de acuerdo a la clasificación indicada en el encabezamiento.</p>	<p style="text-align: center;">Página 31 de 43</p>
<p style="text-align: center;">01501P01PDR001</p>	

2. **Integridad Store & Forward:** Almacenamiento de datos por al menos 1 órbita completa y descarga posterior sin errores de bit (CRC Check).
3. **Gestión de Datos:** Descarga exitosa a través del transponder de Banda S de la plataforma hacia estaciones terrenas en Chile.
4. **Actualización OTA:** Demostración de la capacidad de actualización de firmware en vuelo mediante subida de parche y reinicio controlado.

12. EVOLUCIÓN Y ESCALABILIDAD

La carga útil Store & Forward se concibe como un sistema **experimental, modular y escalable**, diseñado para validar un concepto operativo mínimo plenamente funcional.

A partir de esta configuración base, el sistema permite una evolución futura orientada a:

- Incrementar el número de plataformas remotas soportadas.
- Ampliar la capacidad de almacenamiento y procesamiento a bordo.
- Adaptar nuevos esquemas de modulación o protocolos de comunicación.
- Extender la cobertura geográfica y el servicio a aplicaciones regionales o comerciales.

Este CONOPS establece así un marco operativo claro, cerrado y no ambiguo, que sirve como referencia para las etapas de diseño, integración, validación y futuras extensiones del sistema.

13. TRAZABILIDAD DEL SISTEMA

Esta sección describe el enfoque de trazabilidad adoptado para asegurar la coherencia entre las necesidades operacionales, los requerimientos del usuario y los requerimientos del sistema, en el contexto de la Revisión de Requerimientos del Sistema (SRR).

El Concepto de Operaciones (CONOPS) constituye la referencia primaria para la identificación de capacidades, restricciones y escenarios operacionales del sistema Store & Forward BIFROST. A partir de este documento se derivan los **Requerimientos de Usuario (UR)** y, posteriormente, los **Requerimientos de Sistema (SR)**.

Tabla 1: Matriz de trazabilidad de requerimientos

	SR-01	SR-02	SR-03	SR-04	SR-05	SR-06	SR-07	SR-08	SR-09	SR-10	SR-11	SR-12	SR-13	SR-14	SR-15	SR-16	SR-17	SR-18	SR-19	SR-20	SR-21	SR-22	SR-23
UR-01				X		X																	
UR-02			X				X																
UR-03		X	X																				
UR-04	X	X	X																				

Este documento y la información contenida en él son propiedad de DTS SpA. Cualquier reproducción, transferencia o uso por terceros está prohibido salvo autorización escrita de DTS SpA. Los receptores de este documento aceptan la responsabilidad de mantener la confidencialidad de su contenido de acuerdo a la clasificación indicada en el encabezamiento.

01501P01PDR001

Página

32 de 43

[illegible]

14. ESTIMACIÓN DE COSTOS

Con el objetivo de apoyar la toma de decisiones durante la etapa de Revisión de Requerimientos del Sistema (SRR), se presenta una estimación de orden de magnitud (Rough Order of Magnitude, ROM) de los costos asociados al desarrollo de la carga útil Store & Forward del proyecto BIFROST. Esta estimación tiene un carácter preliminar y se basa en supuestos de alcance, duración y recursos humanos coherentes con la naturaleza experimental y tecnológica del proyecto.

14.1 Supuestos de estimación


La estimación ROM considera los siguientes supuestos principales para suministrar un modelo de vuelo integrado al bus satélite:

- Contratación de **dos ingenieros** durante un período de **12 meses**.
- Desarrollo, integración y validación de **una carga útil**.
- Uso de componentes y materiales comerciales disponibles en el mercado.
- Ejecución de actividades de integración, ensamblado y pruebas (AIT) en instalaciones nacionales.
- Logística asociada a adquisición, transporte, seguros y soporte operativo.

14.2 Desglose de costos estimados

Tabla 2: Estimación de costos

Ítem	Descripción	Costo estimado (USD)
Recursos humanos	2 ingenieros x 2000 USD/mes x 12 meses	48.000

 DTS SpA <small>filial de ENAER</small>	INTERNO Proyecto BIFROST	18-febrero-2026
I+D+i	Diseño de Carga Útil Store & Forward	Revisión: 1.0

Componentes y materiales	Electrónica, mecánica y materiales	50.000
AIT	Integración, pruebas funcionales y ambientales	15.000
Logística	Transporte, envíos, importaciones y soporte	20.000
Total		133.000

15. ANEXOS

Tabla 3: User Requirements

ID	Versión	Descripción del Requerimiento	Prioridad	Riesgo	Dificultad	Tipo	Estado
UR-01	1.1	El sistema deberá proveer un servicio Store & Forward satelital, almacenando datos durante su orbita para ser descargados en una estación terrestre.	Alta	Alto	Media	Funcional	Propuesto
UR-02	1.2	El sistema deberá soportar un enlace downlink desde el satélite hacia estaciones terrenas en territorio chileno.	Alta	Medio	Baja	Funcional	Propuesto
UR-03	1.2	El sistema deberá soportar un enlace uplink desde estaciones remotas de monitoreo meteorológico, sismológico y/o vulcanológico hacia el satélite para la recolección de datos.	Alta	Medio	Baja	Funcional	Propuesto
UR-04	1.2	El sistema deberá ser compatible con el estándar internacional para recolección de datos ambientales por satélite utilizado por estaciones remotas autónomas de meteorología, sismología, vulcanología, etc.	Alta	Medio	Media	Proceso	Propuesto
UR-05	1.1	El sistema deberá asegurar la integridad de los datos durante su recepción, almacenamiento y transmisión.	Media	Bajo	Baja	Funcional	Propuesto
UR-06	1.2	El sistema deberá ser compatible con plataforma CubeSat 12U en órbita terrestre baja (LEO) sol síncrona a una altitud nominal aproximada de 650 km con una inclinación de 96°.	Alta	Alto	Baja	No funcional	Propuesto

Este documento y la información contenida en él son propiedad de DTS SpA. Cualquier reproducción, transferencia o uso por terceros está prohibido salvo autorización escrita de DTS SpA. Los receptores de este documento aceptan la responsabilidad de mantener la confidencialidad de su contenido de acuerdo a la clasificación indicada en el encabezamiento.	Página 34 de 43
01501P01PDR001	

Proyecto BIFROST

I+D+i

Diseño de Carga Útil Store & Forward

Revisión: 1.0

UR-07	1.1	El sistema deberá cubrir el territorio chileno continental, zonas extremas, territorio insular y territorio antártico.	Media	Bajo	Baja	Funcional	Propuesto
UR-08	1.2	El sistema deberá permitir el uso de componentes COTS siempre que cumplan con: (a) funcionamiento en órbita probada, (b) tolerancia a la radiación verificada, o (c) mitigaciones de diseño que reduzcan el riesgo a un nivel aceptable para la misión.	Alta	Alto	Media	No funcional	Propuesto
UR-09	1.1	El sistema deberá ser de carácter experimental, con proyección a futuras aplicaciones comerciales.	Baja	Bajo	Baja	No funcional	Propuesto
UR-10	1.1	El sistema deberá presentar una arquitectura modular, reutilizable y escalable.	Baja	Bajo	Media	No funcional	Propuesto
UR-11	1.1	El sistema debe garantizar una vida útil operativa mínima de 5 años en el entorno de radiación LEO definido.	Alta	Alto	Media	No funcional	Propuesto
UR-12	1.1	El sistema debe ser validado mediante pruebas funcionales en tierra y demostración en órbita.	Baja	Bajo	Baja	Proceso	Propuesto
UR-13	1.0	El sistema deberá ser compatible con el sistema de separación del lanzador seleccionado EXOpod 12U, cumpliendo con las restricciones geométricas, mecánicas y de seguridad.				No funcional	Propuesto

Tabla 4: System Requirements

ID	Versión	Descripción del Requerimiento	Prioridad	Riesgo	Dificultad	Tipo	Estado
SR-01	1.2	El sistema deberá permitir la recepción de paquetes de datos con un tamaño desde 32 a 256 bits, con una tasa de datos de 400 bps.	Alta	Alto	Media	Funcional	Propuesto
SR-02	1.4	El sistema deberá operar como receptor en el rango de frecuencias 401 - 403 MHz utilizado por estaciones remotas, con una polarización circular derecha y un ancho de haz de 130° HPBW.	Alta	Alto	Media	No funcional	Propuesto

Proyecto BIFROST

I+D+i

Diseño de Carga Útil Store & Forward

Revisión: 1.0

SR-03	1.3	El sistema deberá ser compatible con la estructura de datos enviado por las estaciones remotas , incluyendo modulación, canalización y protocolos, además de las variaciones en frecuencia por efecto Doppler.	Alta	Alto	Media	Funcional	Propuesto
SR-04	1.3	El sistema deberá almacenar al menos 1.000.000 mensajes de durante un tiempo máximo de 15 órbitas y sin pérdidas hasta establecer contacto con una estación terrestre para la descarga.	Media	Medio	Baja	Funcional	Propuesto
SR-05	1.2	El sistema deberá mantener la asociación temporal de los datos almacenados.	Baja	Bajo	Baja	Funcional	Propuesto
SR-06	1.2	El sistema deberá permitir la descarga de al menos 10.000 mensajes almacenados hacia estaciones terrestres cuando exista conectividad disponible.	Media	Medio	Baja	Funcional	Propuesto
SR-07	1.3	El sistema deberá entregar los datos al subsistema de comunicaciones de la plataforma (Transponder Banda S) para el enlace downlink.	Media	Medio	Baja	Proceso	Propuesto
SR-08	1.2	El sistema deberá comunicarse con el OBC del CubeSat 12U mediante el bus definido por la plataforma (CANBUS), gestionando una tasa de transferencia de datos compatible y reportando periódicamente su estado operativo.	Alta	Alto	Media	No funcional	Propuesto
SR-09	1.3	El sistema deberá operar bajo el control del OBC, escuchando activamente en las zonas definidas por la misión y transmitiendo únicamente cuando sea ordenado.	Media	Bajo	Baja	Funcional	Propuesto

Proyecto BIFROST

I+D+i

Diseño de Carga Útil Store & Forward

Revisión: 1.0

SR-10	1.2	El sistema deberá implementar mecanismos de integridad de datos en todas las etapas, con un error de bit menor a 0.01% y control de acceso a la descarga de datos por estaciones terrestres.	Media	Medio	Baja	Interfaz	Propuesto
SR-13	1.2	El sistema deberá consumir un máximo de 10 W en operación nominal y ser alimentado por el sistema de potencia del satélite de forma continua.	Alta	Alto	Media	No funcional	Propuesto
SR-14	1.1	El sistema deberá tener dimensiones máximas 20 cm x 20 cm x 10 cm.	Alta	Alto	Baja	No funcional	Propuesto
SR-15	1.2	El sistema deberá tener una masa máxima de 3.0 kg y mantener su Centro de Gravedad (CoG) a ± 2 mm del centro geométrico, el cual coincide con el eje longitudinal geométrico del satélite.	Alta	Alto	Baja	No funcional	Propuesto
SR-16	1.1	El sistema deberá cumplir con requisitos de EMI/EMC compatibles con operación satelital, evitando interferencias internas y externas durante todo el proceso de lanzamiento, despliegue y operación.	Alta	Alto	Media	No funcional	Propuesto
SR-17	1.2	El sistema deberá diseñarse de forma modular y permitir la actualización de firmware en vuelo (OTA).	Media	Bajo	Baja	No funcional	Propuesto
SR-18	1.2	El sistema deberá certificarse mediante prueba térmico-vacío, mecánicas, EMI y eléctricas en las instalaciones de Centro Espacial Nacional y ser validado en órbita.	Media	Bajo	Media	Proceso	Propuesto
SR-19	1.0	El sistema deberá respetar la envolvente interna permita, los volúmenes prohibidos y las restricciones sobre proyecciones, mecanismos móviles y bordes activos, asegurando la integración con la plataforma.				No funcional	Propuesto

Proyecto BIFROST

I+D+i

Diseño de Carga Útil Store & Forward

Revisión: 1.0

SR-20	1.0	El sistema deberá soportar los ambientes mecánicos de lanzamiento (cargas cuasiestáticas, vibración y shock) definidos por el lanzador y deployer seleccionados.	No funcional	Propuesto
SR-21	1.0	El sistema deberá implementar Watchdog Timers externos e independientes para reinicio ante eventos SEU/Latch-up.	Funcional	Propuesto
SR-22	1.0	Protección electrónica contra Single Event Latch-up (SEL) mediante limitación de corriente activa.	No funcional	Propuesto
SR-23	1.0	Los componentes y materiales no metálicos que utilice el sistema deberán cumplir con un TML < 1.0% y un CVCM < 0.1%	No funcional	Propuesto

Tabla 5: Riesgos de UR

ID	Impacto	Probabilidad (%)	Nivel Impacto	Nivel Probabilidad	Valor Riesgo	Clasificación	Mitigación Propuesta
UR-01	Alto	20	3	2	6	Alto	Diseño de memoria no volátil con margen ≥50%, simulación de carga orbital y pruebas de estrés en tierra
UR-02	Medio	10	2	1	2	Bajo	
UR-03	Medio	15	2	2	4	Medio	Validación temprana con transmisores representativos y pruebas HIL
UR-04	Medio	20	2	2	4	Medio	Revisión de estándar ARGOS y asesoría INVAP

Este documento y la información contenida en él son propiedad de DTS SpA. Cualquier reproducción, transferencia o uso por terceros está prohibido salvo autorización escrita de DTS SpA. Los receptores de este documento aceptan la responsabilidad de mantener la confidencialidad de su contenido de acuerdo a la clasificación indicada en el encabezamiento.

01501P01PDR001

Página
38 de 43

Proyecto BIFROST

I+D+i

Diseño de Carga Útil Store & Forward

Revisión: 1.0

UR-05	Bajo	10	1	1	1	Bajo	
UR-06	Alto	15	3	2	6	Alto	Análisis de interfaces mecánicas/eléctricas y revisión PDR con proveedor de plataforma
UR-07	Bajo	5	1	1	1	Bajo	
UR-08	Alto	25	3	2	6	Alto	Selección COTS con validación espacial y mitigación por redundancia y watchdogs
UR-09	Bajo	10	1	1	1	Bajo	
UR-10	Bajo	10	1	1	1	Bajo	
UR-11	Alto	30	3	2	6	Alto	Pruebas de estrés, análisis térmico y pruebas de vida aceleradas
UR-12	Bajo	10	1	1	1	Bajo	

Tabla 6: Riesgos de SR

ID	Impacto	Probabilidad (%)	Nivel Impacto	Nivel Probabilidad	Valor Riesgo	Clasificación	Mitigación Propuesta
----	---------	------------------	---------------	--------------------	--------------	---------------	----------------------

Este documento y la información contenida en él son propiedad de DTS SpA. Cualquier reproducción, transferencia o uso por terceros está prohibido salvo autorización escrita de DTS SpA. Los receptores de este documento aceptan la responsabilidad de mantener la confidencialidad de su contenido de acuerdo a la clasificación indicada en el encabezamiento.

01501P01PDR001

Proyecto BIFROST

I+D+i

Diseño de Carga Útil Store & Forward

Revisión: 1.0

SR-01	Alto	15	3	2	6	Alto	Prototipo temprano del receptor y pruebas BER en laboratorio
SR-02	Alto	10	3	1	3	Medio	Verificación de front-end RF y filtros certificados
SR-03	Alto	25	3	2	6	Alto	Simulación Doppler y pruebas con generador de señales
SR-04	Medio	20	2	2	4	Medio	Margen de memoria $\geq 50\%$ y control de overflow
SR-05	Bajo	10	1	1	1	Bajo	
SR-06	Medio	15	2	2	4	Medio	Ensayos de descarga en peor escenario
SR-07	Medio	10	2	1	2	Bajo	
SR-08	Alto	25	3	2	6	Alto	

Este documento y la información contenida en él son propiedad de DTS SpA. Cualquier reproducción, transferencia o uso por terceros está prohibido salvo autorización escrita de DTS SpA. Los receptores de este documento aceptan la responsabilidad de mantener la confidencialidad de su contenido de acuerdo a la clasificación indicada en el encabezamiento.

01501P01PDR001

Página
40 de 43

Proyecto BIFROST

I+D+i

Diseño de Carga Útil Store & Forward

Revisión: 1.0

SR-09	Bajo	10	1	1	1	Bajo	
SR-10	Medio	20	2	2	4	Medio	CRC, ACK/NACK y control de acceso
SR-11	Alto	20	3	2	6	Alto	Pruebas de compatibilidad CAN con OBC real
SR-12	Medio	15	2	2	4	Medio	Validación de lógica de estados y temporización
SR-13	Alto	30	3	2	6	Alto	Presupuesto de potencia con margen $\geq 25\%$
SR-14	Alto	15	3	2	6	Alto	Revisión de layout 3D y mockup mecánico
SR-15	Alto	10	3	1	3	Medio	Simulaciones CAD para estimaciones de masas y revisión periódica de masa en el prototipo
SR-16	Alto	20	3	2	6	Alto	Mediciones EMI/EMC y separación RF
SR-17	Bajo	10	1	1	1	Bajo	
SR-18	Bajo	10	1	1	1	Bajo	

Tabla 7: Matriz de ensayos

ID	Versión	Nombre de la prueba	Descripción del Requerimiento
Este documento y la información contenida en él son propiedad de DTS SpA. Cualquier reproducción, transferencia o uso por terceros está prohibido salvo autorización escrita de DTS SpA. Los receptores de este documento aceptan la responsabilidad de mantener la confidencialidad de su contenido de acuerdo a la clasificación indicada en el encabezamiento.			Página 41 de 43
01501P01PDR001			

Proyecto BIFROST

I+D+i

Diseño de Carga Útil Store & Forward

Revisión: 1.0

FUN-01	1.0	Caracterización de Potencia	Medición de consumo de corriente en todos los modos (Sleep, RX, Processing, TX Interface). Verificación de picos de arranque (Inrush Current).
FUN-02	1.0	Sensibilidad y Selectividad RF	Verificación del umbral de recepción (-115 dBm estimado) y ancho de banda en 401-403 MHz usando generador de señales.
FUN-03	1.0	Simulación de Efecto Doppler	Inyección de señales con desplazamiento de frecuencia variable (± 10 kHz) para validar el algoritmo de corrección del receptor.
FUN-04	1.0	Integridad de Datos (BER)	Transmisión de 1 millón de paquetes y verificación de tasa de error de bit (BER) y corrección CRC tras almacenamiento.
FUN-05	1.0	Interfaz CAN Bus & CSP	Validación de intercambio de comandos y telemetría con emulador de OBC (o OBC real). Verificación de manejo de errores de bus.
FUN-06	1.0	Prueba de Watchdog y Failsafe	Inyección de fallos de software y hardware (reset forzado) para medir tiempo de recuperación y estado seguro.
FUN-07	1.0	Actualización de Firmware OTA	Simulación de carga de nueva imagen de software a través del bus de datos y verificación de checksum e instalación.
THR-01	1.0	Ciclado Térmico (Presión Ambiente)	Ciclos de temperatura entre -30°C y +70°C en cámara climática para detectar fallas de soldadura o componentes infantiles (Stress screening).
THR-02	1.0	Vacío Térmico (TVAC) - Bake-out	Exposición a alto vacío ($< 10^{-5}$ Torr) y temperatura elevada (+60°C) para desgasificación (Outgassing) y limpieza.
THR-03	1.0	Balance Térmico en Vacío	Validación del modelo térmico: verificación de temperaturas de operación en vacío (solo conducción) en casos fríos y calientes.
MEC-01	1.0	Propiedades de Masa	Medición precisa de masa total (< 3 kg) y determinación del Centro de Gravedad (CoG) y Momentos de Inercia (MoI).

Este documento y la información contenida en él son propiedad de DTS SpA. Cualquier reproducción, transferencia o uso por terceros está prohibido salvo autorización escrita de DTS SpA. Los receptores de este documento aceptan la responsabilidad de mantener la confidencialidad de su contenido de acuerdo a la clasificación indicada en el encabezamiento.

01501P01PDR001

Página
42 de 43

Proyecto BIFROST

I+D+i

Diseño de Carga Útil Store & Forward

Revisión: 1.0

MEC-02	1.0	Vibración Aleatoria (Random Vib)	Ensayo en shaker electrodinámico según perfiles de lanzamiento (ej. NASA GEVS o perfil Falcon 9). Verificación de integridad estructural.
MEC-03	1.0	Vibración Sinusoidal (Sine Sweep)	Barrido de frecuencias para identificar resonancias naturales (Eigenfrequencies) y asegurar que > 100 Hz (típico CubeSat).
MEC-04	1.0	Ensayo de Choque (Shock)	Simulación de cargas de choque por separación (si aplica por requerimiento de lanzador) o despliegue de antenas.
MEC-05	1.0	Despliegue de Antenas	Verificación funcional del mecanismo de despliegue de antenas UHF (Burn-wire / Resorte) en condiciones de gravedad compensada.
EMC-01	1.0	Emisiones Conducidas (CE)	Medición de ruido inyectado por la carga útil hacia las líneas de potencia del bus (Power Bus Noise).
EMC-02	1.0	Susceptibilidad Radiada (RS)	Verificación de operación nominal ante campos externos (ej. Radares de lanzamiento o transmisor Banda S propio).
EMC-03	1.0	Emisiones Radiadas (RE)	Medición de ruido RF generado por la electrónica digital (relojes, CPU) para asegurar "silencio" en banda GPS y Banda S receptor.
EMC-04	1.0	Auto-Compatibilidad	Verificación de que la transmisión UHF propia no resetea la CPU ni afecta sensores cercanos.

Este documento y la información contenida en él son propiedad de DTS SpA. Cualquier reproducción, transferencia o uso por terceros está prohibido salvo autorización escrita de DTS SpA. Los receptores de este documento aceptan la responsabilidad de mantener la confidencialidad de su contenido de acuerdo a la clasificación indicada en el encabezamiento.

01501P01PDR001

Página
43 de 43