

GOAT-Sat v0.1: Generalized Orbital Add-on Technology (for Microsatellites)

Felipe Gutiérrez^{a,1}, Luis Alejandro Rodríguez^{b,1}, Jacobo Cardeño^a, Maria Alejandra Cardona^c, and Sebastián Cáceres^d

^aUniversidad de Los Andes, ^bAct in Space

Este manuscrito fue compilado el March 24, 2026

1. Introducción

Los microsatélites (aproximadamente 10–200 kg) enfrentan un desafío operacional crítico: la pérdida o degradación de un único sensor o subsistema crítico puede inutilizar una misión completa mucho antes de que la nave agote su presupuesto estructural o de potencia. La práctica actual típicamente abandona el satélite o acepta capacidad de misión reducida. Este enfoque es económicamente ineficiente y contribuye al problema creciente de escombros orbitales.

El servicio en órbita ofrece un camino para extender la vida útil del satélite mediante actualizaciones modulares y restauración de componentes. Sin embargo, la falta de una interfaz estandarizada crea barreras a la interoperabilidad. Cada misión de servicio debe negociar protocolos de integración ad-hoc con fabricantes individuales de naves, aumentando el costo de desarrollo, riesgo de cronograma y complejidad técnica.

A. Motivación. La emergencia de vehículos de aprovisionamiento autónomos y el crecimiento anticipado de infraestructura de servicio en órbita crean una oportunidad convincente para definir un estándar de interfaz común. Tal estándar permitiría:

- Que operadores satelitales contraten servicios con seguridad de compatibilidad
- Que fabricantes de módulos diseñen productos con confianza en acceso al mercado
- Reducir costos de ingeniería por misión mediante definiciones de interfaz reutilizables
- Soportar mejoras de misión incrementales y por etapas en lugar de reemplazo de naves “todo o nada”

Críticamente, el estándar no debe requerir la remoción de módulos defectuosos. En su lugar, los módulos abandonados permanecen pasivos y acoplados mientras nuevos módulos restauran funcionalidad perdida simplificando operaciones y reduciendo el riesgo y complejidad de intervención mecánica en órbita.

B. Alcance y Objetivos. Este documento propone GOAT-Sat v0.1, definiendo:

- Interfaz mecánica: geometría de acople, alineación, retención y acoplamiento térmico
- Interfaz eléctrica: distribución de potencia, secuenciamiento, protección y especificaciones de contacto
- Interfaz lógica/software: descubrimiento, negociación de capacidades, telemetría, control y manejo de fallos

- Perfiles de interoperabilidad para clases de sensores comunes y subsistemas

El estándar está intencionalmente restringido para excluir protocolos detallados de remoción pasiva de módulos y no aborda robótica de servicios o propulsión de nave anfitriona. Estos se dejan al diseño específico de misión mientras la interfaz en sí permanece agnóstica a detalles de implementación.

2. Terminología y Definiciones

Nave Anfitriona (HOST): El satélite base que proporciona infraestructura de bus, potencia eléctrica, recursos computacionales y enlaces de comunicación.

Módulo (MOD): Una unidad autónoma y acoplable que proporciona funcionalidad de carga útil, sensórica o subsistema, diseñada para acoplamiento en órbita a un HOST.

Puerto de Interfaz (PORT): El punto de fijación físico y lógico en el HOST donde un MOD se acopla.

Vehículo de Servicio / Aprovisionamiento (SERV):
Un agente autónomo o teleoperado responsable de transportar y acoplar módulos al HOST.

Restauración Funcional: Recuperación de capacidad crítica para la misión mediante acoplamiento de un nuevo MOD, sin requerir remoción de un módulo acoplado previamente no funcional.

Módulo Abandonado: Un módulo no operativo que permanece acoplado al HOST en estado pasivo, sin consumir potencia significativa ni interfiriendo con nuevos módulos.

3. Modelo Arquitectónico

GOAT-Sat adopta una descomposición arquitectónica de tres capas:

Significance Statement

El estándar habilita restauración funcional mediante integración de módulos aditivos, permitiendo que módulos legados o defectuosos sean abandonados en su lugar sin requerir un protocolo activo de remoción. Este enfoque extiende la vida útil de misiones satelitales, reduce escombros orbitales de naves parcialmente funcionales y establece un contrato de interoperabilidad agnóstico al vendedor para el servicio modular en órbita de microsatélites (10–100 kg).

A. Capa Mecánica (M-Layer). La capa mecánica define:

- Geometría de acople: superficies guía, características de keying para prevenir acoplamiento invertido, zonas de captura
- Retención: mecanismos de enclavamiento pasivos o activos, especificaciones de fuerza mínima, rigidez estructural
- Tolerancias: rango de desalineación aceptable durante operaciones de acoplamiento autónomo
- Interfaz térmica: pads o superficies de contacto térmico opcionales con límites de conductancia especificados

Principio de diseño: *Captura mecánica confiable precede al contacto eléctrico.*

B. Capa Eléctrica (E-Layer). La capa eléctrica especifica:

- Rieles de potencia: voltajes nominales, límites de corriente, controles de pico de corriente
- Secuenciamiento: handshake inicial, compuerta de habilitación de potencia, ordenamiento de enumeración
- Protecciones: sobrecorriente, sobrevoltaje, infravoltaje, polaridad inversa y detección de latch-up
- Aislamiento: MODs inician en estado quiescente y desenergizado pendiente de autorización del HOST

C. Capa de Datos/Control (D-Layer / S-Layer). La capa de datos proporciona:

- Bus físico: CAN-FD, SpaceWire, I²C robusto o Ethernet-TSN (perfiles especifican selección)
- Protocolo de descubrimiento: MOD anuncia un Descriptor de Módulo al enumerar
- Negociación de capacidades: modos soportados, tasas de datos, consumo de potencia, conjunto de comandos
- Telemetría estándar: estado de salud, temperatura, consumo de potencia, estado operacional
- Gestión de firmware: versionado, verificación de compatibilidad, soporte de reversión (si aplica)

Procedimiento de acople

D. Especificaciones mecánicas de la infraestructura de acople. La infraestructura mecánica de acople de GOAT-Sat se concibe como una interfaz modular cooperativa de bajo perfil, inspirada en el enfoque de interfaces integradas de servicio orbital tales como iSSI, donde una única unión física soporta simultáneamente funciones estructurales, geométricas, térmicas y de habilitación para la interconexión eléctrica posterior. En el contexto de GOAT-Sat, la capa mecánica no se limita a “sostener” el módulo, sino que constituye la primera barrera de seguridad del sistema: sólo una vez alcanzado un estado mecánicamente capturado, alineado y bloqueado se considera admisible la progresión hacia el establecimiento eléctrico descrito en la capa E-Layer.

D.1. Objetivo funcional de la interfaz mecánica. La interfaz mecánica deberá permitir el acople repetible en órbita entre un PORT perteneciente al HOST y un MOD transportado por un SERV, bajo condiciones de desalineación inicial moderada y velocidades relativas compatibles con operaciones de proximidad de baja energía. La interfaz deberá cumplir simultáneamente las siguientes funciones:

- capturar el módulo durante el contacto inicial sin requerir inserciones profundas;
- corregir desalineaciones laterales y angulares dentro de una envoltura admisible;
- desarrollar una unión rígida con capacidad de transferencia estructural;
- establecer una referencia geométrica reproducible entre HOST y MOD;
- proveer una superficie de contacto térmico repetible;
- garantizar que los contactos eléctricos sólo entren en régimen operativo cuando la unión mecánica haya alcanzado estado seguro.

D.2. Arquitectura general del puerto. Se propone una arquitectura de acople plana o cuasi-plana, andrógina a nivel funcional, de baja invasión volumétrica y apta para integración repetida (2 a 4 puertos por módulo). Cada puerto se compone de cuatro subsistemas mecánicos principales:

Zona de captura: región externa de primer contacto encargada de admitir error de aproximación y absorber pequeñas incertidumbres geométricas durante el encuentro inicial.

Zona de guiado y alineación: conjunto de superficies inclinadas, chaflanes, conos truncados o rasgos equivalentes que convierten el error relativo en movimiento autocorrectivo hacia la posición nominal.

Zona de enclavamiento estructural: mecanismo de cierre encargado de transformar una captura preliminar en una unión rígida con precarga controlada.

Zona de asiento funcional: superficie final de apoyo donde se define la referencia geométrica del módulo, se estabiliza la interfaz térmica y se habilita la condición de acople mecánicamente válido.

Esta separación funcional permite desacoplar la tolerancia al acople inicial de la exigencia de rigidez estructural final. En consecuencia, la interfaz no depende de una maniobra perfecta para iniciar captura, pero tampoco sacrifica rigidez una vez alcanzada la posición de asiento.

D.3. Principio de operación mecánica. El acople mecánico se divide en tres fases secuenciales:

Fase M1 – Captura inicial Durante el primer contacto, el diseño de borde del puerto deberá favorecer una captura benigna, minimizando impactos localizados y evitando interferencias geométricas que puedan generar rebote excesivo o deslizamiento incontrolado. En esta fase se admite el uso de elementos de asistencia a captura, tales como superficies de embudo, rasgos autocentrantes y, cuando aplique al perfil de misión, asistencia magnética de baja energía destinada exclusivamente a favorecer el alineamiento final.

Fase M2 – Alineación y asentamiento Una vez ocurrida la captura inicial, las superficies de guiado convierten errores radiales, axiales y angulares pequeños en desplazamientos autocorrectivos hacia la posición nominal. La geometría deberá asegurar que la trayectoria de asentamiento no fuerce a los contactos eléctricos a soportar carga estructural, impacto o momentos de alineación. La referencia mecánica final estará definida por superficies de asiento rígidas y repetibles, no por los elementos de contacto eléctrico.

Fase M3 – Bloqueo rígido Al alcanzarse la posición nominal, la interfaz activa un mecanismo de enclavamiento que genera retención positiva y precarga mecánica. El propósito de esta etapa es eliminar juego relativo, aumentar la rigidez de la unión y asegurar una transferencia reproducible de cargas cuasiestáticas, vibracionales y térmicas entre HOST y MOD. Sólo tras la confirmación de este estado la capa eléctrica podrá considerar el puerto como apto para progresar más allá de la mera detección de presencia.

D.4. Mecanismo de enclavamiento. El mecanismo de enclavamiento deberá ser de bajo perfil y compatible con operación orbital repetible. GOAT-Sat privilegia mecanismos compactos embebidos en el perímetro o cara del puerto, evitando soluciones que requieran gran profundidad axial o volumen interno significativo detrás de la interfaz. El cierre podrá implementarse mediante levas, pestillos, ganchos cortos, elementos de cuña o mecanismos equivalentes, siempre que cumplan las siguientes propiedades:

- retención positiva en estado cerrado;
- capacidad de generar o mantener precarga;
- tolerancia a pequeñas desviaciones residuales de alineación;
- baja sensibilidad a rebotes de contacto;
- posibilidad de verificación de estado mecánico (*latched/unlatched*);
- compatibilidad con desacople controlado cuando la misión lo requiera.

La fuerza de retención no deberá recaer sobre contactos eléctricos, pines guía delicados ni elementos frágiles de interfaz térmica. Toda carga primaria deberá transmitirse a través del armazón estructural del puerto y sus superficies de asiento.

D.5. Geometría de referencia y keying. Cada puerto deberá incluir una referencia geométrica inequívoca que impida acoples invertidos, rotaciones no autorizadas o configuraciones ambiguas. Esta función podrá implementarse mediante una combinación de:

- asimetría geométrica controlada;
- distribución no uniforme de rasgos guía;
- topología de tres puntos de referencia;
- claves físicas (*keying*) entre HOST y MOD.

Aunque el estándar persigue compatibilidad amplia entre proveedores, la interfaz no debe ser completamente simétrica si ello compromete la correcta orientación funcional del módulo. En otras palabras, el puerto debe ser interoperable, pero no geoméricamente ambiguo.

D.6. Interfaz térmica asociada. La infraestructura mecánica deberá reservar una zona de contacto térmico repetible entre HOST y MOD, separada de los contactos eléctricos y preferiblemente coincidente con la zona de asiento estructural. Esta interfaz térmica podrá materializarse mediante pads térmicos, superficies metálicas maquinadas o insertos conductivos compatibles con vacío y ciclos térmicos orbitales.

La función de esta región no es únicamente evacuar calor nominal del MOD, sino también estabilizar la impedancia térmica entre módulos intercambiables bajo tolerancias geométricas realistas. Por tanto, el diseño deberá favorecer presión de contacto reproducible y minimizar la dependencia de alineación perfecta para lograr conductancia térmica útil.

D.7. Requisitos estructurales mínimos. La interfaz mecánica deberá satisfacer, como mínimo, los siguientes requisitos:

Captura y tolerancia El puerto deberá admitir acople cooperativo con errores finitos de posición y orientación sin producir interferencia rígida inmediata. El diseño deberá priorizar una captura progresiva y autoalineante frente a una inserción estrictamente de precisión.

Rigidez Una vez bloqueado, el conjunto HOST–MOD deberá comportarse como una unión estructural estable, con juego relativo mínimo y resistencia suficiente para soportar maniobras nominales, vibración de lanzamiento remanente aplicable al módulo instalado y cargas térmicamente inducidas durante operación orbital.

Transferencia de carga Las rutas principales de carga axial, lateral y de momento deberán pasar por el marco estructural del puerto y sus superficies de asiento. Los contactos eléctricos y elementos de detección no deberán formar parte del camino primario de carga.

Bajo volumen intrusivo La geometría del mecanismo deberá minimizar su invasión sobre el volumen útil del módulo. Este requisito es especialmente crítico dado que un mismo MOD puede integrar entre 2 y 4 puertos. Por ello, se prefieren arquitecturas planas, perimetrales o embebidas, evitando mecanismos de acople que requieran actuadores axiales largos o cavidades profundas detrás del plano de interfaz.

Estado verificable La interfaz deberá proveer medios para distinguir al menos tres condiciones mecánicas: desacoplado, capturado/no asegurado y bloqueado/asegurado. Esta información podrá obtenerse mediante interruptores de captura, sensores de posición, lectura de actuador u otros medios equivalentes.

D.8. Relación con la capa eléctrica. La capa mecánica impone la condición de habilitación para la secuencia eléctrica. En particular:

1. la detección de presencia física no implica todavía validez estructural;
2. el contacto inicial puede coexistir con rebote mecánico y no debe habilitar potencia principal;
3. la transición eléctrica hacia estados energizados sólo es admisible cuando la interfaz haya alcanzado al menos una condición de captura estable;

- la habilitación nominal de enlaces de alta velocidad deberá ocurrir únicamente en estado de bloqueo rígido o su equivalente funcionalmente seguro.

De este modo, la FSM eléctrica descrita en la capa E-Layer se interpreta como subordinada a una precondition mecánica: *no existe acople funcional sin acople mecánicamente verificado.*

D.9. Modos de falla mecánica. El estándar reconoce, como mínimo, los siguientes modos de falla mecánica relevantes:

Captura incompleta: el MOD entra en contacto con el puerto pero no alcanza posición de asiento.

Asentamiento falso: existe contacto geométrico parcial que simula presencia sin cierre estructural válido.

Rebote con pérdida de captura: el sistema entra y sale de contacto por energía residual no absorbida.

Enclavamiento incompleto: el mecanismo alcanza una posición intermedia sin garantizar precarga suficiente.

Obstrucción geométrica: partículas, deformación o tolerancias acumuladas impiden el cierre nominal.

Ante cualquiera de estas condiciones, la interfaz deberá degradarse a estado seguro, impedir la habilitación eléctrica completa y permitir reintento controlado o aislamiento del puerto.

D.10. Criterio normativo de diseño. Como criterio general, GOAT-Sat adopta la siguiente regla de jerarquía para el puerto mecánico:

captura tolerante primero, referencia geométrica después, bloqueo rígido al final, y sólo entonces habilitación funcional.

Esta jerarquía permite compatibilizar operaciones de acople orbital cooperativo con una interfaz compacta, modular y repetible, sin exigir precisión irrealista en la aproximación final ni trasladar cargas estructurales a subsistemas eléctricos.

E. Especificaciones eléctricas de la infraestructura de acople.

La infraestructura de acople eléctrico constituye la interfaz crítica entre el módulo funcional (entiéndase goat-core) y la plataforma anfitriona (el módulo). Su diseño debe garantizar una conexión segura, robusta y repetible bajo condiciones de inserción no perfectamente alineadas, así como permitir el establecimiento progresivo de alimentación, comunicación y enlaces de alta velocidad sin comprometer la integridad eléctrica de los sistemas involucrados.

El sistema de acople propuesto está diseñado para soportar conexión en caliente (hot-plug), tolerar rebotes mecánicos durante el acople y asegurar un comportamiento eléctrico determinístico mediante una secuencia controlada de contacto y habilitación de señales.

E.1. Descripción del conector y pines. El conector de acople está concebido como una interfaz de contacto ciego (blind-mate) con geometría autocorrectiva tipo embudo (funnel-guided docking), combinada con contactos eléctricos de tipo tolerante a desalineación (por ejemplo, contactos elásticos o tipo pogo pin sobre superficies planas conductoras).

Desde el punto de vista eléctrico, el conector se organiza en grupos funcionales de pines, definidos de acuerdo con su rol en la secuencia de acople y su criticidad eléctrica:

Grupo 1 – Referencia eléctrica (Make-First)

GND (Tierra de señal) Conjunto de pines dedicados a establecer la referencia eléctrica común entre el módulo y el sistema anfitrión. Estos pines están diseñados para realizar contacto antes que cualquier otro pin, garantizando:

- referencia de potencial estable,
- descarga de cargas electroestáticas,
- retorno de corriente para señales y alimentación posteriores.

Se recomienda la utilización de múltiples pines de tierra distribuidos a lo largo del conector, particularmente adyacentes a pines de potencia y pares diferenciales de alta velocidad.

Grupo 2 – Detección de presencia

PRESENT (Detección de módulo) Señal lógica destinada a indicar la presencia física de un módulo correctamente acoplado. Su implementación eléctrica se basa en una topología de colector abierto (open-drain), donde:

- el sistema anfitrión provee un pull-up interno,
- el módulo fuerza la señal a nivel bajo únicamente cuando se encuentra correctamente referenciado a tierra.

Esta señal sólo se considera válida tras la estabilización de los pines de tierra y debe ser filtrada o debidamente antirreboteada por el sistema anfitrión.

Grupo 3 – Alimentación limitada para inicialización

VCC_IL (Alimentación con corriente limitada)

Línea de alimentación destinada exclusivamente a la energización inicial del módulo, permitiendo:

- arranque de lógica mínima,
- identificación del módulo,
- establecimiento del canal de negociación.

Esta línea está provista por el anfitrión a través de un limitador de corriente activo, diseñado para soportar cortocircuitos, inserciones repetidas y cargas capacitivas sin degradar el sistema.

Grupo 4 – Comunicación de negociación

CAN_H / CAN_L Par diferencial correspondiente al bus CAN, utilizado durante la fase de inicialización para:

- intercambio de identificación,
- negociación de consumo energético,
- autorización de habilitación de potencia principal.

El bus CAN se encuentra eléctricamente activo únicamente durante la etapa alimentada por VCC_IL y debe permanecer en estado seguro ante conexiones parciales o transitorias.

Grupo 5 – Alimentación principal

POWER (Alimentación principal del módulo)

Conjunto de pines dedicados a la entrega de potencia nominal al módulo una vez completada la negociación. Esta alimentación es habilitada exclusivamente por el sistema anfitrión mediante un interruptor controlado (hot-swap / e-fuse), asegurando:

- control de corriente de irrupción,
- protección ante sobrecorriente,
- desconexión rápida ante fallas.

Grupo 6 – Enlace de alta velocidad

SpaceFibre (Pares diferenciales TX/RX) Conjunto de pines destinados a la comunicación de alta velocidad y alta confiabilidad, activados únicamente tras la estabilización completa de las alimentaciones. Estos pines están organizados en pares diferenciales con impedancia controlada y acompañados de pines de retorno de tierra para garantizar integridad de señal y robustez frente a interferencias electromagnéticas.

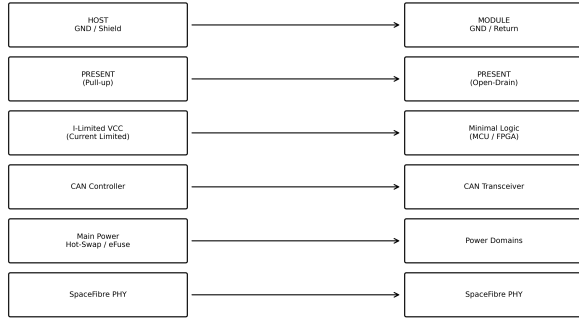


Fig. 1. Diagrama de bloques del acople eléctrico entre el sistema anfitrión y el módulo acopable, mostrando la secuencia de referencia a tierra, detección de presencia, alimentación limitada, negociación por CAN, habilitación de potencia principal y enlace de alta velocidad SpaceFibre.

E.2. Requisitos eléctricos mínimos del conector. La infraestructura de acople deberá cumplir, como mínimo, con los siguientes requisitos eléctricos:

Referencia y retorno El conector deberá disponer de al menos dos pines de tierra con contacto anticipado (make-first).

La resistencia de contacto de los pines de tierra deberá minimizarse mediante contactos paralelos.

Todo pin de señal o potencia deberá contar con un retorno de corriente cercano.

Secuenciación eléctrica El establecimiento de la conexión deberá seguir estrictamente el siguiente orden:

1. Tierra (GND)
2. Detección de presencia (PRESENT)
3. Alimentación limitada (VCC_IL)
4. Comunicación de negociación (CAN)

5. Alimentación principal (POWER)

6. Enlace de alta velocidad (SpaceFibre)

El sistema anfitrión no deberá habilitar la alimentación principal sin una negociación exitosa previa.

Alimentación y protección VCC_IL deberá estar permanentemente protegida contra cortocircuitos y limitar la corriente a un valor seguro definido por el estándar.

La alimentación principal deberá contar con:

- control de corriente de arranque,
- protección ante sobrecorriente y subtensión,
- capacidad de desconexión autónoma ante fallas.

Integridad de señal Los pares diferenciales de SpaceFibre deberán mantener una impedancia característica controlada a lo largo del conector.

Se deberá minimizar la capacitancia parásita introducida por protecciones ESD o geometrías de contacto.

El conector deberá garantizar continuidad del plano de referencia para señales de alta velocidad.

Robustez ante acople imperfecto El conector deberá tolerar rebotes mecánicos y contactos intermitentes sin generar estados eléctricos indeterminados.

Ninguna línea de potencia principal deberá energizarse como resultado de un acople parcial.

El sistema deberá retornar a un estado seguro ante desacoples inesperados.

F. Procedimiento por estados del acople. El procedimiento de acople se define como una máquina de estados finita (FSM) cuyo objetivo es garantizar un establecimiento seguro, determinista y tolerante a acoples imperfectos de la interfaz eléctrica. Esta FSM regula la transición entre etapas de referencia eléctrica, detección de módulo, inicialización con potencia limitada, negociación de recursos, habilitación de potencia principal y activación de enlaces de alta velocidad.

Cada transición está condicionada por señales verificables (guards) y temporizaciones que mitigan rebotes mecánicos, contactos intermitentes y condiciones de fallo. Ante cualquier evento anómalo (pérdida de presencia, sobrecorriente, subtensión o fallo de negociación), el sistema retorna a un estado seguro mediante desconexión controlada de potencia y aislamiento de interfaces.

F.1. Estado S0 – Desacoplado / Seguro. Descripción: No existe módulo acoplado o no es eléctricamente confiable.

Acciones del host:

- Mantener POWER deshabilitado.
- Mantener VCC_IL deshabilitado.
- Mantener SpaceFibre inactivo/aislado.
- Monitorear PRESENT.

Condición de transición a S1: PRESENT detectado en nivel bajo y estable (debounce).

F.2. Estado S1 – Detección de presencia y estabilización. Descripción: El host detecta inserción física preliminar. Se valida estabilidad para evitar falsos positivos por rebote.

Acciones del host:

- Aplicar temporización de validación (*debounce*) a PRESENT.
- Verificar continuidad de GND (cuando aplique instrumentación/diagnóstico).

Condición de transición a S2: PRESENT permanece bajo durante la ventana de validación y no se detecta condición de falla inmediata.

F.3. Estado S2 – Energización limitada (VCC_IL). Descripción: Se habilita alimentación de baja energía y corriente limitada para inicialización mínima del módulo.

Acciones del host:

- Habilitar VCC_IL mediante limitador de corriente.
- Monitorear corriente de VCC_IL y condición de cortocircuito.
- Esperar estabilización del riel (tiempo de arranque).

Acciones del módulo:

- Arrancar lógica mínima (MCU/FPGA en modo seguro).
- Configurar CAN y preparar identificación.

Condición de transición a S3: VCC_IL estable y sin sobrecorriente; PRESENT sigue válido.

F.4. Estado S3 – Inicialización de comunicación (CAN) y descubrimiento. Descripción: Se establece la comunicación de baja velocidad para descubrimiento e identificación del módulo.

Acciones del host:

- Activar stack CAN y enviar solicitud de identificación.
- Verificar versión de protocolo y compatibilidad del módulo.

Acciones del módulo:

- Responder con: ID, tipo, versión, capacidades, perfil de consumo solicitado.

Condición de transición a S4: Intercambio exitoso de identificación y compatibilidad confirmada.

F.5. Estado S4 – Negociación de potencia y autorización. Descripción: Se negocia el presupuesto de potencia y se autoriza (o rechaza) la habilitación del riel principal.

Acciones del host:

- Evaluar disponibilidad energética del sistema.
- Definir límites: corriente máxima, rampas de arranque, prioridades.
- Enviar autorización explícita de potencia.

Acciones del módulo:

- Confirmar aceptación del perfil asignado.
- Mantener cargas no esenciales desactivadas hasta potencia principal.

Condición de transición a S5: Autorización confirmada por ambas partes.

F.6. Estado S5 – Habilitación de potencia principal (POWER). Descripción: Se energiza el módulo con potencia nominal bajo control de arranque y protección.

Acciones del host:

- Habilitar POWER a través de hot-swap/eFuse con control de *inrush*.
- Supervisar sobrecorriente/subtensión/timeout de arranque.

Acciones del módulo:

- Activar regulación interna completa.
- Validar *power-good* interno y secuenciar subsistemas.

Condición de transición a S6: POWER estable, dentro de límites de corriente y voltaje, sin fallas.

F.7. Estado S6 – Activación del enlace de alta velocidad (SpaceFibre). Descripción: Se habilita el enlace permanente de alta velocidad para operación nominal.

Acciones del host y módulo:

- Habilitar/entrenar PHY SpaceFibre.
- Verificar sincronización y estado de enlace.
- Conmutar a operación nominal del módulo.

Condición de transición a S7: Link SpaceFibre en estado operativo y sin errores persistentes.

F.8. Estado S7 – Operación nominal. Descripción: El módulo está completamente acoplado, alimentado y comunicando en modo nominal.

Acciones:

- Monitoreo continuo de PRESENT, POWER (corriente/voltaje) y salud del enlace.
- Telemetría y control de consumo conforme al perfil negociado.

F.9. Estados de falla y recuperación (transversales).

Estado F0 – Falla por pérdida de presencia Evento: PRESENT se desactiva (alto) durante cualquier estado S2–S7.

Acción inmediata:

- Deshabilitar POWER.
- Deshabilitar SpaceFibre.
- Deshabilitar VCC_IL tras ventana segura (si aplica).
- Retornar a S0.

Estado F1 – Falla por sobrecorriente / cortocircuito Evento: Exceso de corriente en VCC_IL o POWER.

Acción inmediata:

- Deshabilitar el riel afectado mediante protección hardware.
- Registrar evento y bloquear reintentos por un tiempo de enfriamiento.
- Retornar a S0 o S1 según política.

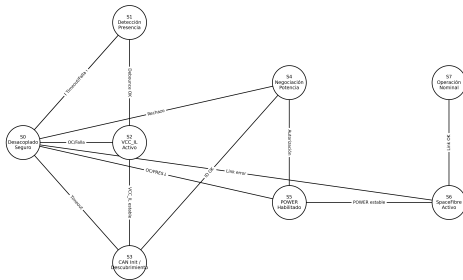
Estado F2 – Falla de negociación / incompatibilidad Evento: Timeouts CAN, versión no compatible, perfil energético no concedible.

Acción:

- Mantener POWER deshabilitado.
- Opcional: mantener VCC_IL por ventana corta para diagnóstico.
- Retornar a S0.

G. Procedimiento por estados del acople. El procedimiento de acople se define como una máquina de estados finita (FSM) cuyo objetivo es garantizar un establecimiento seguro, determinista y tolerante a acoples imperfectos de la interfaz eléctrica. Esta FSM regula la transición entre etapas de referencia eléctrica, detección de módulo, inicialización con potencia limitada, negociación de recursos, habilitación de potencia principal y activación de enlaces de alta velocidad.

Cada transición está condicionada por señales verificables (guards) y temporizaciones que mitigan rebotes mecánicos, contactos intermitentes y condiciones de fallo. Ante cualquier evento anómalo (pérdida de presencia, sobrecorriente, subten-sión o fallo de negociación), el sistema retorna a un estado seguro mediante desconexión controlada de potencia y aislamiento de interfaces.



Acciones del host:

- Evaluar disponibilidad energética del sistema.
- Definir límites: corriente máxima, rampas de arranque, prioridades.
- Enviar autorización explícita de potencia.

Acciones del módulo:

- Confirmar aceptación del perfil asignado.
- Mantener cargas no esenciales desactivadas hasta potencia principal.

Condición de transición a S5: Autorización confirmada por ambas partes.

G.6. Estado S5 – Habilitación de potencia principal (POWER). Descripción: Se energiza el módulo con potencia nominal bajo control de arranque y protección.

Acciones del host:

- Habilitar POWER a través de hot-swap/eFuse con control de *inrush*.
- Supervisar sobrecorriente/subtensión/timeout de arranque.

Acciones del módulo:

- Activar regulación interna completa.
- Validar *power-good* interno y secuenciar subsistemas.

Condición de transición a S6: POWER estable, dentro de límites de corriente y voltaje, sin fallas.

G.7. Estado S6 – Activación del enlace de alta velocidad (SpaceFibre). Descripción: Se habilita el enlace permanente de alta velocidad para operación nominal.

Acciones del host y módulo:

- Habilitar/entrenar PHY SpaceFibre.
- Verificar sincronización y estado de enlace.
- Conmutar a operación nominal del módulo.

Condición de transición a S7: Link SpaceFibre en estado operativo y sin errores persistentes.

G.8. Estado S7 – Operación nominal. Descripción: El módulo está completamente acoplado, alimentado y comunicando en modo nominal.

Acciones:

- Monitoreo continuo de PRESENT, POWER (corriente/voltaje) y salud del enlace.
- Telemetría y control de consumo conforme al perfil negociado.

G.9. Estados de falla y recuperación (transversales).

Estado F0 – Falla por pérdida de presencia Evento: PRESENT se desactiva (alto) durante cualquier estado S2–S7.

Acción inmediata:

- Deshabilitar POWER.
- Deshabilitar SpaceFibre.
- Deshabilitar VCC_IL tras ventana segura (si aplica).
- Retornar a S0.

Estado F1 – Falla por sobrecorriente / cortocircuito Evento: Exceso de corriente en VCC_IL o POWER.

Acción inmediata:

- Deshabilitar el riel afectado mediante protección hardware.
- Registrar evento y bloquear reintentos por un tiempo de enfriamiento.
- Retornar a S0 o S1 según política.

Estado F2 – Falla de negociación / incompatibilidad Evento: Timeouts CAN, versión no compatible, perfil energético no concedible.

Acción:

- Mantener POWER deshabilitado.
- Opcional: mantener VCC_IL por ventana corta para diagnóstico.
- Retornar a S0.

References

References