

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería Electrónica



Taller Integrador

Reporte de Medio Periodo

Equipo Orbital Guidance

Profesor:

Johan Carvajal Godínez

Estudiantes:

Isela Aley De la Hoz - 2016139392

Óscar Arias Cruz - 2016004986

Wilson Bermúdez Campos - 2016101573

Frander Díaz Ureña - 2016157881

Edwing Gómez Ruiz - 2015145406

José María Jiménez Coronado - 2016112170

Anyelo Pacheco Elizondo - 2015145606

Steven Rojas Cubero - 2017100749

Richard Sánchez Miranda - 2015095478

Sebastián Vargas Zúñiga - 2016138236

3 de mayo de 2021

Índice

1. Introducción	4
1.1. Descripción del problema	5
1.2. Estado del arte	6
2. Análisis de los alcances del proyecto	11
2.1. Necesidad	11
2.2. Metas	11
2.3. Objetivos	11
2.4. Supuestos	11
2.5. Restricciones	12
3. Descripción del concepto de operaciones	13
3.1. Modos de operación del satélite	14
3.2. Modos de operación del AOCS	14
3.3. Asociación entre modos de operación del satélite y Clarity	15
4. Vista operacional del sistema	16
4.1. Diagrama de casos de uso	16
4.2. Diagrama de secuencias	16
5. Exploración del espacio de diseño	22
5.1. Árbol de problemas y subproblemas de diseño	22
5.2. Descripción de problemas	22
5.3. Propuestas de solución	24
5.4. Filtros absolutos	29
5.5. Análisis de soluciones	30
5.5.1. Sensórica para orientación	30
5.5.2. Algoritmo de estimación de orientación	30
5.5.3. Algoritmo de control preciso de giro	31
5.5.4. Actuador para control preciso de orientación	31
5.5.5. Sensórica para velocidad de giro	32
5.5.6. Algoritmo de reducción de la velocidad de giro	32
5.5.7. Actuador para control de velocidad de giro	33
5.5.8. Actuador para control de órbita	33
5.5.9. Sensórica para órbita	34
5.5.10. Algoritmo de estimación de órbita	34
5.5.11. Algoritmo de control de órbita	35
5.5.12. GNC - Computer	35
5.5.13. GNC - Software System	36
5.5.14. Comunicación con CDHS	36
5.5.15. Interfaz y procesamiento de potencia	36
5.6. Resumen de la selección de soluciones	37

6. Análisis de requerimientos	39
6.1. Requerimientos del sistema	39
6.2. Requerimientos de software	39
7. Arquitectura del sistema	41
7.1. Vista funcional del sistema	41
7.2. Síntesis de la arquitectura física del sistema	41
7.3. Arquitectura de software	45
8. Estrategia de verificación de requerimientos	48
8.1. ¿Cómo se verifica?	48
8.2. ¿Quién o quienes verifican?	48
8.3. ¿Cuándo se verifica?	49
8.4. ¿Dónde se verifica?	49
9. Estrategia de gestión de riesgos	50
9.1. Metodología PMBoK	52
10. Estrategia de gestión financiera	53
10.1. Obtención de financiamiento	54
10.2. Capital inicial de trabajo	55
10.3. Capital para inicio de operación	56
10.4. Fuentes de ingreso	57
10.5. Estructura de Costos	57
10.6. Inversiones	58
10.7. Análisis Financiero	58
11. Estrategia de gestión social y ambiental	59
11.1. Programa de información y comunicación	59
11.2. Programa de acompañamiento social	60
11.3. Programa de seguimiento y evaluación	60
11.4. Gestión de residuos eléctricos y electrónicos	60
12. Normativa y regulaciones	62
12.1. Requerimientos del Proyecto	62
12.2. Leyes	62
12.2.1. Guía Técnica para la Gestión Integral de los Residuos Electrónicos y Eléctricos.	62
12.3. Diseño de Sistema	63
12.3.1. Selección de Materiales y Procesos	63
12.3.2. Simbología Eléctrica	63
12.3.3. Planos y Diagramas	63
12.3.4. Diseño de Circuitos Impresos	64
12.4. Diseño de Software	64
12.4.1. Lenguaje de Modelado	64

12.4.2. Calidad de Software	64
12.4.3. Evaluación de Software	64
12.4.4. Procesos de Medición	65
12.4.5. Calidad de Datos	65
12.4.6. Diagramas de flujo	66
12.4.7. Ciclo de vida del software	66
13. Conclusiones y recomendaciones para la implementación del diseño	67
13.1. Conclusiones	67
13.2. Recomendaciones	68
14. Anexo A: Tablas de casos de uso y diagrama extendido	69
15. Anexo B: Requerimientos del sistema	74
16. Anexo C: Requerimientos de software	90
17. Anexo D: Matriz de verificación del sistema	108
18. Anexo E: Matriz de verificación del software	111
Referencias	113

1. Introducción

A mediados de la década de los ochentas hubo un cambio en la perspectiva sobre hacia dónde debería ir el desarrollo de tecnología satelital, dejando atrás la tendencia de crear satélites cada vez más potentes y más grandes, pasando a un proceso de reducción de sus dimensiones [1]. Este cambio se ha visto acompañado en las últimas décadas por un cambio en las fuentes de financiamiento para proyectos espaciales, pasando a ser un 80 % de inversión gubernamental (tradicionalmente dirigida por instituciones militares [2]) a un 80 % por parte del sector privado [3] y por un aumento en la cantidad de países de regiones emergentes interesados en realizar esfuerzos en el ámbito espacial [2], involucrando universidades y agencias espaciales nacionales en el camino [4]. Para tener una noción de cómo ha impactado la participación de entes privados en materia espacial en Costa Rica, la PROCOMER [5] expone que en el 2009 las empresas que trabajan en el sector aeroespacial generaron \$170000000 en ventas.

Este cambio en el paradigma del desarrollo e inversión en tecnología espacial ha propiciado un auge en el lanzamiento de satélites pequeños, en especial de aquellos denominados “CubeSat” [1], los cuales consisten en sistemas con dimensiones estandarizadas, lo cual permite la producción en masa de componentes para esta plataforma y la reducción de costos de la misma [6], propiciando así el incursionamiento en misiones espaciales por parte de los nuevos actores antes mencionados. Los subsistemas que se incluyen en estas plataformas dependen de la misión que se vaya a realizar y el ámbito en el que se desarrolla esta, ya sea en comunicaciones, en observación terrestre, monitoreo e incluso demostración tecnológica; pero hay un componente crucial a la hora de ejecutar la misión que se haya diseñado: El subsistema de determinación y control de orientación y órbita (AOCS) [7].

El aumento en la cantidad de misiones, en la diversidad de experimentos y, en general, en el involucramiento de nuevos entes en el ámbito espacial abre el espacio para desarrollar soluciones que faciliten la creación de sistemas complejos. Junto a esto, el avance en el desarrollo de tecnologías para las cargas útiles de los satélites proporcionan mejores capacidades para el desarrollo de las misiones, a un costo mayor en términos de almacenamiento y transmisión de los archivos generados por estos. Se expone en [8] que la tecnología para almacenar datos sin codificación de hasta 10 Terabytes existe, pero la idea de transmitir a la base en Tierra mediante las antenas de radiofrecuencia del satélite implicaría años, pero realizar esta transmisión mediante comunicaciones ópticas (láser, aprovechando sus tasas de transmisión de hasta los gigabit/s) sí sería viable. La identificación de las comunicaciones ópticas como las más adecuadas para la transmisión a estas tasas implica un aumento en el requerimiento de precisión, llegando a niveles de hasta 0.15 grados en el caso de los satélites AeroCube [9], el cual es tomado como un valor de referencia en este proyecto.

Orbital Guidance (O.G) nace de la necesidad de incorporar sistemas precisos de control de orientación y órbita para satélites tipo CubeSat, en miras de desarrollar tecnología que impulse el crecimiento del ámbito espacial en América Latina. El equipo presenta en este documento las bases para proceder con el diseño detallado del producto, el AOCS Avanzado Clarity. Es importante saber hacia dónde se quiere ir con el diseño

del producto, por lo que en este documento se exponen diferentes fases por las que el equipo ha trabajado en sentar las bases para comprender y establecer los alcances, las funciones y la arquitectura del sistema Clarity.

Uno de los ejercicios realizados por el equipo para la contextualización del proyecto con respecto a los involucrados, las capacidades del equipo y los requerimientos de alto nivel fue el Scoping Exercise, en el cual se analizan los alcances del proyecto desde una metodología que permite identificar la necesidad del desarrollo del sistema, sus metas, objetivos, el planteamiento de supuestos a tomar en cuenta y las restricciones bajo las que el equipo trabajará. Seguido a esto, se desarrolló un concepto de operaciones que tomara en cuenta la operación del sistema principal en el que se encontrará integrado, para así visibilizar las necesidades de los operadores de las misiones espaciales, los desarrolladores de software a bordo y los diferentes actores que se involucran con la operación de la misión.

Una vez identificadas las funciones necesarias para cumplir con las necesidades de los clientes y actores, se procede a presentar una descripción detallada de los mismos mediante diagramas de casos de uso y diagramas de secuencias, con el fin de dar una vista comprensiva sobre lo que el sistema hará y cómo los actores interactúan con él. Para el mapeo de funciones a componentes se procedió a la identificación de problemas y subproblemas de diseño, para los cuales se siguió la metodología de toma de decisiones mediante matrices de Pugh para obtener de manera objetiva las soluciones óptimas a estos problemas identificados. Este proceso de selección de soluciones se ve estrechamente relacionado con la sección que le sigue, la cual consiste en el análisis de requerimientos, para los cuales se siguió el estándar ISO/IEC/IEEE 29148:2018 para su planteamiento, así como los diferentes niveles de requerimientos y necesidades planteadas e identificadas para la satisfacción de las necesidades de los clientes.

Una vez expuestos los requerimientos y la selección de los componentes, se plantean las arquitecturas del sistema y del software a implementar, para las cuales se utilizaron diagramas de definición de bloques (BDD) siguiendo el formato establecido para el lenguaje de modelado de sistemas SysML, diagramas N2 Chart y diagramas de bloques para visualizar el mapeo de funciones a componentes. Finalmente se exponen diferentes estrategias para abordar la verificación de requerimientos, la gestión de riesgos, la gestión financiera, la gestión social y ambiental y un listado de normas y regulaciones que atañen al proyecto. Cabe destacar que para efectos de este avance y según las definiciones realizadas en los documentos de requerimientos, se usará el término OBC para hacer referencia al subsistema de manejo de datos y comandos (C&DH), así como el uso del término ADCS para hacer referencia al AOCS Clarity.

1.1. Descripción del problema

Dado el incremento en la sofisticación de los sistemas a bordo de satélites, las cargas útiles y las necesidades de las misiones, se ha incrementado la necesidad de la incorporación de sistemas que permitan el ajuste preciso de la orientación del satélite, su mantenimiento en órbita y la ejecución de eventuales maniobras para el fin de su vida útil.

En los requerimientos de alto nivel recibidos por Orbital Guidance y expuestos por el Project Sponsor se identifican aspectos clave para el diseño, como lo son la potencia nominal, la compatibilidad con el bus Kratos de EXA, restricciones de volumen y la necesidad del control de orientación en los tres ejes. Pasando de las necesidades expuestas por este actor (las cuales se profundizan en la sección de análisis de los alcances del proyecto) a las necesidades de los involucrados y clientes se cuentan con diferentes ámbitos, los cuales se pueden clasificar de dos maneras para efecto de la descripción del problema: Necesidades operativas y necesidades estratégicas.

Sobre las necesidades operativas, se cuenta en primera instancia con los operadores de las misiones espaciales, los cuales consisten de las diferentes universidades, agencias espaciales y laboratorios de desarrollo de tecnología y misiones espaciales, para quienes el AOCS Clarity será una herramienta para el cumplimiento de dichas misiones que será integrada en su satélite gracias al trabajo de los integradores verticales y los desarrolladores de software a bordo, quienes son los encargados de la integración de Clarity con, en este caso, Kratos.

En el ámbito estratégico se cuenta con varios grupos de involucrados identificados, como lo son los entes de financiamiento (a quienes el cumplimiento del proyecto, su venta y rentabilidad les interesa primordialmente), las tiendas de componentes electrónicos y especializados, los entes de regulación y los socios en el ámbito de logística para la exportación del producto. De estos últimos tres grupos de involucrados el principal interés lo presenta el socio de logística, el cual dejó de ser Correos de Costa Rica a DHL dado que el servicio que provee el primero no puede ser utilizado para exportaciones a personería jurídica.

Un involucrado que se ha de incluir con carácter alto de importancia e influencia es UNOOSA, cuyos intereses van por la línea de la conservación del espacio como recurso natural. Dos importantes intereses para este actor son la inclusión de capacidades de desorbitaje o reorbitaje con el fin de mitigar la generación de desechos espaciales, así como la capacidad de desintegración completa una vez el sistema reentra a la atmosfera, si es la estrategia escogida por el operador.

Por tanto, el problema a resolver radica en la necesidad que tienen los satélites para la ejecución de maniobras de control preciso de orientación, mantenimiento de órbita y de fin de vida útil, para satisfacer los requerimientos de las misiones a desarrollar en los ámbitos de la ejecución de maniobras telecomandadas por los operadores y la integración de hardware y software, tomando en cuenta las directrices establecidas para la mitigación de desechos espaciales.

1.2. Estado del arte

Como se indicó anteriormente, las misiones espaciales han aumentado su sofisticación y, con ello, la tasa de transmisión necesaria para ejecutar el *downlink* de los datos obtenidos [8]. La opción adoptada para lograr las tasas de transmisión requeridas es la implementación de comunicaciones ópticas, las cuales requieren de precisiones altas a la hora de establecer el enlace con la estación en Tierra [9]. La manera en la que se logran dichas precisiones es mediante la inclusión de un subsistema de determinación y control

de orientación y órbita (AOCS), cuyas funciones son las de proveer la determinación de la orientación y la órbita del satélite, así como las de controlar dicha órbita y el apuntado del sistema [10]. El desempeño de este subsistema es crucial, debido a que es el que provee de precisión y estabilidad a la hora de apuntar los instrumentos del satélite, siendo estas partes críticas para el cumplimiento de la misión [7].

Para realizar las principales funciones descritas anteriormente, los AOCS presentan una composición general como la presentada en la figura 1, en la cual se ilustran las dependencias de los diferentes subsistemas que lo componen.

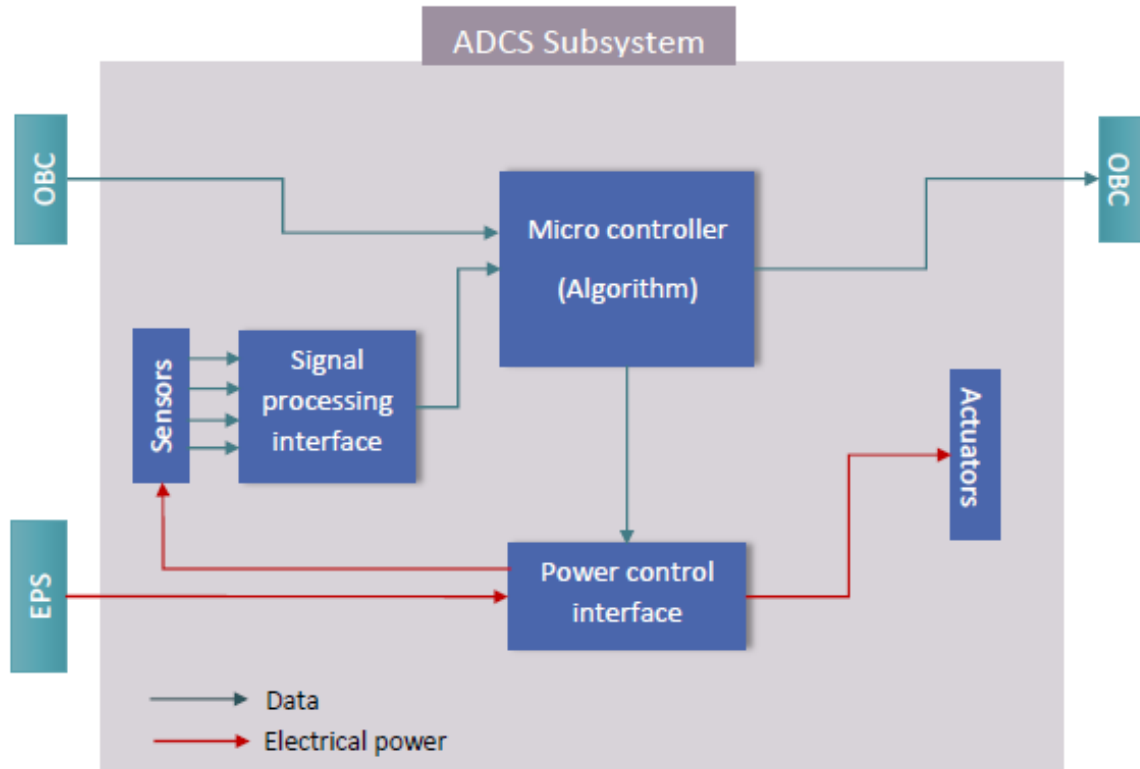


Figura 1: Esquema general de la composición de un ADCS. La diferencia entre el esquema presentado y el de un AOCS radica en la inclusión de actuadores generadores de ΔV .

Obtenido de [11].

Según [11], los AOCS se dividen en cuatro módulos o subsistemas principales:

- **Sensórica:** Se compone del conjunto de sensores que se encargan de obtener mediciones de variables físicas sobre el entorno del satélite.
- **Actuadores:** Los actuadores son los encargados de generar fuerzas y torques para la obtención de los parámetros de orientación y órbita especificados para la misión.
- **Controlador:** Este componente es el encargado de recibir los datos obtenidos por la sensórica y procesarlos de tal manera en que se obtenga información acerca

de los diferentes estados de la dinámica del satélite, asimismo, el controlador le envía señales de control a los actuadores para generar las acciones correctivas para obtener los parámetros de orientación y órbita especificados por los operadores de la misión.

- Interfaces: En un AOCS existen dos interfaces hacia otros subsistemas del satélite, la interfaz de control de energía la cual se encarga de acondicionar la señal de energía que viene del sistema eléctrico de potencia (EPS) y la interfaz con la computadora a bordo, la cual se encarga de enviar telecomandos al controlador y es a quién se le realiza el envío de telemetría.

En [12] se subdivide la arquitectura de los AOCS en cuatro grupos dada la óptica ciber-física del análisis que se empleó en dicho documento. En el dominio lógico se definieron componentes de software, los cuales corresponden a modelos de simulación, firmware embebido, software de sensores y actuadores, sistemas operativos y las librerías necesarias para la ejecución del software en el caso del back-end (cuya función es la de interfazar al AOCS con el entorno físico del satélite), mientras que en el front-end se encuentra la aplicación desarrollada para la determinación y control de la orientación y órbita (para interfazar al AOCS con el OBC mediante el bus de comunicaciones del satélite). En el dominio físico se hace alusión a los modelos dinámicos y cinemáticos para el satélite, así como a los componentes de hardware como sensores, actuadores (back-end) y el controlador y las conexiones con el bus de comunicaciones (front-end). La arquitectura propuesta en [12] se presenta en la figura 2.

Estos sistemas operan bajo diferentes modos de operación, los cuales pueden diferir según sea el diseño del mismo y cuya transición se realiza mediante telecomando o de manera autónoma [13]. Una vista interpretada como de alto nivel se presenta en [14], donde se definen tres modos de operación: Modo seguro, modo nomina y modo de control de órbita. Dentro del modo seguro expuesto en [14] se engloban las acciones de reducción de la velocidad de giro y el apuntado hacia el Sol, pasando por telecomando al modo nominal y, también por telecomando, al modo de control de órbita. En [13] se presenta un desglose más detallado de estos modos de operación, en el que se definen los modos: Stand-by, modo de reducción de giro, modo adquisición de orientación inicial, modo de apuntado preciso, modo de giro, modo de control de órbita y modo seguro. De esto, junto con los modos de operación expuestos en [12], los cuales están en un nivel de abstracción intermedio en cuanto al presente en [14] y [13], se llega a la conclusión de que la arquitectura de los modos es específica y dependiente de las misiones e intereses de los clientes e involucrados del proyecto.

Una de las funciones constantes a lo largo de la operación del AOCS es el envío de telemetría. Según [15], la telemetría consiste de mediciones de propiedades físicas tales como estados de los recursos del satélite, dentro de los que el AOCS proporciona datos sobre la orientación, modos de operación, órbita, lectura de los sensores, modo actual de operación y ocurrencias o anomalías detectadas.

Para obtener los niveles de precisión expuestos en [8] para así asegurar la correcta transmisión de datos, se tiene que trabajar con problemas a la hora de realizar la miniaturización de los sistemas, tal como se expone en [16]. Según [17], sistemas de

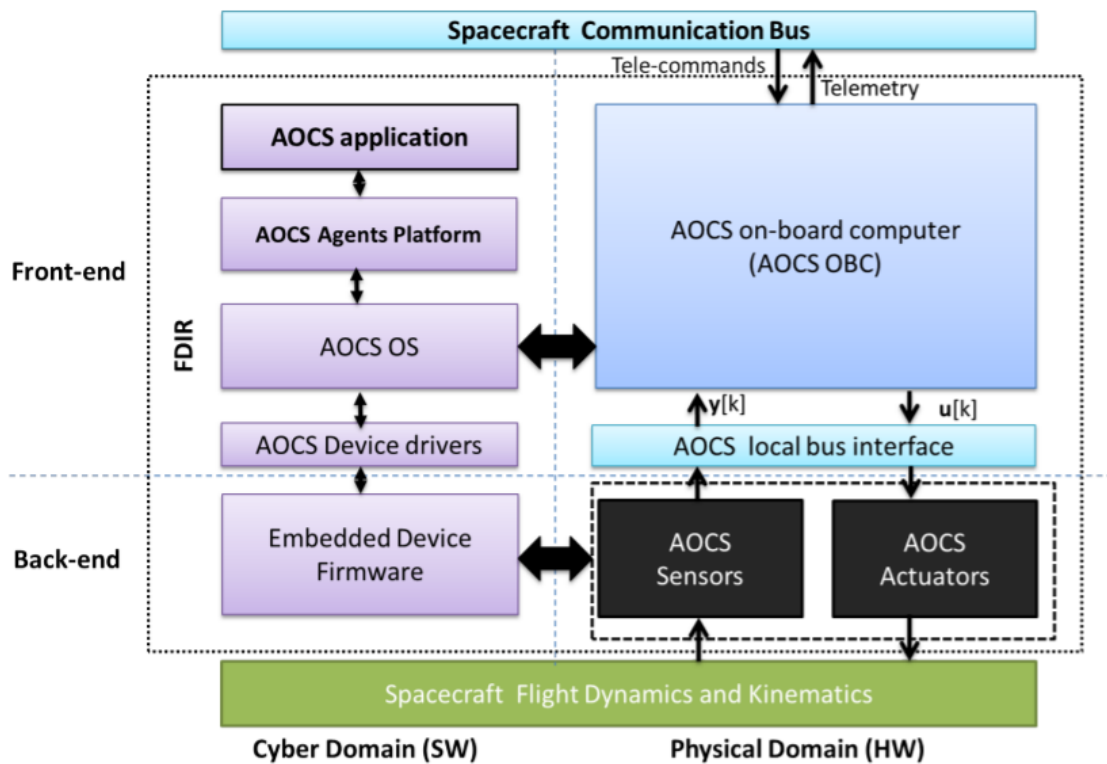


Figura 2: Arquitectura propuesta de un AOCS.
Obtenido de [12].

control de orientación en los tres ejes han sido implementados desde hace décadas, pero ha sido desde hace pocos años que se ha logrado integrar en micro y nano satélites.

El sistema Clarity será integrable en nano satélites tipo CubeSat, cuyas dimensiones se especifican mediante la unidad de medida 1U, que corresponde a un cubo de $10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 10\text{cm}$ con una masa de 1.33 kg [6]. Para estos sistemas es importante destacar que, por la naturaleza de su transporte (que requiere del uso de un vehículo potente transportando varias cargas útiles) y por la naturaleza del despliegue (realizado mediante lanzadores desde la Estación Espacial Internacional o mediante el mismo vehículo de transporte) se especifica en [18] que no deben utilizarse elementos pirotécnicos en ninguno de los sub sistemas del satélite.

Para la mitigación de generación de desechos espaciales se especifica en las especificaciones de diseño de CubeSats [18] que se deben seguir los procedimientos establecidos por NASA en [19], pero a un nivel global se deben seguir los lineamientos establecidos por UNOOSA. Según las directrices establecidas por este ente [20] para la reducción de desechos espaciales, se debe limitar la presencia de naves espaciales en la órbita baja terrestre (LEO, la cual, según [21], es la principal órbita utilizada en misiones espaciales actualmente debido a los requerimientos energéticos para alcanzarla), por lo que las

misiones diseñadas por las distintas universidades, compañías y centros de desarrollo e investigación (como operadores de la misión) deben contar con capacidad para retirar los objetos que pongan en órbita y así cumplir con los diferentes requerimientos impuestos por agencias espaciales y entes de legislación.

2. Análisis de los alcances del proyecto

Los alcances del proyecto se plantearon mediante la realización del Scoping Exercise, con el cual se exponen la necesidad existente que justifica la ejecución del proyecto, las metas del proyecto, sus objetivos, supuestos y restricciones bajo los que se trabajará. El análisis realizado para el correcto ejercicio del Scoping Exercise se fundamenta en los requerimientos de alto nivel del proyecto, planteados por el Project Sponsor y por los intereses de los posibles clientes e interesados, dentro de los que se encuentran operadores de misión, desarrolladores de software a bordo, la misma EXA y actores que se desempeñan como integradores verticales de satélites. Es importante destacar que, al pensar a Orbital Guidance como una empresa, los intereses comerciales de este equipo se deben ver reflejados en los objetivos y metas desde la percepción del ámbito espacial como un nicho emergente y de gran valor económico, tal como se expuso en el reporte base.

2.1. Necesidad

Se necesita adicionar la capacidad de control preciso de orientación y órbita a los satélites implementados con el bus Kratos de EXA para la ejecución de misiones que requieran de alta precisión.

2.2. Metas

Desarrollar una arquitectura de hardware y software para AOCS que permita realizar control preciso de la orientación y órbita de satélites basados en la plataforma Kratos.

2.3. Objetivos

- Establecer arquitecturas funcionales a nivel de sistema y de software que permitan el control preciso de orientación y órbita según el modo de operación especificado por el operador de la misión.
- Diseñar la arquitectura física del sistema de tal manera que permita a los integradores verticales su implementación en satélites basados en Kratos.
- Diseñar la arquitectura del software de tal manera que provea a los desarrolladores de software a bordo de satélites, las herramientas necesarias para implementar las funciones de control de orientación y órbita mediante el AOCS diseñado.
- Especificar una estrategia de negocios que permita la venta del sistema por 30000 dólares americanos.

2.4. Supuestos

El desarrollo del proyecto se basa en las asunción de que al integrar los conocimientos técnicos de los integrantes del equipo, los aportes de los involucrados y la implementación del sistema mediante las opciones disponibles comercialmente se logrará desarrollar

un sistema que cumpla con los requerimientos de alto nivel planteados por el Project Sponsor.

2.5. Restricciones

- Se debe organizar el diseño e implementación del AOCS en el plazo de un año.
- El sistema debe conectarse mediante protocolo USB y ser compatible con el bus Kratos de EXA.
- El producto final debe costar 30000 dólares americanos.
- El volumen del sistema no debe exceder 1U de CubeSat.
- El consumo de energía nominal no debe superar el valor de 1 W.

3. Descripción del concepto de operaciones

Para ilustrar el ciclo de vida en el ámbito de operación del proyecto Clarity se presenta en la figura 3 el diagrama de concepto de operaciones para este sistema. En este diagrama se cuenta con dos ópticas o niveles de abstracción para la descripción del funcionamiento del AOCS Clarity, con el fin de asociar los modos de operación con los que los operadores de la misión gestionarán el satélite y los modos de operación con los cuales se desempeñará Clarity. Además, un nivel más alto de abstracción está compuesto por las etapas de la misión espacial, para ilustrar los acontecimientos que le competen administrar a las agencias espaciales y a los entes de regulación, como lo es UNOOSA con respecto a la gestión de desechos espaciales.

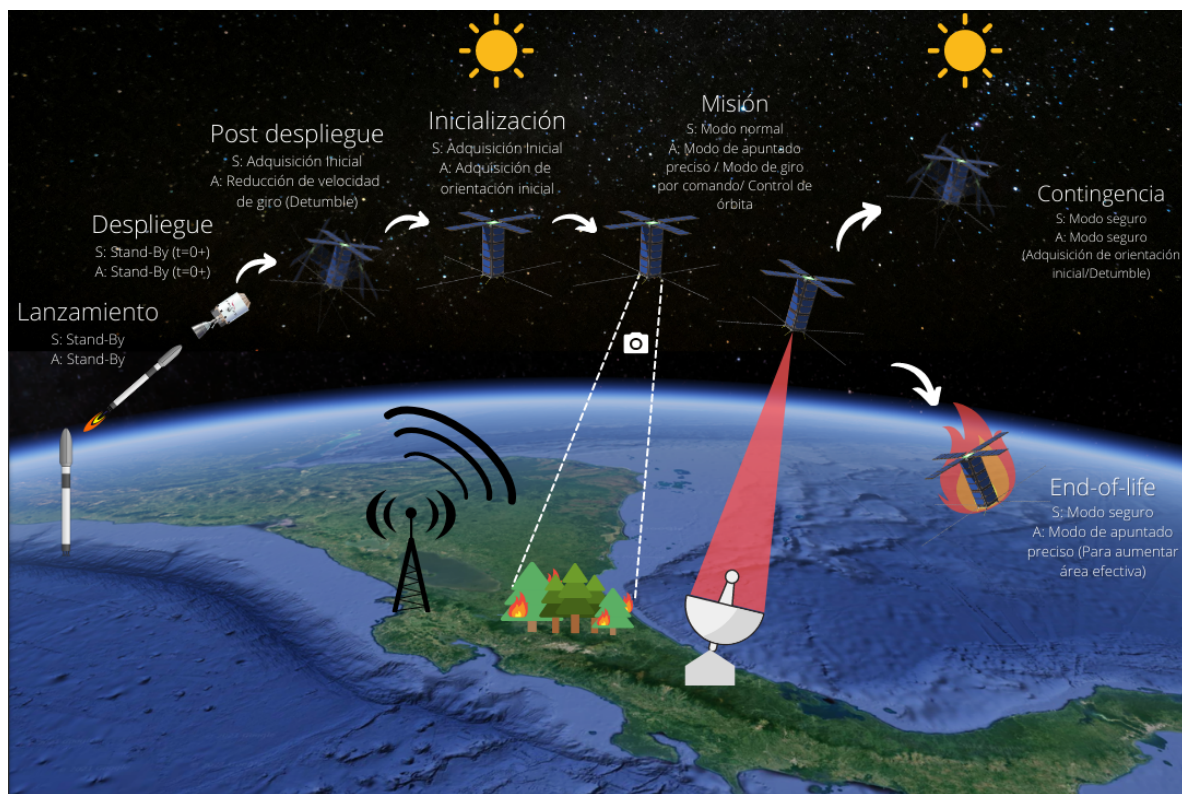


Figura 3: Concepto de operaciones del proyecto Clarity.

La descripción detallada de los modos de operación se encuentra en la sección de anexos, sin embargo, se presenta a continuación una explicación de los mismos a manera de referencia, basada en la información disponible en [13].

3.1. Modos de operación del satélite

- Modo Stand-By: El satélite permanece inactivo, generando únicamente telemetría esencial y escuchando comandos entrantes sin tomar acción para el control del satélite.
- Modo de adquisición inicial: Modo al que se entra posterior al despliegue del satélite. El sistema busca obtener la posición y orientación nominal.
- Modo normal: El satélite funciona de manera en la que se realizan las tareas para las que fue diseñado. La mayoría del período de la misión se ejecutará en este modo.
- Modo seguro: Se entra en este modo al detectar alguna anomalía. El objetivo de este modo es mantener al satélite en un estado seguro donde no se llegue a daños permanentes a sus instrumentos, manteniendo aún el enlace con la estación en Tierra.

3.2. Modos de operación del AOCS

- Stand-By: En este modo sólo se realiza envío de telemetría.
- Reducción de velocidad de giro: Modo cuyo objetivo es la reducción de la velocidad angular del satélite a un valor pequeño. Es el modo al que entra el ADCS después del despliegue del satélite.
- Adquisición de orientación inicial: Una vez se logran reducir los valores de velocidad angular del satélite, se procede a inducir a la rotación del sistema para obtener los parámetros iniciales de orientación para el desarrollo de la misión. Usualmente en este modo se orienta el satélite para permitir la comunicación con la estación en Tierra y la exposición de los paneles solares al Sol.
- Modo de apuntado preciso: Modo de alta precisión en el que se minimiza el error de orientación. Este modo es el utilizado durante las observaciones científicas que requieren de precisión.
- Modo de giro por comando: Se cambia la orientación del satélite por comando cuando se requiere del apuntado a un nuevo objetivo.
- Modo de control de órbita: Se activan los actuadores de propulsión para ejercer un delta-V que permita controlar la órbita del satélite.
- Modo seguro: En este modo se busca mantener seguro al sistema, por lo que se aíslan los componentes a la espera de la estrategia especificada por el operador. La entrada a este modo se induce al obtener valores fuera del rango especificado para los sensores en el modo de operación presente.

3.3. Asociación entre modos de operación del satélite y Clarity

En el cuadro 1 se presentan las posibles coincidencias entre la ejecución de los modos de operación del satélite y el AOCS Clarity, con el fin de establecer la relación entre las necesidades operativas de la misión del satélite y lo que el operador espera del AOCS, así como lo que el desarrollador de software a bordo deberá conocer para la implementación de los comandos y estados del satélite.

Satélite	AOCS
Modo Stand-By	Modo Stand-By
Modo de adquisición inicial	Reducción de velocidad de giro Adquisición de orientación inicial
Modo normal	Modo de apuntado preciso Modo de giro por comando Modo de control de órbita
Modo seguro	Modo seguro

Cuadro 1: Relación entre modos de operación.

4. Vista operacional del sistema

4.1. Diagrama de casos de uso

Dado que el sistema a diseñar es un AOCS que sea mejor al ya utilizado por la empresa EXA. Este debe de contar con la capacidad de proveer de un apuntado preciso, basado en esto y guiado por los modos de uso según la sección de descripción del concepto de operaciones se estableció el diagrama de casos de usos el cual puede ser apreciado en la figura 4.

De forma breve, se establece que el principio de funcionamiento del AOCS se ejecuta a través de telecomandos brindados por el operador desde Tierra con el fin de darle órdenes al AOCS. Una vez el telecomando es recibido por el sistema de telecomunicaciones este es decodificado y enviado al OBC, el OBC se encarga de procesar la instrucción y crear la subrutina la cual ahora si entra directamente a nuestro sistema.

El caso de uso de telemetría para empezar este se coloco aislado a los demás dando a entender que este caso puede ser ejecutado en todos los casos de uso esto con el fin de evaluar el desempeño durante toda su vida útil si el usuario lo requiere, este caso de uso se especializa en el censado y procesamiento de datos referentes a datos físicos medibles en el sistema, una vez son procesados un reporte es enviado al usuario.

El stand-by por otro lado solo puede ejecutar acciones de telemetría si el usuario lo desea. Mientras que los demás modos de uso comienzan con las instrucciones del telecomando, una vez esto se ejecuta el sistema debe de ser capaz de estimar las condiciones actuales para generar los parámetros de control ideales los cuales ingresan a los actuadores y estos se encargan de llevar el sistema al estado deseado mediante la minimización del error. Esta descripción puede ser apreciada de una forma mejor en el diagrama de casos de usos extendido en cual se encuentra en el anexo A, figura 25.

4.2. Diagrama de secuencias

Para el diagrama de secuencias del AOCS este se partió en diferentes secuencias para distintos casos de usos, es decir se estableció una secuencia lógica para cada uno de los modos de operación ya mencionados. En las imágenes 5, 6, 7, 9, 10, 11, 13 y 14 se pueden observar las secuencias para los los casos de uso en modo de espera, modo de reducción de velocidad de giro, modo de adquisición inicial, modo de apuntado preciso, modo de control de orbita, modo de giro por comando, modo seguro y fin de vida útil respectivamente mientras que la secuencia completa se expresa a continuación:

- Al iniciar el sistema el AOCS entra en modo de espera, este modo espera a que el satélite haya alcanzado su punto inicial para proceder con otro modo, en este modo el operador de la misión es capaz de realizar telecomandos de telemetría para asegurarse del buen funcionamiento del sistema.
- Posteriormente el sistema ejecuta su modo de adquisición el cual recibe la instrucción por parte del OBC, utiliza los sensores integrados en el AOCS con el fin de estimar la orbita, la velocidad de rotación y la orientación del sistema esto para proveer realimentación tanto al sistema como al operador.

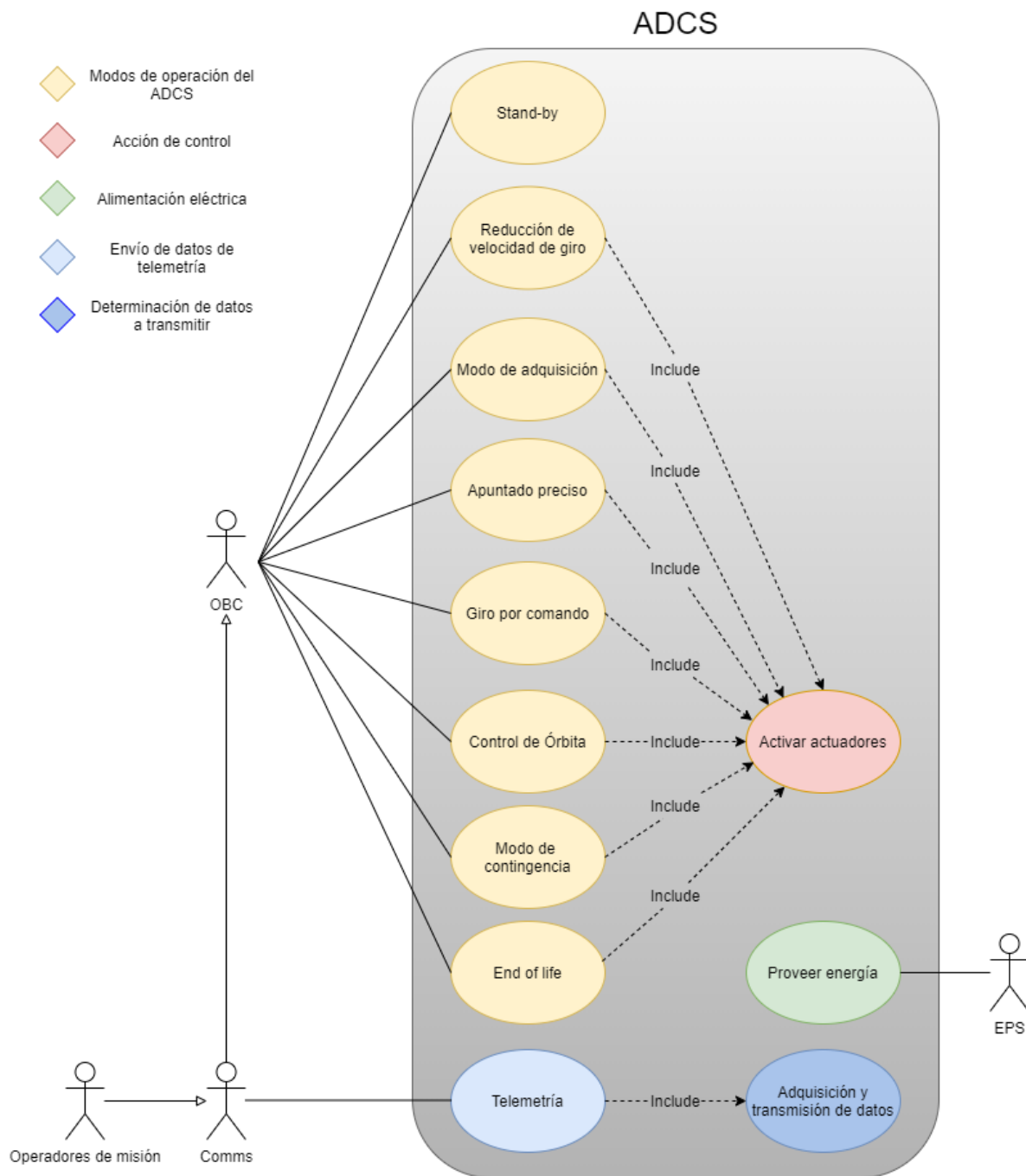
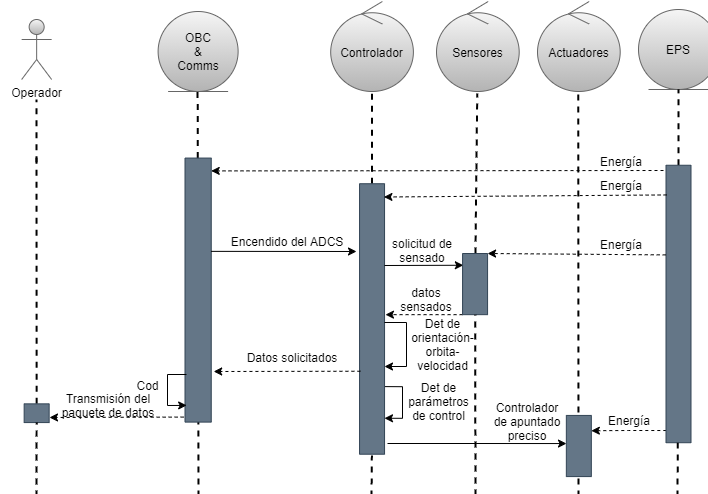
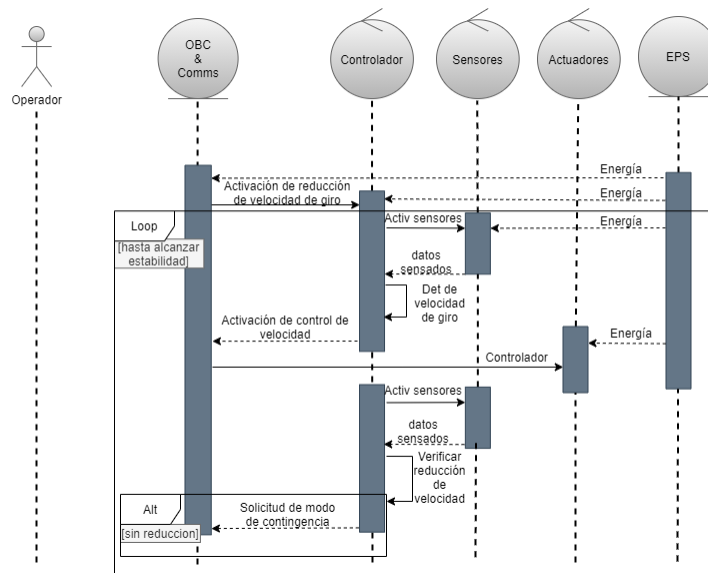
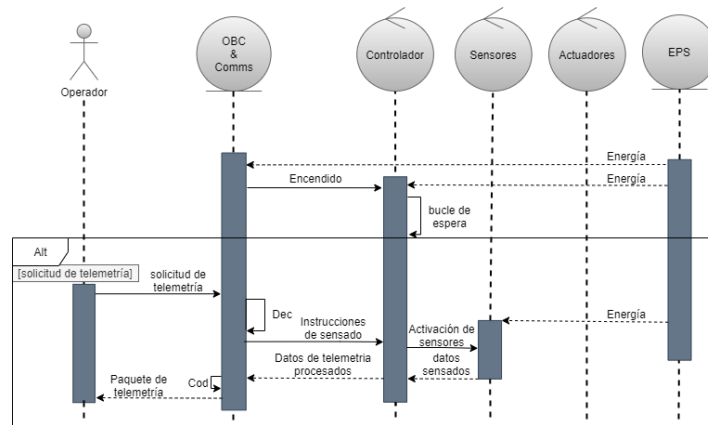


Figura 4: Diagrama de casos de uso del AOCS.

- Una vez se determina el estado del sistema se procede a ejecutar el modo de reducción de giro el cual mide los datos con los sensores del AOCS y se estima

su velocidad de giro pero ejecutar el control de la velocidad por medio del OBC, el AOCS entra en un estado de espera en el cual verifica que la velocidad de rotación se encuentre disminuyendo y una vez este se estabilice el AOCS termina su ejecución de modo actual.

- Se entra en el modo normal, el modo normal permite al operador de la misión utilizar los diferentes modos de operación como el control de orbita, giro por comando, apuntado preciso, en estos modos el telecomando es recibido por el sistema de comunicaciones y este es procesado y enviado al OBC, este genera el paquete de instrucciones a ser ejecutado en el AOCS enviándole los datos requeridos como la orbita, la velocidad u orientación deseada por el operador, así mismo el AOCS utiliza sus sensores, estima el estado actual, determina los parámetros de control y posteriormente utiliza estos parámetros en el control de los actuadores del sistema. Adicionalmente este se encuentra continuamente detectando anomalías en caso de que las hayan con el fin de activar el modo de contingencia.
- En caso de entrar en este modo el AOCS envia un reporte al OBC el cual lo transmite al operador. El OBC desactiva las funciones no vitales del satélite mientras que el AOCS se queda esperando por telecomandos. Lo normal es utilizar el modo de apuntado preciso para apuntar al sol para asegurar la carga del sistema hasta que el problema sea resuelto.
- Finalmente una vez el satélite termine con su ciclo de vida este entrara en el modo End of life, en este modo el operador de la misión es capaz de establecer su proceso. En caso de orbita basura el sistema recibe los telecomandos para ejecutar el algoritmo de control de orbita y este genera un reporte final antes de detener todas sus funciones.



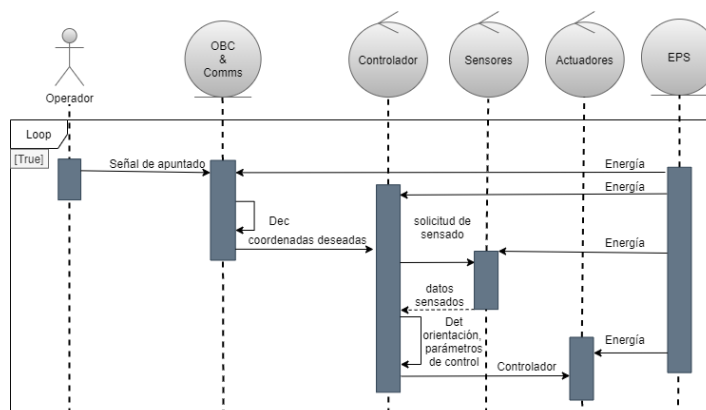


Figura 9: Modo de apuntado preciso

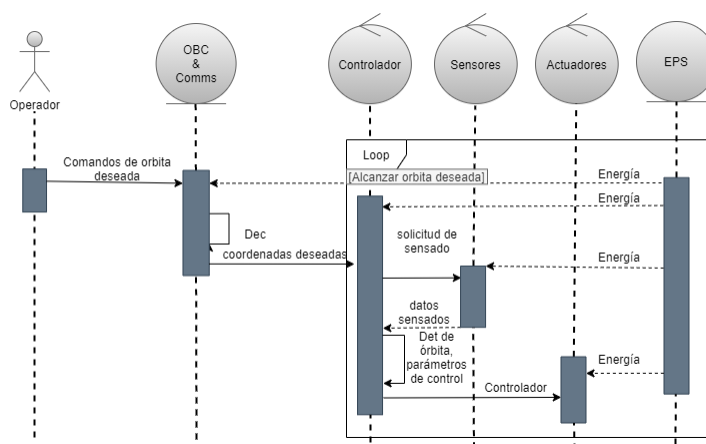


Figura 10: Modo de control de orbita

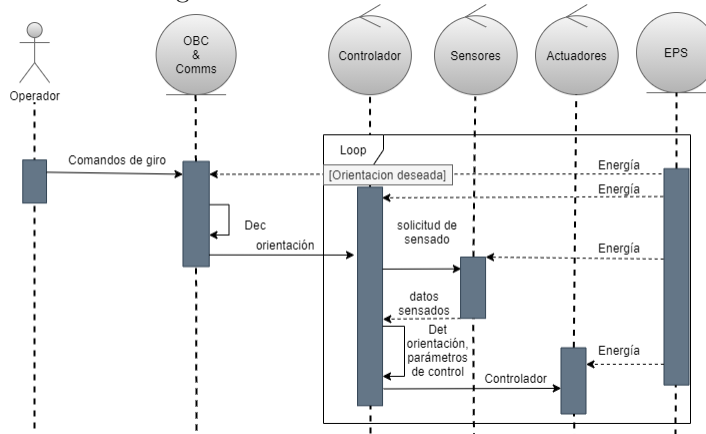


Figura 11: Modo de giro por comando

Figura 12: Diagramas de secuencias para los modos comunes del AOCS

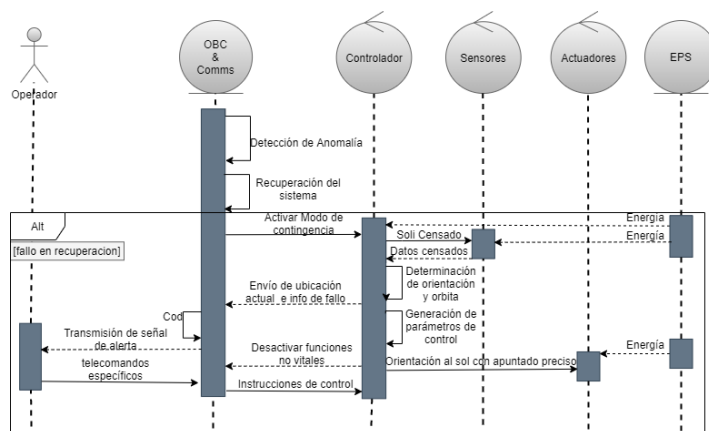


Figura 13: Modo seguro

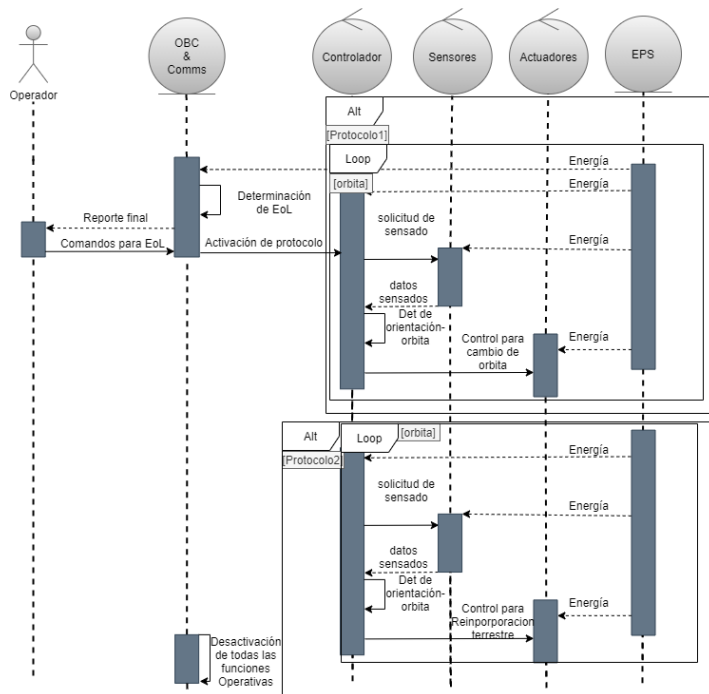


Figura 14: Fin de vida útil

Figura 15: Diagramas de secuencias para los primeros modos del AOCS

5. Exploración del espacio de diseño

En el proceso de exploración del espacio de diseño, se realizó un análisis tomando en cuenta los casos de uso del sistema para identificar problemas y subproblemas de diseño relevantes para el correcto funcionamiento del sistema y para el cumplimiento de las expectativas y requerimientos del mismo.

Para identificar las mejores soluciones a dichos problemas, se procedió primero a realizar una clasificación por medio de un árbol de problemas y subproblemas con el fin de definir los ámbitos en los que se buscarían las soluciones. Para la evaluación de las soluciones, se siguió el procedimiento expuesto en [22] para la toma de decisiones mediante la matrices de Pugh, estableciendo primero una serie de filtros absolutos que permiten el descarte de soluciones no viables para el proyecto, para finalmente realizar una evaluación con pesos definidos en las matrices.

5.1. Árbol de problemas y subproblemas de diseño

En la figura 16 se presentan los problemas y subproblemas de diseño identificados para el proyecto Clarity. Se identificaron cuatro ámbitos en los cuales se presentan problemas o situaciones pendientes para la identificación y definición de soluciones: Control de orientación, control de órbita, controlador y las interfaces con otros sistemas del satélite.

5.2. Descripción de problemas

Con base en la figura 16 se presenta una descripción de los problemas identificados para el proyecto Clarity. Los cuatro ejes en los que se clasificaron dichos problemas son fundamentales para la ejecución de los casos de uso (y, por tanto, para el cumplimiento de las expectativas y necesidades de los clientes), por lo que la correcta definición de la estrategia a implementar para cada uno de ellos es clave. Los subproblemas identificados son los siguientes:

Control de orientación

- Sensórica para orientación: Sensores requeridos para la ejecución de los algoritmos de estimación de la orientación.
- Algoritmos de estimación de orientación: Algoritmos a utilizar para la determinación de los estados de rotación y orientación según datos obtenidos por la sensórica.
- Algoritmo de control preciso de giro: Algoritmo a utilizar para la determinación de la acción de control por los actuadores de control preciso de orientación.
- Actuador para control preciso de orientación: Actuador encargado de la generación del torque calculado para obtener la orientación requerida de manera precisa.
- Sensórica para velocidad de giro: Sensor requerido para la medición de la tasa de rotación.

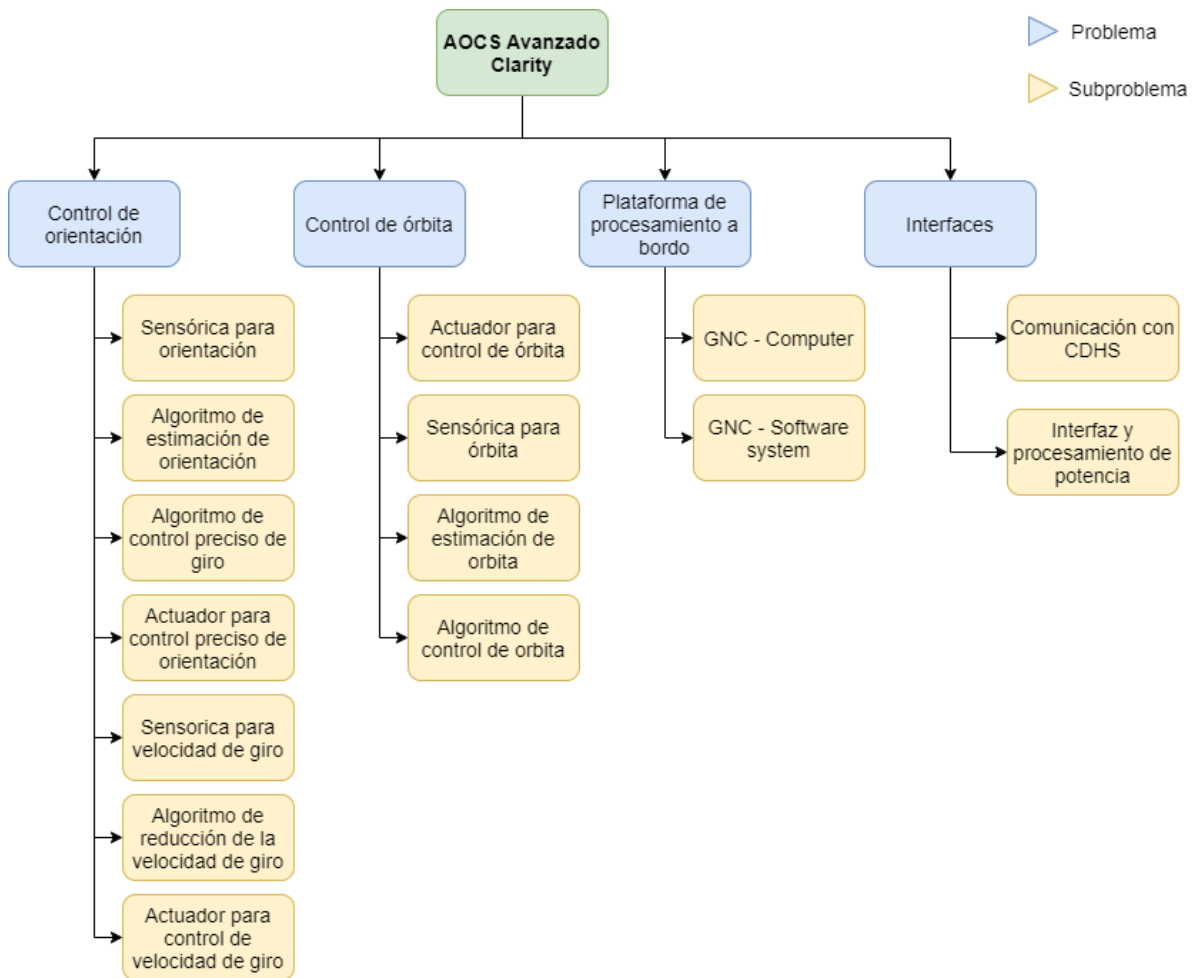


Figura 16: Árbol de problemas y subproblemas del proyecto Clarity.

- Algoritmo de reducción de la velocidad de giro: Algoritmo a utilizar para la reducción de la tasa de rotación del satélite al momento del despliegue y en caso de anomalías en dicha tasa.
- Actuador para control de velocidad de giro: Actuador utilizado para la reducción de la tasa de rotación (Detumbling).

Control de órbita

- Actuador para control de órbita: Actuador encargado de generar un cambio de velocidad ΔV para el control de la órbita del satélite.
- Sensórica para órbita: Sensor requerido para la ejecución del algoritmo de estimación de órbita.

- Algoritmo de estimación de órbita: Algoritmo a utilizar para la estimación de la órbita actual del satélite
- Algoritmo de control de órbita: Algoritmo a utilizar para la determinación de la acción de control por parte de los actuadores de control de órbita.

Plataforma de procesamiento a bordo

- GNC - Computer: Computador a bordo encargado de ejecutar los algoritmos de estimación y control del AOCS. Este componente debe comunicarse con los diferentes sensores y actuadores del sistema para implementar la correcta interacción ciberfísica que se plantea con Clarity.
- GNC - Software system: El sistema de software está compuesto por las instrucciones a ejecutar mediante el computador a bordo del subsistema respectivo. Según lo expuesto en [17], actualmente se implementan soluciones que integran sistemas operativos en tiempo real (RTOS), sistemas operativos de propósito general, sistemas operativos de propósito específico e incluso, acercamientos en los cuales se ejecuta código sin la necesidad de un sistema operativo.

Interfaces

- Comunicación con CDHS: Protocolo para el envío y recepción de comandos por parte y hacia la computadora a bordo.
- Interfaz y procesamiento de potencia: Subsistema encargado de facilitar o restringir la provisión de energía eléctrica provista por el EPS del satélite.

5.3. Propuestas de solución

Una vez identificados los problemas, se procede con el proceso de identificación de posibles soluciones, las cuales deben enfocarse en el cumplimiento de los requerimientos del sistema y las necesidades planteadas por los diferentes actores externos a Orbital Guidance. Las propuestas identificadas para los diferentes problemas son:

Sensórica para orientación

- Giroscopio: Es un aparato que está conformado por un disco sólido en su centro, dicho disco se encuentra montado sobre un eje cartesiano con forma de aro que rota libremente en cualquier dirección de su propio eje. Su funcionamiento se basa en la conservación de momento angular, por dicha razón es utilizado para medir la orientación [23].
- Acelerómetro: Es un dispositivo que mide la aceleración en el movimiento de un sistema, la fuerza que genera el cambio de movimiento hace que se provoque una carga eléctrica proporcional a la fuerza aplicada debido a la compresión del objeto [24].

- Sensores solares (Kratos): Es un dispositivo que se encarga de sensar la dirección con respecto al sol para lograr medir la posición del sol o de alguna otra fuente de luz respecto a la posición del sensor [25].
- Magnetómetro: Es un aparato que permite medir la intensidad y dirección del campo magnético en el que está inmerso [26].
- IMU (Kratos): Es un dispositivo que mide aceleraciones y velocidades angulares [27].

Algoritmos de estimación de orientación

- TRIAD: Es un algoritmo que permite calcular la orientación del sistema mediante dos bases ortonormales que están definidas respecto a los marcos de referencia orbital del sol y de la Tierra.
- Filtro de Kalman Extendido (EKF): Es un método en el cual, conociendo los estados actuales del sistema, se estima el estado futuro del mismo de manera que constantemente se aplica un termino de corrección proporcional al factor de predicción. Este método es sumamente conveniente ya que tiene la capacidad de trabajar sistemas discretos no lineales [28].
- Singular Value Decomposition (SVD): En este algoritmo se realiza la descomposición en valores singulares de una matriz de estados para minimizar el valor de la función de error y de esta manera estimar la orientación [29].
- Fast Optimal Attitude Matrix (FOAM): Este algoritmo deriva conceptos del SVD que se pueden calcular sin necesidad de realizar la descomposición, con dichos conceptos se calcula el error de covarianza para minimizarlo y tender a un valor estimado de orientación [29].
- Second Estimator of the Optimal Quaternion (ESOQ-2): En este algoritmo se busca la relación entre el cuaternión y el ángulo y eje de rotación del sistema [29].

Algoritmo de control preciso de giro

- Follow B-Field Controller: En este algoritmo se busca alinear el eje z del sistema con el vector de campo magnético obtenido por la sensórica. Es funcional solo para satélites que cuentan con ruedas de reacción ya que estas son las encargadas de alinear el eje de la rueda con el vector de campo magnético de manera que se pueda contrarrestar la poca actuación del magnetorquer si así fuese el caso [30].
- Combined Wheel Controller: En este algoritmo se utiliza una rueda de reacción en conjunto con un magnetorquer, mediante la derivada del momento angular de la rueda de reacción es posible obtener un equivalente del torque producido por la misma y con dicho torque se realiza el giro en la dirección deseada [31].

- AMM algorithm: Este algoritmo se asegura de que el momento angular de 4 ruedas de reacción esté en un rango preestablecido. Sin presentar perturbaciones, el momento angular total del marco inercial de sistema se mantiene constante durante las maniobras. El intercambio de momento angular entre las ruedas de reacción es el que provoca la rotación del sistema [32].

Actuador para control preciso de orientación

- Ruedas de reacción: Son un tipo de actuador eléctrico que tiene la función de proveer torques para la dinámica del sistema, consisten de una masa giratoria con una cantidad sustancial de inercia que permita cambiar el momento angular del sistema [33].
- Magnetorquers: Es un actuador que permite controlar la orientación del sistema mediante la interacción con el campo magnético de la Tierra [34].
- Propulsores: Es un tipo de actuador que proporciona un impulso sobre la dinámica del sistema, se pueden clasificar en químicos, eléctricos y sin propelente [17].
- Esfera de reacción: Es un actuador que logra la misma función que 3 ruedas de reacción solo que con un tercio de volumen, costo, peso y consumo de energía. [35].

Sensórica para velocidad de giro

- IMU (Kratos): Definido anteriormente.
- Magnetómetro: Definido anteriormente.
- Sensores solares (Kratos): Definido anteriormente.
- IMU: Definido anteriormente.

Algoritmo de reducción de la velocidad de giro

- B-Dot/Detumbling (Kratos): En este algoritmo se busca generar un dipolo magnético constantemente ortogonal al vector de campo geomagnético de la Tierra y de esta manera reducir la velocidad de giro del sistema. [36]
- B-Dot: Definido anteriormente.

Actuador para control de velocidad de giro

- Ruedas de reacción: Definido anteriormente.
- Magnetorquers (Kratos): Definido anteriormente.
- Propulsores: Definido anteriormente.

- Esfera de reacción: Definido anteriormente

Actuador para control de órbita

- Propulsor químico: Estos propulsores se diseñan para proveer altos empujes para maniobras impulsivas. Ofrecen bajos valores de impulso específico en comparación con propulsores eléctricos pero presentan altos valores en su relación empuje a potencia [17]. Utilizan propelentes sólidos, líquidos o gaseosos.
- Propulsor eléctrico: Este tipo de propulsor se basa en la conversión de energía eléctrica en energía cinética para poder generar empuje. Existen 3 tipos de propulsión eléctrica los cuales son: electrotérmico, electrostático y de aceleración electromagnética [17].
- Tether eléctrico: Es un actuador que emplea cables que son conductores eléctricos y poseen flujo de corriente, a dicha corriente se le añade el arrastre atmosférico que percibe el cable y mediante la interacción con el campo magnético de la Tierra se genera un aumento o disminución en la órbita [17].
- Vela solar: Es un actuador que utiliza la radiación para generar empuje mediante la reflexión de fotones mediante membranas altamente reflectivas [17].

Sensórica para órbita

- Magnetómetro: Definido anteriormente.
- IMU (Kratos): Definido anteriormente.
- Sensores solares (Kratos): Definido anteriormente.
- IMU: Definido anteriormente.

Algoritmo de estimación de órbita

- Filtro de Kalman extendido (EKF): Definido anteriormente.
- Least Square Orbit Determination (LSQOD): Este algoritmo establece tres valores de interés, el real, el medido y el estimado, mediante estos tres valores se establece una función de error la cual se busca disminuir para tener igualdad entre los valores mencionados anteriormente y así poder controlar la órbita del sistema [37].
- Método de Jarrat: En este método se establece una función de error que se disminuye mediante la convergencia de las funciones que procesan los valores estimados y los valores obtenidos por la sensórica [38].
- Método de Ostrowski: Este método permite resolver ecuaciones no lineales de control en la cuales se establece una convergencia entre los valores estimado y real [38].

Algoritmo de control de órbita

- ZEM/ZEV-LQR: Este algoritmo evalúa directamente los comandos de control en términos de aceleración para poder tener control en presencia de un campo gravitacional uniforme [39].
- PID: Es un controlador proporcional, integral y derivativo que permite controlar de manera precisa la órbita [40].

GNC - Computer

- PSoC: Los sistemas PSoC de Cypress son plataformas de diseño que integran lógica analógica discreta, memoria, microcontrolador (MCU) y la capacidad de programar su lógica digital interna [41].
- esp32: MCU diseñado para operar en entornos industriales manteniendo un consumo energético ultra bajo. Ofrece una gran cantidad de interfaces para la comunicación con periféricos [esp32def].
- STM32F1: Estos MCUs de la empresa STMicroelectronics proveen cobertura para una amplia gama de aplicaciones mediante la integración de procesadores Arm Cortex-M, los cuales permiten altos desempeños a bajos consumos de potencia y voltajes de operación [42].
- MSP430: Según [43], los MCUs de 16 bits MSP430 de Texas Instruments son una familia de MCUs diseñados para operaciones de procesamiento analógico de complejidad simple a media, manteniendo un consumo de potencia bajo.

GNC - Software System

- RTOS: Según la definición presentada en [44], un Real Time Operating System es un sistema operativo diseñado para cumplir con los requerimientos de tiempo de ejecución que la mayoría de sistemas embebidos tienen. Esto lo logran mediante la implementación de un patrón de ejecución predecible (determinístico), lo cual se logra estableciendo niveles de prioridad para cada *tarea*.
- Embedded Linux: Se refiere al uso de una distribución generada específicamente para la aplicación a implementar. Este acercamiento permite generar imágenes del sistema operativo sin importar la arquitectura en la que se ejecutará [45].
- GPOS: Un General Purpose Operating System consiste en un programa de computadora que da soporte a las funciones básicas de la misma [44], ofreciendo un entorno para desarrollar y ejecutar aplicaciones de toda índole.
- Bare bones (no OS): Según [17], el acercamiento *Bare bones* se refiere a la implementación de la ejecución del código sin el uso de un sistema operativo.

Comunicación con CDHS

- I2C: Es un protocolo de comunicación en el que se combinan las mejores propiedades de los protocolos SPI y UART [46].
- USB: Es un protocolo de comunicación que permite establecer una interfaz entre un computador y sus periféricos [47].
- UART: Es un protocolo de comunicación que permite establecer el envío y recepción de datos entre dos elementos físicos [48].

Interfaz y procesamiento de potencia

- BJT: Un módulo BJT consiste de un circuito integrado de potencia que permite la conmutación de energía mediante diodos [49].
- MOSFET: Es un mecanismo que permite conmutar energía dependiendo del voltaje en su entrada [50].
- Relé: Es una interfaz que permite la conmutación de energía cuando las uniones eléctricas dentro de él están cerradas y lo contrario cuando están abiertas [51].
- Hot-swap controller: Es una interfaz que permite conmutar corriente, voltaje y potencia mediante un circuito integrado que regula el acceso al bus de potencia [52].

5.4. Filtros absolutos

Tal como se definió anteriormente, para la ejecución de la metodología presentada en [22], es necesario definir una serie de requerimientos o criterios absolutos que permitan realizar el descarte de opciones de solución no viables. La identificación de estos filtros se realizó tomando en cuenta los requerimientos del sistema y del software, así como los intereses de los clientes representados mediante el concepto de operaciones y los casos de uso presentados en este documento. Por tanto, los filtros absolutos aplicados a las soluciones propuestas son:

- Según el requerimiento de sistema SyRS-106, el sistema deberá no contener elementos pirotécnicos.
- Según el requerimiento SRS-154, los algoritmos deberán poder trabajar con sistemas no lineales.
- Según el requerimiento del sistema SyRS-81, la interfaz con la computadora a bordo deberá ser implementada mediante protocolo USB.

5.5. Análisis de soluciones

Para continuar con el procedimiento expuesto en [22], se procederá a exponer la selección de los criterios de evaluación, así como sus pesos asociados para la ejecución de la matriz de Pugh. Además de los criterios y sus pesos, se expondrá a continuación las matrices de Pugh generadas para la selección de las soluciones óptimas, así como su resultado. Cabe destacar que las propuestas evaluadas son aquellas que satisfacen los filtros absolutos listados anteriormente.

5.5.1. Sensórica para orientación

A la hora de seleccionar el sensor para la determinación de a orientación se tomaron en cuenta múltiples opciones para las cuales se definieron distintos criterios como la masa (3) de cada uno, su costo (4) y su consumo de potencia (5). Cabe destacar que se le asignó mayor peso al criterio de consumo de potencia ya que estos elementos del satélite se caracterizan por ser parte importante de la demanda eléctrica del satélite. Tomando en cuenta lo mencionado anteriormente y los demás criterios definidos se tiene como solución óptima el uso del magnetómetro para esta tarea.

Criterio	Peso	Ref: Magnetómetro	IMU (Kratos)	Sensores solares (Kratos)	Giroscopio	Acelerómetro
Consumo de potencia	5	1	1	0	0	0
Costo	4	1	1	1	-1	-1
Masa	3	1	0	0	0	-1
Total		12	9	4	-4	-7

Cuadro 2: Matriz de Pugh para la selección del sensor para la estimación de orientación.

5.5.2. Algoritmo de estimación de orientación

La exploración de posibles algoritmos para la estimación de la orientación del satélite dio como resultado una lista extensa de opciones a escoger, resultando finalmente en cinco candidatos a ser evaluados bajo su capacidad de predicción (4), estimación del estado del sistema (5) y la velocidad de convergencia del mismo (3). De estos criterios de evaluación se le dio más peso a la capacidad de estimar los estados del sistema, dando como resultado de la matriz Pugh del cuadro 3 la selección del Filtro de Kalman Extendido (EKF) como solución óptima.

Criterio	Peso	Ref: EKF	SVD	FOAM	TRIAD	ESQ-2
Predicción	4	1	-1	0	-1	0
Estimación	5	1	0	-1	0	0
Velocidad	3	1	1	1	1	1
Total		12	-1	-2	-1	3

Cuadro 3: Matriz de Pugh para la selección del algoritmo para la estimación de la orientación.

5.5.3. Algoritmo de control preciso de giro

Para la evaluación de las alternativas de solución para la escogencia del algoritmo de control preciso de giro, se tomaron en cuenta la precisión del algoritmo (4), su velocidad de convergencia (3) y la no necesidad de magnetorquers (5), dando como resultado de la matriz Pugh del cuadro 4, la selección del AMM algorithm como opción óptima.

Criterio	Peso	Ref: Follow B-Field Controller	Combined Wheel Controller	AMM algorithm
Precisión	4	1	1	1
Velocidad	3	1	1	0
No MTQ	5	-1	-1	1
Total		2	2	9

Cuadro 4: Matriz de Pugh para la selección del algoritmo para el control preciso de giro.

5.5.4. Actuador para control preciso de orientación

Los criterios de selección tomados en cuenta para este actuador se derivan directamente de los requerimientos de alto nivel del proyecto, los cuales son el consumo de potencia (5), su masa (3) y el volumen de la solución (2), añadiendo a estos el torque que pueden generar (4). La potencia fue el criterio de selección al cual se le asignó más peso dado que, normalmente, los actuadores son los dispositivos que más consumen potencia en un sistema, por lo que la necesidad de mantenerse dentro del margen de potencia establecido en los requerimientos del sistema y los de alto nivel se debe ver reflejada en esta decisión.

Dada la evaluación de los criterios de selección en la matriz de Pugh del cuadro 5, se escogieron las ruedas de reacción para el control preciso de orientación.

Criterio	Peso	Ref: Ruedas de reacción	Magnetorquers	Propulsores	Esfera de reacción
Consumo de potencia	5	1	1	1	-1
Torque	4	1	-1	1	1
Masa	3	1	1	0	-1
Volumen	2	1	1	-1	-1
Total		14	6	7	-6

Cuadro 5: Matriz de Pugh para la selección del actuador para control preciso de giro.

5.5.5. Sensórica para velocidad de giro

Para la selección de la sensórica para la determinación de la velocidad de giro del satélite, se tomaron en cuenta dos tipos de soluciones, un tipo enfocado en la inclusión de los sensores en el AOCS Clarity y otro tipo de soluciones que se basan en el aprovechamiento de las capacidades actuales integradas en el bus Kratos de EXA. Para la evaluación de las opciones propuestas, se tomaron en cuenta el consumo de potencia del sensor (3), su masa (2), costo (4) y su precisión (5). La evaluación de estos criterios en la matriz Pugh del cuadro 6 dio como resultado que la sensórica óptima para la tarea de determinar la velocidad de giro es el magnetómetro.

Criterio	Peso	Ref: Magnetómetro	IMU (Kratos)	Sensores solares (Kratos)	IMU
Consumo de potencia	3	0	0	0	0
Masa	2	0	0	1	0
Coste	4	0	0	0	0
Precisión	5	1	0	0	0
Total		5	0	2	0

Cuadro 6: Matriz de Pugh para la selección del sensor para la determinación de la velocidad de giro.

5.5.6. Algoritmo de reducción de la velocidad de giro

Para este problema de diseño se tomó en cuenta la capacidad actual con la que cuenta Kratos de realizar maniobras de detumble mediante sus sensores, actuadores y algoritmos, así como la opción de integrar estas maniobras en el AOCS Clarity. Para la evaluación de estas opciones se tomaron en cuenta la precisión (3), el tiempo de estabilización (4) y la facilidad de obtención de parámetros (2, asociada a la complejidad de implementación). Dada la evaluación en la matriz Pugh del cuadro 7, se seleccionó la opción de aprovechar las capacidades de Kratos en este ámbito para la reducción de la velocidad de giro.

Criterio	Peso	Ref: B-dot	Delegar función a Kratos
Precisión	3	0	0
Tiempo de estabilización	4	0	0
Facilidad de obtención de parámetros	2	0	1
Total		0	2

Cuadro 7: Matriz de Pugh para la selección del algoritmo para la reducción de velocidad de giro.

5.5.7. Actuador para control de velocidad de giro

Para la selección del actuador para el control de la velocidad de giro se volvieron a explorar dos tipos de soluciones, tomando en cuenta las capacidades del bus Kratos y explorando la posibilidad de integrar las capacidades de este control al AOCS Clarity. Para la evaluación de las posibles soluciones identificadas se tomaron en cuenta el torque (5), la masa (4), el volumen (3) y el consumo de potencia del actuador propuesto (2). Mediante la evaluación de la matriz Pugh del cuadro 8 se llegó a la conclusión de que la solución óptima para esta tarea es aprovechar los magnetorquers integrados en el bus Kratos, selección con la cual se completa la delegación de esta tarea a dicho sistema, el cual cuenta con la sensórica, los algoritmos, el poder de procesamiento y los actuadores necesarios para lograr realizar la reducción de la velocidad de giro.

Criterio	Peso	Ref: Magnetorquers (Kratos)	Ruedas de reacción	Propulsores	Esfera de reacción
Torque	5	1	1	1	1
Masa	4	1	-1	-1	-1
Volumen	3	1	-1	1	-1
Consumo de potencia	2	1	-1	0	-1
Total		14	-6	2	-6

Cuadro 8: Matriz de Pugh para la selección del actuador para control de velocidad de giro.

5.5.8. Actuador para control de órbita

Para la selección de este actuador se tomaron en cuenta los atributos de masa (4), volumen (3), maniobraje (5) y consumo de potencia (2). De estos atributos, tomados como criterios de selección, se le dió mayor importancia a la capacidad de maniobrar, asignándole un peso de 5; esto es ya que el actuador escogido deberá realizar maniobras de desorbitaje, reorbitaje, mantenimiento de órbita o disparos en lazo abierto.

Dada la evaluación de los criterios de selección en la matriz de Pugh del cuadro 9, se escogió el uso de propulsores eléctricos para el control de órbita.

Criterio	Peso	Ref: Propulsor eléctrico	Propulsor químico	Tether eléctrico	Vela solar
Masa	4	1	0	1	1
Volumen	3	1	1	1	1
Maniobraje	5	1	1	-1	-1
Consumo de potencia	2	0	0	1	1
Total	2	12	8	4	4

Cuadro 9: Matriz de Pugh para la selección del actuador para control de órbita.

5.5.9. Sensórica para órbita

Tomando en cuenta el consumo de potencia (3), la masa de la solución (2), su costo (4) y la precisión (4) se evaluaron las opciones presentadas para la sensórica a incluir para las estimaciones referentes a la órbita. De la evaluación de la matriz Pugh del cuadro 10 se concluye que la opción a escoger es la inclusión de un magnetómetro, lo cual aumenta el aprovechamiento de este recurso dado que ha sido seleccionado para la solución de otro problema de diseño en esta sección.

Criterio	Peso	Ref: Magnetómetro	IMU (Kratos)	Sensores solares (Kratos)	IMU
Consumo de potencia	3	0	1	1	0
Masa	2	0	0	0	0
Coste	4	0	0	0	0
Precisión	4	1	0	0	0
Total		4	3	3	0

Cuadro 10: Matriz de Pugh para la selección del sensor para la estimación de órbita.

5.5.10. Algoritmo de estimación de órbita

La exploración de los posibles algoritmos a implementar para la estimación de la órbita dio como resultado siete propuestas, que al ser evaluadas mediante los filtros absolutos se redujeron a cuatro posibles soluciones viables. En la evaluación de estas soluciones se tomaron en cuenta la precisión (5), la eficiencia del algoritmo (4) y la facilidad de obtención de los parámetros (3). Al realizar la evaluación de estos criterios en la matriz Pugh del cuadro 11 se obtuvo como resultado la elección del filtro de Kalman extendido para la estimación de la órbita.

Criterio	Peso	Ref: EKF	LSQOD	Ostrowsky	Jarrat
Precisión	5	1	-1	0	0
Eficiencia	4	1	1	0	0
Adquisición parámetros	3	1	1	1	1
Total		12	2	3	3

Cuadro 11: Matriz de Pugh para la selección del algoritmo para la estimación de órbita.

5.5.11. Algoritmo de control de órbita

Para seleccionar el algoritmo para el control de la órbita se tomaron en cuenta aspectos referentes al manejo de órbitas en su funcionamiento (4), su robustez (4) y la complejidad en su implementación (2). Para las dos propuestas de solución para esta tarea, la evaluación de la matriz de Pugh del cuadro 12 dio como resultado que la implementación de un PID es la opción óptima.

Criterio	Peso	Ref: PID	ZEM
MO	4	1	0
Robustez	4	1	1
Complejidad	2	1	-1
Total		10	2

Cuadro 12: Matriz de Pugh para la selección del algoritmo para el control de órbita.

5.5.12. GNC - Computer

Para la selección del microcontrolador que constituirá el computador del GNC (Guidance Navigation and Control), se tomaron en cuenta los aspectos de frecuencia de reloj (3), la facilidad de implementar la comunicación vía USB (5), la posibilidad de implementar comunicación con periféricos mediante los protocolos UART, I2C, SPI y CAN (4), la integración de un ADC en su GPIO (1) y la integración y capacidad de comunicación con memorias (1). De la evaluación de la matriz de Pugh del cuadro 13, se determinó que el microcontrolador esp32 es el óptimo para solucionar este rubro.

Criterio	Peso	Ref: esp32	PSoC	STM32F1	MSP430
Frecuencia de reloj	3	1	-1	-1	-1
USB	5	1	0	0	0
UART, I2C, SPI, CAN	4	1	0	1	0
ADC Integrado	1	1	0	0	0
Memorias integradas	2	1	-1	-1	-1
Total	15	15	-5	-1	-5

Cuadro 13: Matriz de Pugh para la selección del GNC - Computer.

5.5.13. GNC - Software System

Para determinar el sistema de software que ejecutará el GNC, se exploraron las opciones de inclusión de sistemas operativos y de ejecutar software directamente sin la inclusión de un OS. Se establecieron los siguientes criterios de selección: El manejo de archivos (5), dado que esto facilitaría el almacenaje de datos de modelos de la magnetósfera, datos históricos recopilados por Clarity (log) y demás; la capacidad de calendarización de tareas o hilos (3), el almacenamiento requerido por el sistema (4) y la disponibilidad de contar con herramientas para el desarrollo de software (2). Dada la evaluación presentada en el cuadro 14, la solución seleccionada es la inclusión de un RTOS en el sistema.

Criterio	Peso	Ref: RTOS	Embedded Linux	GPOS	“Bare bones” (No OS)
Manejo de archivos	5	1	0	1	-1
Calendarización	3	1	-1	-1	-1
Almacenamiento requerido	4	1	-1	-1	1
Herramientas de desarrollo	2	1	1	0	0
Total		14	-5	-2	-4

Cuadro 14: Matriz de Pugh para la selección del GNC - Software System.

5.5.14. Comunicación con CDHS

Para la elección del protocolo de comunicación (y, por ende, el hardware necesario para su implementación) de Clarity con el CDHS (OBS en las definiciones de los documentos de los requerimientos) del satélite se refirió al requerimiento del sistema SyRS-81, el cual establece que la interfaz con la computadora a bordo debe ser implementada mediante el protocolo USB.

5.5.15. Interfaz y procesamiento de potencia

Para la implementación de la interfaz eléctrica para la alimentación de los componentes de Clarity se tomaron en cuenta características relevantes para el cumplimiento de las expectativas de los clientes, reflejadas mediante los requerimientos propuestos para el sistema. Los criterios de selección para el proceso de evaluación fueron las pérdidas eléctricas (5), la velocidad de transición de estado (5), el área que requiere la solución (3) y el método de conmutación (3). Dada la evaluación realizada en la matriz Pugh del cuadro 15, se toma como opción óptima la elección del Hot-swap controller.

Criterio	Peso	Ref: Hot-swap	Relé	BJT	MOSFET
Pérdidas	5	1	0	1	-1
Velocidad	5	0	1	0	1
Área	3	0	-1	1	-1
Conmutación	3	1	-1	-1	1
Total	16	8	-1	5	0

Cuadro 15: Matriz de Pugh para la selección de la interfaz eléctrica.

5.6. Resumen de la selección de soluciones

A manera de resumen se presenta el cuadro 16 para visualizar las conclusiones obtenidas de las diferentes matrices Pugh evaluadas. Bajo estas selecciones se basan los desarrollos de las diferentes arquitecturas del proyecto Clarity, por lo que es importante tener este cuadro como referencia a mano. Finalmente se presenta también el árbol de soluciones en la figura 17, el cual presenta de manera gráfica el resultado del procedimiento anterior, asociando las soluciones seleccionadas a sus problemas respectivos.

Problema	Solución
Actuador para control preciso de orientación	Ruedas de reacción
Actuador para control de órbita	Propulsores Eléctricos
Actuador para control de velocidad de giro	Magnetorquers de la plataforma KRATOS
Sensórica para orientación	Magnetómetros
Sensórica para órbita	Magnetómetros
Sensórica para velocidad de giro	Magnetómetros
Algoritmos de estimación de orientación	Extended Kalman Filter
Algoritmos de estimación de órbita	Extended Kalman Filter
Algoritmo de reducción de la velocidad de giro	Delegar función a ICEPS (B-dot)
Algoritmo de control de órbita	PID
Algoritmo de control preciso de giro	AMM Algorithm
GNC - Computer	esp32
GNC - Software System	RTOS
Comunicación con OBC	Protocolo USB
Interfaz eléctrica	Hot-swap controller

Cuadro 16: Problemas y soluciones seleccionadas para el proyecto Clarity.

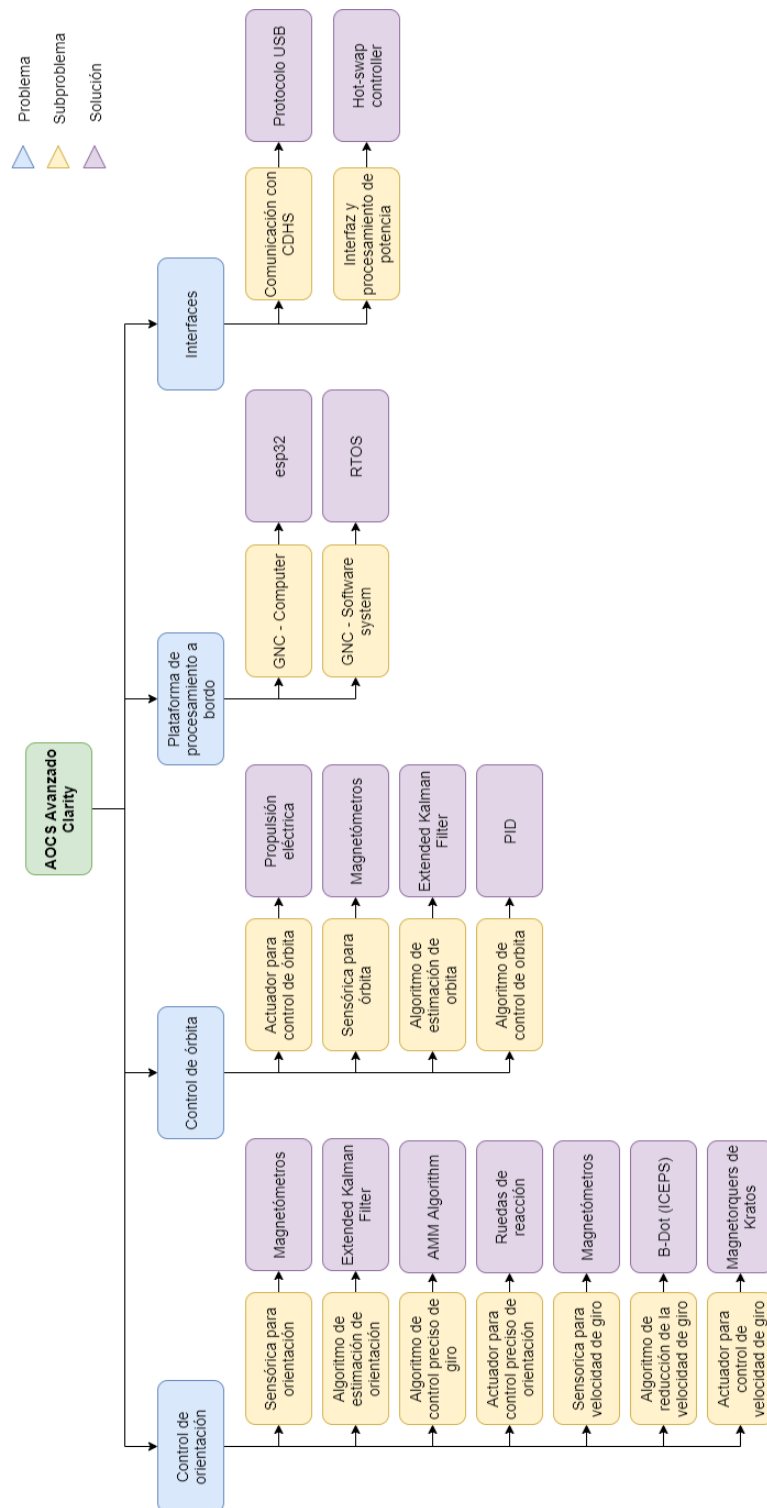


Figura 17: Árbol de soluciones del proyecto Clarity.

6. Análisis de requerimientos

Se utilizó la norma ISO/IEC/IEEE 29148 específicamente las secciones “9.5 System requirements specification (SyRS) content” y “9.6 Software requirements specification (SRS) content” para este apartado, estas nos ofrecen una guía para determinar varios aspectos para la identificación de los requerimientos de un sistema y de su software. La norma identifica requerimientos internos y externos al sistema que nos ayudan a manejar el diseño del producto. En esta sección se utilizó una ID para la identificación de las distintas partes la cual se identifica por “SyRS-número” si es requerimiento del sistema o con “SRS-número” si es requerimiento del software, donde cada sección tendrá asignado su número de identificación. Estos documentos se encuentran en el Anexo B (Sección 15) y el Anexo C (Sección 16).

6.1. Requerimientos del sistema

Inicialmente se realiza una sección introductoria y se describe a un nivel general los elementos más significativos del sistema (SyRS-5) y las interfaces que crucen fuera o dentro del sistema. También se enuncian las capacidades, condiciones y limitaciones que tendrá el sistema (SyRS-126, SyRS-127 y SyRS-128).

En el apartado de “User characteristics” (SyRS-7) proponemos dos tipos de usuarios: los operadores y los integradores, también se identifican limitaciones y dependencias que se adaptan a los requerimientos predefinidos para el sistema por EXA.

Dentro de la segunda sección se encuentran los “Functional requirements” (SyRS-47 a SyRS-54), estos especifican a mayor detalle los requerimientos aplicables al sistema. El apartado de “Usability requirements” (SyRS-66 y SyRS-67) donde se definen ciertos requerimientos de usabilidad para los integradores a la hora de hacer al sistema interfazar con KRATOS correctamente y para el operador a la hora de enviar telecomandos al sistema. En la sección “Performance requirements” (SyRS-76 a SyRS-92) se enunciaron los requerimientos específicos que el sistema debe cumplir en cuanto al control de orientación, consumo de potencia, periodo de estabilización, entre otros. También dentro de esta segunda sección se encuentran los “System interface requirements” (SyRS-152) que detallan las diferentes interfaces que se deben manejar dentro del sistema para manejar tanto señales como energía.

Los requerimientos incluyen también aspectos de la usabilidad (SyRS-66 y SyRS-67) que responde a la pregunta ¿para que se van usar el sistema?, otra sección incluye los requisitos de rendimiento del sistema (SyRS-76, SyRS-78 y SyRS-89 a SyRS-92), se definen aspectos que dan competitividad y destacan al producto siempre tomando en cuenta los requerimientos del cliente. La tercera sección provee las técnicas y métodos para la verificación que se planean utilizar para calificar el sistema.

6.2. Requerimientos de software

Primero se realiza una sección introductoria y se ofrecen varias perspectivas con respecto al producto (SRS-4) la utilizamos para establecer el ambiente técnico al que el

producto va estar contemplado, en esta etapa se incluyen cosas como los interfaces con el usuario, software y demás (SRS-13), la comunicación con estas interfaces y operaciones las cuales el software deberá realizar también se establecen en este apartado.

En la sección SRS-14 proponemos funciones generales del software que usuario requiere, en la sección de “User characteristics” (SRS-15) proponemos dos tipos de usuarios: los operadores y los desarrolladores, también se identifican limitaciones y dependencias para el software que se adaptan a los requerimientos del cliente.

En la segunda sección, “Requirements” (SRS-20), se especifica a mayor detalle el sistema de software y se delimitan las necesidades a tomar en cuenta para realizar lo que el cliente requiere, esta sección inicia con las interfaces de entrada y salida del sistema (SRS-21) para definir los protocolos o formatos de entrada y salida del software, además la sección de funciones (SRS-22) es de gran importancia porque en esta se definen las entradas (SRS-82), salidas (SRS-99) para el algoritmo como tal y cómo pueden llegar a producir una salida a partir de una entrada específica (SRS-90).

En los requerimientos también se incluyen aspectos de la usabilidad (SRS-23) que responde a la pregunta ¿para que se van usar el sistema de software?, otra sección incluye los requisitos de rendimiento (SRS-24), se definen aspectos que dan competitividad al producto además, se siguen tomando en cuenta los requerimientos del cliente. Se definen las bases de datos que se pueden llegar a requerir, además de limitaciones que se deben considerar para el software.

La sección de estándares (SRS-27) que establece una guía para delimitar los alcances del software y ofrece normas para la revisión del desarrollo del mismo, también una sección de atributos del software (SRS-28) que resume las características positivas del producto.

7. Arquitectura del sistema

7.1. Vista funcional del sistema

El análisis del sistema desde el punto de vista funcional es fundamental, ya que, permite comprender las funcionalidades que presenta el sistema. Además, permite asociar las soluciones determinadas a partir de la exploración del espacio de diseño con el funcionamiento del sistema planteado en el concepto de operaciones.

Para realizar la descomposición funcional del sistema se hace uso del Diagrama de Definición de Bloques (BDD, del inglés *Block Definition Diagram*), el mismo se muestra en la figura 18 y se descompone en 4 secciones: estimación y control de orientación, estimación y control de órbita, comunicación e interfaz eléctrica.

En las funciones de estimación y control, el sistema realiza la medición a partir de los diferentes sensores, así como la ejecución de los diversos algoritmos y el control por medio del uso de los actuadores. En la sección de comunicación, el sistema realiza la comunicación con la computadora a bordo para la notificación de anomalías, la ejecución de telecomandos y la transmisión de datos de su estado actual. En la sección de interfaz eléctrica se realiza el suministro de alimentación eléctrica a los diferentes elementos del sistema, así como el control de los diferentes sensores y actuadores.

Las funciones en las cuales se descompone el sistema son consistentes con el árbol de soluciones propuesto, ya que estas funciones logran dar solución a los requerimientos analizados previamente y su composición representa un sistema funcional acorde a lo establecido en el concepto de operaciones y casos de uso.

7.2. Síntesis de la arquitectura física del sistema

Para la síntesis de la arquitectura física del sistema se genera un diagrama N2 Chart del sistema mostrado en la figura 19, el cual permite identificar algunas de las funciones del sistema y sus respectivas entradas/salidas, además de las interfaces y componentes específicos con los que interactúan.

En este diagrama se aprecia la relación que existe entre los diferentes elementos que componen al sistema a nivel físico y la interacción entre los mismos que permite la realización de las funciones antes mencionadas.

Una vez realizado el diagrama N2 Chart del sistema, se procede al desarrollo del diagrama de bloques de la arquitectura física del sistema, mostrado en la figura 20, el mismo mapea las funciones del sistema a componentes y sus respectivas interfaces especificadas.

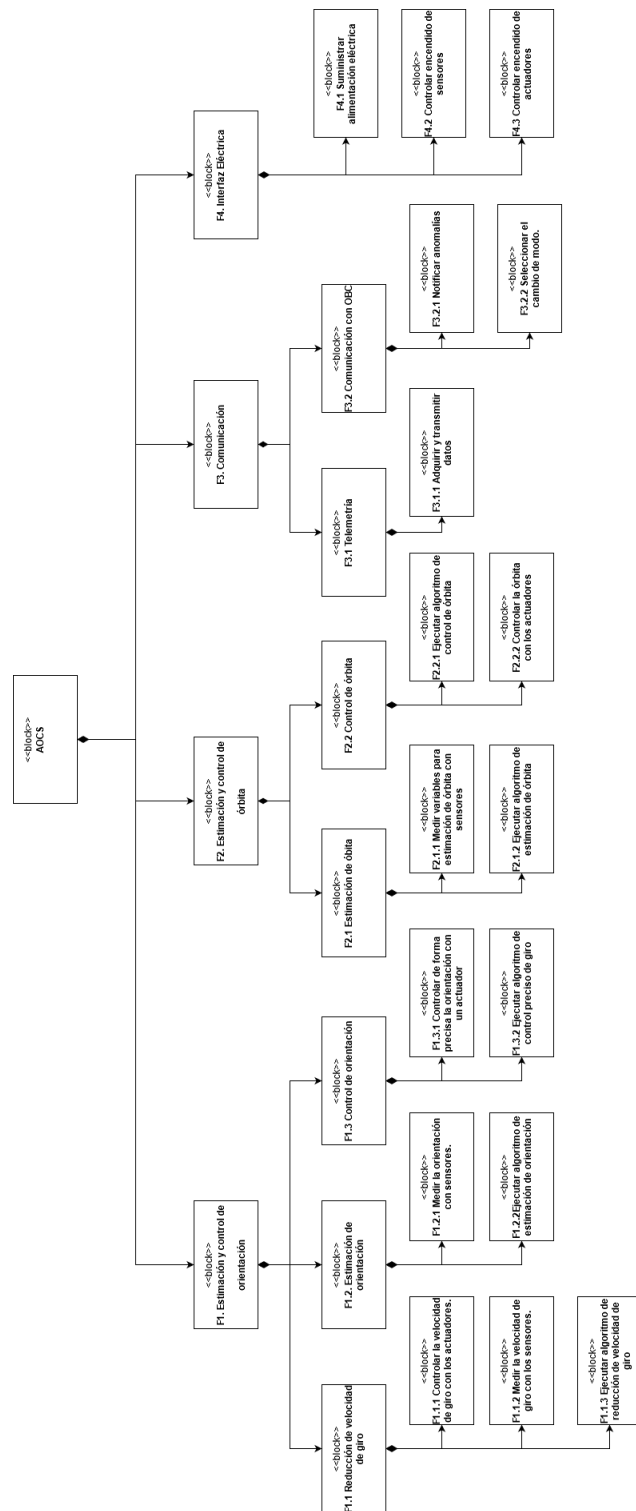


Figura 18: Diagrama Funcional de Definición de Bloques.

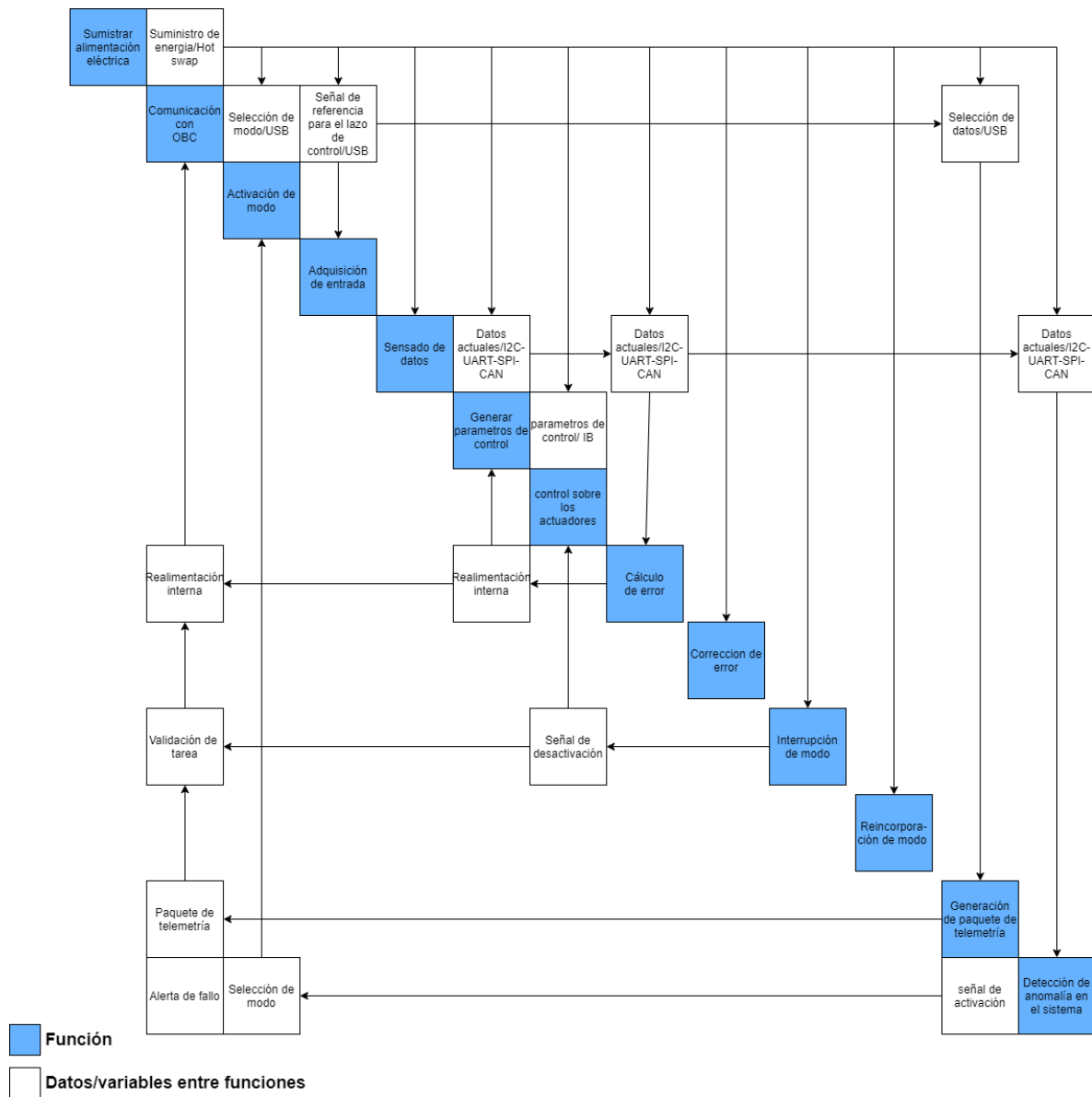
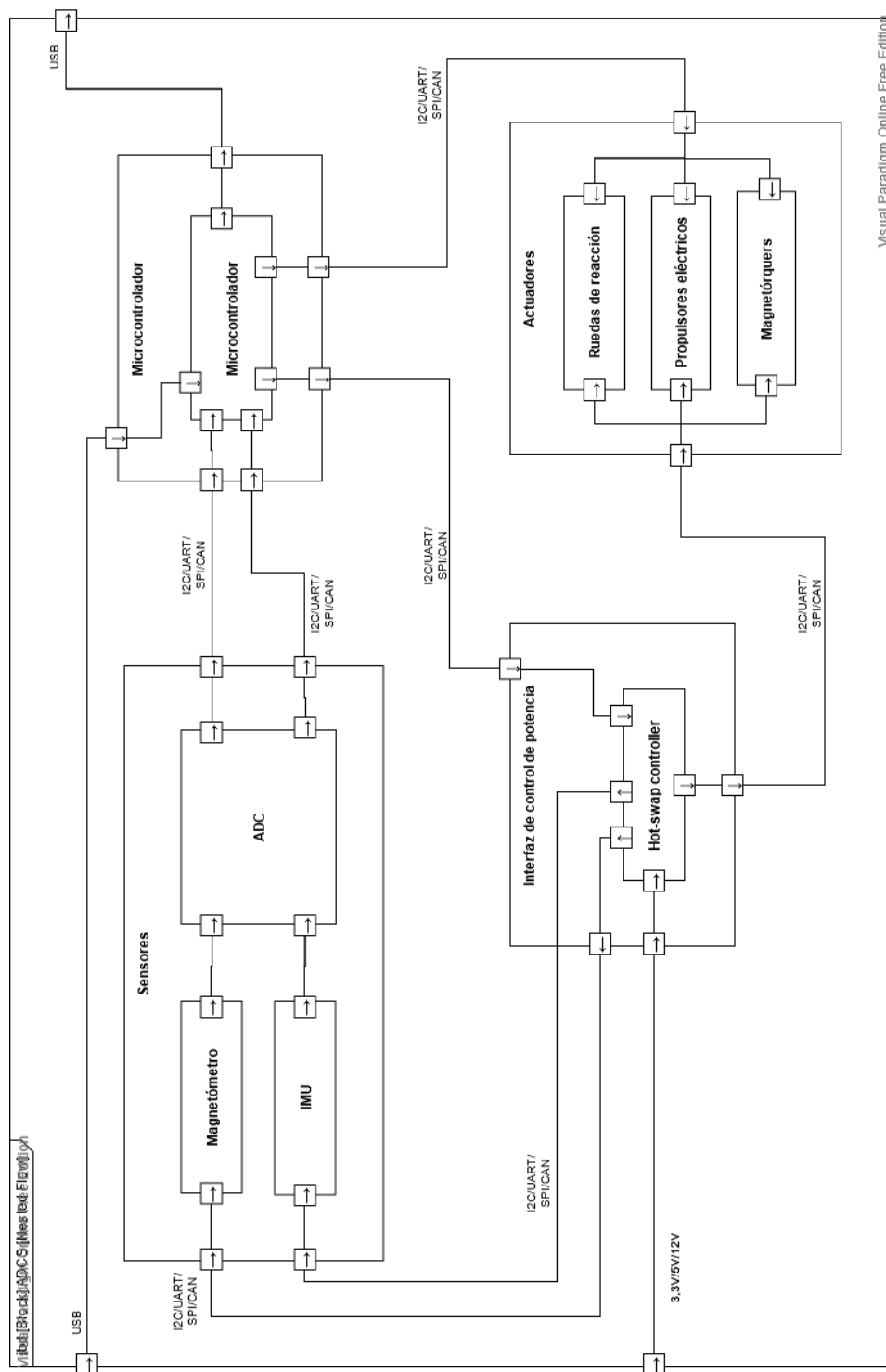


Figura 19: Diagrama N2 Chart del sistema.



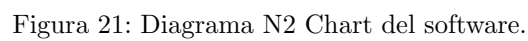
Visual Paradigm Online Free Edition

Figura 20: Diagrama de bloques de la arquitectura física del sistema.

7.3. Arquitectura de software

En la figura 21, se muestra el diagrama N2 Chart para el software, el cual muestra las funciones (representadas en recuadros de color azul) que deberá realizar el software, así como las diferentes interfaces o datos entre funciones (recuadros de color blanco). El propósito de este diagrama es observar la manera en que las diferentes funciones interactúan entre si, por ejemplo, en el caso de que se detecte una anomalía se activa la función Modo Seguro, esta envía una señal de apagado al Control de Actuadores para que dicha función ejecute una acción en los actuadores.

A partir del diagrama N2 chart se elabora un diagrama interno de bloques (IBD). Este tipo de diagramas describe la estructura interna de un subsistema, tomando en cuenta la relación entre sus partes, así como el flujo de señales entre los distintos bloques, donde se muestren los componentes tanto físicos como del software del sistema, según lo menciona [53]. Dicho diagrama se muestra en la figura 22.



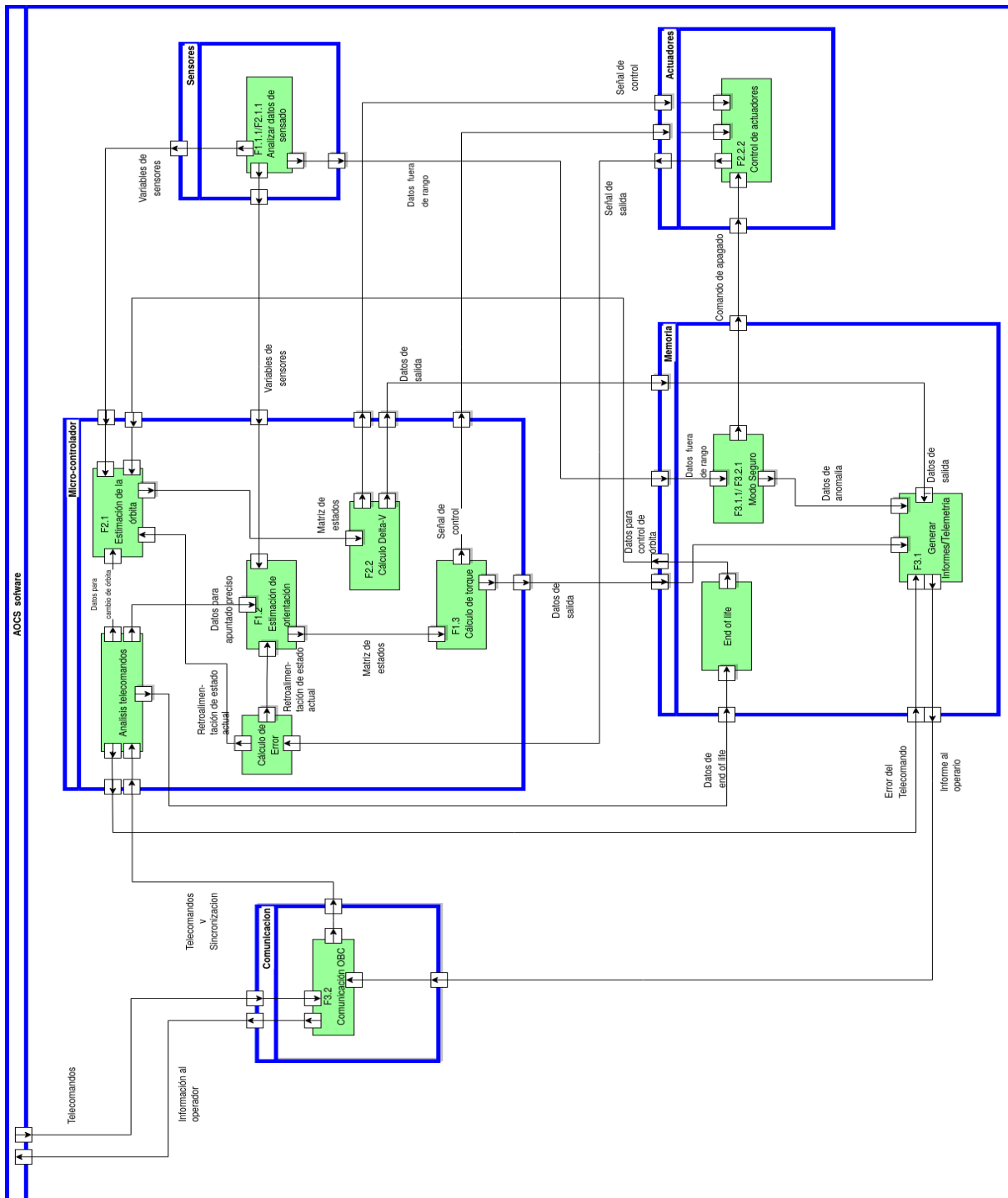


Figura 22: Diagrama IBD del software.

8. Estrategia de verificación de requerimientos

El propósito del proceso de verificación es proveer una evidencia objetiva de que un sistema o un elemento del sistema cumple con los requerimientos y características especificadas. En las secciones 17 y 18 se encuentran las tablas generadas con esta estrategia de verificación. Es importante definir un método apropiado para cada acción de verificación. Una buena definición del método de verificación toma en cuenta las siguientes preguntas:

8.1. ¿Cómo se verifica?

Existen 4 métodos de verificación estándares utilizados para obtener la evidencia de que los requerimientos se han cumplido. Estos se extrajeron de la norma IEC-29148 2018 [54]. Son los siguientes:

- Inspección:

Se trata de una verificación de las propiedades del objeto por medio de la examinación y observación. Generalmente, es un método no destructivo, y en muchas ocasiones se utilizan los sentidos de la vista, escucha, olor, tacto y sabor, así como la manipulación física simple.

- Análisis o Simulación:

A través de datos analíticos o simulaciones en condiciones definidas se demuestra el cumplimiento teórico del requerimiento. Este método se utiliza cuando una prueba en condiciones realistas no es posible realizarla o no es rentable.

- Demostración:

Consiste en una verificación cualitativa del rendimiento funcional sin o con el mínimo de instrumentación o equipo de pruebas. Se llevan a cabo una serie de pruebas estimulando el sistema para demostrar que este responde apropiadamente o para demostrar que los operadores son capaces de realizar sus funciones cuando utilizan el sistema. La idea es comparar las observaciones con las respuestas predeterminadas. La demostración es apropiada cuando los requerimientos o especificaciones son dados en términos estadísticos.

- Prueba:

Por medio de este método se puede verificar cuantitativamente las capacidades de operación, soporte y rendimiento de un dispositivo en condiciones reales o simuladas. En las pruebas se suele utilizar equipo o instrumentación especializada para así obtener datos más precisos.

8.2. ¿Quién o quienes verifican?

La persona que verifica todos los requerimientos y especificaciones del sistema es la encargada de verificación y validación. Esta tiene la tarea de determinar el método que

mejor se adecúa para realizar la verificación, y llevar un control del estado en el que se encuentra el proceso de verificación.

8.3. ¿Cuándo se verifica?

Una vez los requerimientos son planteados por la división del sistema y del software, se formula un plan para programar el tiempo en que se realizará la verificación. Este plan debe ser basado en los eventos y no en un calendario. La persona con las funciones de validación y verificación tiene que indicarle a los encargados de cada tarea los procesos y pasos a seguir para llevar a cabo las pruebas pertinentes.

8.4. ¿Dónde se verifica?

Para llevar a cabo la verificación por cualquiera de los métodos, se debe hacer en un lugar adecuado. Es necesario que la persona que formuló el requerimiento consulte con el miembro encargado de validación y verificación para que apruebe el entorno en el que se llevará a cabo.

9. Estrategia de gestión de riesgos

En el transcurso de todo proyecto existe una incertidumbre que puede causar accidentes, y en consecuencia pérdidas económicas y humanas. La principal razón de contar con una gestión de los riesgos es minimizar la probabilidad de sucesos que presenten un riesgo de alguna índole, y tener un plan de contingencia en caso de que sucedan. Es importante tener en cuenta que estos sucesos pueden tener efectos en las diferentes áreas de un proyecto, como ambiental, técnica, financiera, legal y social.

Es muy común pensar que se posee un control total en los aspectos del proyecto, pero siempre existirán incertidumbres que tienen influencia en las empresas y las personas que trabajan en estas, y es aquí donde la gestión de riesgos juega un papel primordial. Un proyecto puede ser incluso cancelado si se presenta un impacto considerable de condiciones no deseadas que atenten contra su desarrollo y la vida de personas, por eso es importante siempre proceder con una gestión de riesgos que ayude a evitar o manejar este tipo de escenarios.

Según [55], algunas ventajas generales que ofrece la gestión de riesgos son las siguientes:

- **Facilidad de identificación de amenaza:** Su uso principal es la identificación de amenazas, el poder saber cual puede ser una posible amenaza de antemano es primordial para poder contrarrestar rápidamente.
- **Mejor probabilidad de alcance de objetivos:** Permite proceder de forma más sencilla, evitando o resolviendo amenazas incluso antes de que sean consideradas como tales.
- **Mejora la adaptación de la empresa al entorno:** Al estudiar riesgos, se comprende un contexto más adecuado para el entorno con el que se trata, sea social, económico o ambiental.
- **Mejora proactividad:** Ya que los riesgos pueden venir de cualquier punto en una empresa o proyecto, la retroalimentación que los empleados y gerentes pueden proporcionar es de gran ayuda y promueve la productividad en la zona de trabajo.
- **Mejora eficiencia a asignación de recursos:** No todos los riesgos pueden ser evitados y para tratar las amenazas se necesitan recursos. El clasificar y analizar los riesgos permite una adecuada asignación de recursos para cada caso.
- **Potencia confianza de grupos de interés:** El manejo adecuado de los riesgos da una mejor credibilidad y al mismo tiempo ofrece un seguro para los colaboradores externos.
- **Facilita toma de decisiones:** La toma de decisiones posee su coste administrativo y el tomar una dirección equivocada aumenta considerablemente el coste de los proyectos. La gestión de riesgos disminuye la probabilidad de tomar una decisión que cause problemas futuros.

- Mejor capacidad de transformación: El hecho de saber de los riesgos ofrece una mejor traslación si se quisiera hacer cambios empresariales.

Para la gestión de riesgos existen varias metodologías para explorar algunas contenidas en [56] y se hará una comparación entre estas para decidir la mejor opción para Clarity.

- Lógica Difusa FMEA.
- Project Management Institute PMBOK para gestión de riesgos.
- Octopus SME (Método Situacional de Ingeniería)-enfoco en gestión de riesgos (OSRiMA).
- Risk Management MDD (Enfoque de Desarrollo Dirigido por Modelos.
- Metodología basada en FD AFNOR X50-117.
- RAM (Método de Análisis de Riesgos).
- Método de Schmidt Brazil.

Metódo	Enfoque	Sector de aplicación
FMEA	Sirve para la gestión de riesgo en la programación de software.	Probar proyectos de Software.
PMBOK	Planificación de la gestión, identificación, análisis, planificación de respuesta a los riesgos.	Se usa en general pero con enfoque en software, ingeniería y construcción.
SME	Asignar riesgos de acuerdo a la situación.	Proyectos de software e ingeniería.
MDD	Plantear un modelo inicial y, de este, nuevos modelos secundarios, para así variarlos de acuerdo con el plan de la empresa.	Software en pequeñas y medianas empresas.
FD	Identificar rápidamente parámetros como impacto y probabilidad de riesgos.	Centrado en sector industrial y manufacturas.
RAM	Mejora continua de la organización para aumento en producción y competitividad.	Se utiliza en general pero centrado en ingeniería y construcción.
Schmidt Brazil	Buscar riesgos en una compañía a partir de entrevistas a los involucrados del proyecto.	Uso general, pero centrado en incubación de nuevas tecnologías.

Cuadro 17: Comparación de distintos métodos para la gestión de riesgos.

En el cuadro 17 se presenta una comparación entre las distintas metodologías mencionadas. Clarity es un proyecto que comprende áreas de software y hardware aplicados a la ingeniería para el desarrollo de un AOCS. Por lo tanto, la metodología FMEA no es adecuada, ya que esta se especializa para proyectos de software. SME parece cumplir con los requisitos necesarios, pero su gestión de riesgos se basa en las experiencias de proyectos pasados. Clarity es el primer proyecto que lleva a cabo Orbital Guidance, por

lo que esta opción no es recomendada. MDD tampoco aplica para el proyecto Clarity, ya que solo cubre los aspectos de software, y está orientada solo a PYMES. RAM, en cambio, no toma en cuenta la parte de software, así que tampoco es una opción conveniente. Schmidt Brazil se enfoca en el desarrollo de nuevas tecnologías, y aunque Orbital Guidance busque desarrollar con Clarity un AOCS con desempeño avanzado, no hace uso de nuevas tecnologías, entonces esta metodología queda descartada también. El sector de aplicación de PMBoK es el más apropiado para el proyecto, su área de uso es multidisciplinaria y se centra en software, ingeniería y construcción. Por lo tanto, esta será la metodología a seguir para la gestión de riesgos que Orbital Guidance utilizará para el desarrollo del proyecto Clarity.

9.1. Metodología PMBoK

Desde el punto de vista de PMBoK, la gestión de riesgos es un área que se lleva a cabo en conjunto con los equipos de planificación, ejecución, seguimiento y control de acuerdo al procedimiento en [57]:

Equipo de planificación

1. Planificar la gestión de riesgos: Se plantea un plan de gestión de riesgos en el que se define la manera en la que se ejecutarán las tareas de gestión de riesgos.
2. Identificar los riesgos: Se obtienen el Registro de Riesgos y el Informe de Riesgos, documentos que serán importantes para la gestión de riesgos.
3. Realizar un análisis cualitativo de los riesgos: Se categorizan los riesgos individuales del proyecto. Los riesgos que puedan tener un mayor efecto se analizarán por medio de un análisis cuantitativo.
4. Realizar un análisis cuantitativo de los riesgos: Se define el riesgo general del proyecto, el cual está comprendido por la unión de todos los riesgos individuales de gran efecto del proyecto.
5. Planificar la respuesta ante los riesgos: Se planifican y desarrollan las acciones de respuesta ante todos los riesgos que presenta el proyecto.

Equipo de Ejecución

6. Implementar las respuestas a los riesgos: Se definen disparadores o señales de aviso que indiquen la presencia de los riesgos, y se intenta llevar a cabo las acciones planteadas en el punto anterior.

Equipo de Seguimiento y Control

7. Monitorear los riesgos: Se lleva a cabo un seguimiento de los riesgos continuamente durante el tiempo del proyecto para analizar qué riesgos han desaparecido, cuáles han tenido un cambio en su probabilidad o impacto, y si han aparecido nuevos.

10. Estrategia de gestión financiera

La estrategia financiera de acuerdo a [58] define el plan de acción destinado a permitir que la empresa logre el equilibrio financiero mediante el manejo eficaz y eficiente de los recursos que se pueden obtener o del que se tiene a disposición. Aunque, el objetivo de la estrategia financiera evoluciona se puede establecer ya sea a corto, medio o largo plazo según sea necesario, estos tiempos de establecimientos estratégicos pueden incurrir a:

- **A corto plazo:** el objetivo de la estrategia de financiación es permitir que el proyecto empresarial logre estimar lo mínimo requerido. De hecho, antes de que se lance un producto o servicio, su desarrollo puede llevar tiempo y requerir una financiación significativa. En esta etapa, la estrategia de financiación consiste, en buscar las distintas formas de financiamiento que se pueden plantear para iniciar la actividad.
- **A medio plazo:** a medio plazo, el objetivo será mejorar los productos o servicios existentes o desarrollar nuevas ramas de actividad. Para ello, la estrategia de financiamiento puede consistir en apoyarse únicamente en los beneficios de la empresa o, por el contrario, en buscar financiación externa.
- **A largo plazo:** la estrategia de financiación a largo plazo consiste en racionalizar los costes de producción para mejorar el desempeño financiero de la empresa. Es decir, el objetivo es conseguir financiar la actividad gracias a los ingresos únicos, evitando en la medida de lo posible recurrir a financiación externa.

Para diseñar y establecer la estrategia financiera de la empresa, existen diversas metodologías que dependen de las necesidades de la empresa, sin embargo, para emprendedores generalmente es mucho más conveniente emplear una estrategia basada en la elaboración de una **previsión de flujo de caja**.

Según [59] la previsión de flujo de caja es un documento que permite al emprendedor evaluar su capacidad para financiar su actividad y su desarrollo durante un periodo determinado. Mediante este documento, el empresario asegura que podrá hacer frente a sus gastos. Esto también le permite anticipar la estrategia de financiación que se pondrá en marcha en caso de periodos de baja actividad. Es decir se obtiene un pronóstico del estado financiero de la empresa realizando una estimación en un determinado periodo.

A Partir de este documento un emprendedor puede plantear estrategias financieras a corto, medio y largo plazo y que puede elegir el tipo de financiamiento más adecuado para la actividad. Mediante esta estrategia se elabora una tabla financiera que enumera todos los flujos financieros (gastos e ingresos) que pueden ocurrir durante el período determinado en estudio.

Mediante la tabla financiera permite organizar y controlar el presupuesto de la empresa de forma diaria, mensual y anual.

Al poner en marcha el proyecto, el objetivo de la previsión de flujo de caja es permitir que la empresa inicie su actividad asegurándose de que dispondrá de los fondos necesarios. Por otro lado, le permite anticipar con calma los períodos de baja actividad, así como las dificultades financieras al que podrían enfrentarse.

A largo plazo, la previsión de flujo de caja permite a la empresa pronosticar, desde un punto de vista financiero, las sumas a liberar para el desarrollo de sus nuevos proyectos es decir en la sección de inversiones de la empresa.

Finalmente, el pronóstico de flujo de efectivo es una parte integral de la estrategia financiera. El objetivo es, por supuesto, que la empresa encuentre su equilibrio financiero tal que en ningún momento quede sin efectivo o con guardia baja en periodos con dificultades de operación.

Para lograr estimar una correcta elaboración del flujo de caja efectivo es importante establecer los recursos con los que se cuentan o con los que posiblemente se buscará conseguir es por ello que se debe realizar un pequeño estudio de formas en cómo una empresa puede lograr financiamiento, lo cual se muestra a continuación en el siguiente apartado.

10.1. Obtención de financiamiento

Las necesidades de financiación no serán las mismas para una empresa que se hace cargo de un negocio existente que para una empresa que lanza un proyecto innovador. Por tanto, es importante encontrar el método que mejor se adapte a la financiación de proyectos empresariales.

- **Auto Financiamiento:** es un método en el que la empresa logra su equilibrio financiero mediante capital propio, que generalmente es aporte de asociados, sin embargo, este método de financiación ideal suele ser difícil de conseguir en la práctica.
- **Subsidios comerciales:** al establecer o hacerse cargo de una empresa, se pueden poner a disposición del emprendedor muchas ayudas. Entre ellos, es posible citar las subvenciones empresariales que son ayudas públicas a disposición de los empresarios en determinadas condiciones.
- **El préstamo profesional:** es una financiación externa mediante la cual un establecimiento bancario o financiero pone una cantidad a disposición de la empresa. Sin embargo, este método de financiamiento tiene un costo para la empresa, ya que se requiere devolver el préstamo, así como pagar los intereses del préstamo.
- **Crowdfunding (crowdlending):** Existen dos tipos de financiación en los que la empresa utiliza aportaciones públicas para desarrollar su proyecto. En el primer caso, se trata de una donación con o sin contraprestación. En el segundo caso, se trata de un préstamo gratuito o pagado.
- **Fundraising:** este método permite a la empresa aumentar su capital social gracias a la llegada de inversores a un centro social. Sin embargo, para encontrar inversores es necesario tener un proyecto realmente convincente.
- Otra posible fuente de financiamiento a futuro sera posible atraves de la **agencia espacial costarricense**, dado a que dentro de sus objetivos esta a como indica [60], en el articulo 4 punto O, dentro del marco de sus funciones se establece que

la agencia deberá *Contribuir con el desarrollo de actividades de cooperación con instituciones nacionales de carácter académico, tecnológico y profesional, dedicadas a estudios de especialidades relacionadas con la materia*, esto implica que se obtendrá apoyo por parte de dicha institución para propiciar avances en el desarrollo de sistemas para pequeños satélites, lo cual a su vez se ve apoyado por entes financieras que podrían brindar incluso apoyos económicos, esto como estrategia a largo plazo. Además O.G se puede ver apoyado gracias a otros puntos que sugieren que la agencia espacial Costarricense dentro de sus funciones deben:

e) Promover el desarrollo de los sistemas espaciales y los medios, la tecnología e infraestructura necesarios para la consolidación y autosuficiencia de este sector en Costa Rica.

f) Facilitar la incorporación del sector productivo a esta actividad, a fin de que se adquiera competitividad en los mercados de bienes y servicios espaciales.

g) Apoyar y ejecutar los protocolos de intercambio y colaboración con el sector productivo para que se incorpore y participe competitivamente en los mercados de bienes y servicios espaciales., y de manera análoga sugiere que O.G podría tener gran apoyo a largo plazo por parte de la agencia.

10.2. Capital inicial de trabajo

Como capital inicial de trabajo se buscará fuentes de financiamiento e incluso entes que deseen asociarse con OG. Para OG de acuerdo al modelo de negocio establecido se buscará obtener medios de financiamientos de fondos no reembolsables que ofrece distintas entidades financieras de Costa Rica tales como la MICCIT, además de optar por el acceso a capital semilla brindado por el sistema de banca para el desarrollo (SBD), ya que a como indica [61] capital semilla son recursos generalmente provenientes de fuentes estatales que se otorga a emprendimientos o startups en sus etapas iniciales debido a determinadas características que en ocasiones pueden ser de difícil financiamiento bajo los esquemas tradicionales es decir recursos bancarios, dado a su alto riesgo o inexistencia de activos que respalden un crédito común.

De lo anterior se establece como estrategia viable para O.G es lograr llevar a cabo el proceso de incubación con TEC Emprende Lab, máxime a que actualmente se ha convertido en agencia operadora de capital semilla a como ha indicado [62], esto implica que es posible lograr obtener fondos del SBD al realizar el proceso de incubación que comprende 3 etapas a como ha sugerido [62], los cuales son:

- **Pre incubación:** los emprendimientos obtienen las bases necesarias para comenzar su negocio, sin embargo mediante esta estrategia se establece avances importantes para avanzar en esta etapa.
- **Incubación Alfa:** validación de propuesta de valor con el mercado, OG ha realizado un estudio de mercado que permite en conjunto a TEC emprendelab realizar la validación del mismo y en caso de ser necesario, también para hacer los ajustes necesarios.

- **Incubación Beta:** O.G inicia los procesos de crecimiento en el campo tecnológico, pasando de una idea emprendedora validada a la generación de ventas.

Además debido a que los asociados a OG son aún estudiantes, no se puede contar con el método de auto financiamiento, sin embargo pese a que en CR existen diferentes métodos de financiamiento de acuerdo a [63] mediante el índice de competitividad global de los últimos años se ha destacado como principal debilidad de Costa Rica, la dificultad de acceso a crédito y la falta de fuentes alternativas de financiamiento para emprendedores. Esto coloca al país en una situación rezagada en cuanto a apoyo financiero a las iniciativas emprendedoras, en comparación con el resto de países cuyo motor es la innovación.

Del apartado anterior se puede observar que buscar fuentes de financiamientos no garantiza que se obtendrá por lo que es necesario incluir dentro de la estrategia métodos alternativos que permita a OG iniciar sus operaciones, algunos de los métodos pueden ser por crowdfunding, un préstamo bancario no es primera opción hasta que se logre establecer mediante la previsión de flujo de caja si OG puede responsabilizarse de una deuda, de acuerdo al resultado, podría ser o no una opción viable.

10.3. Capital para inicio de operación

Esperando que se pueda lograr sobrellevar las distintas etapas en colaboración con TEC Emprende Lab como capital para inicio de operación se espera acceder a este mediante dicha instancia, sin embargo en caso de no ser posible y se requiera realizar el proceso directamente con SBD es importante que se pueda mitigar las causas de rechazo por entidades de financiamiento, por tanto, es relevante conocer sobre estos aspectos para lograr establecer un correcto alineamiento en miras de minimizar las probabilidades de rechazo , según [63] indica que muchas solicitudes son rechazados debido a diversos incumplimientos que se pueden observar en la figura 23,

Entidades Financieras	Fondos Especiales
Incumplimiento de requisitos	Incumplimiento de requisitos
Capacidad de pago	Plan de inversión
Historial crediticio malo	Capacidad de pago
Falta de garantía	Malas referencias crediticias
Calidad de la información financiera	Viabilidad del proyecto
Fiadores	Deudas
Problemas con los planes de inversión	Falta de garantía

Figura 23: Tabla de causa de rechazos más comunes.
Obtenido de [63].

De acuerdo a la estrategia basada en la previsión de flujo de caja es importante conocer sobre cuales serian las principales fuentes de ingreso para la empresa o emprendimiento, lo cual se observa en el siguiente apartado.

10.4. Fuentes de ingreso

De acuerdo al modelo de negocio establecido las principales fuentes de ingreso de O.G estará dado por:

- Comercialización de productos para pequeños satélites (AOCS).
- Venta de servicios profesionales.
- Financiamientos adicionales (rige en caso de poder optar por un crédito).

Para llevar a cabo la estrategia por medio de la previsión de flujo de caja es necesario contar con la estructura general de costos en el que incurre la startup o emprendimiento, en el siguiente apartado se muestra dicha estructura.

10.5. Estructura de Costos

Como indica [64], los costos pueden dividirse en costos variables y costos fijos. Los costos variables totales son aquellos que varían directa y proporcionalmente con los cambios en el volumen. Los costos fijos totales, por otra parte, son aquellos que no se modifican con los cambios en el volumen dentro del rango relevante, en este apartado se indicarán ambos tipos de costos además, de acuerdo al modelo de negocio establecido por O.G los costos más relevantes en el que incurriría se muestran a continuación

- Costos de logística
- Salarios
- Cargas Sociales
- Costo de manufactura
- Costo en Hardware
- Licencias de software
- Costo en outsourcing o Leasing
- Costos en infraestructuras y servicios

Es importante destacar que los gastos en servicios incluyen agua, luz, internet y otros.

Para la estrategia, es necesario establecer las inversiones que realizará O.G para obtener una mejora constante en sus productos o para el proceso de desarrollo de nuevos productos, los cuales se muestran en el siguiente apartado.

10.6. Inversiones

De acuerdo al modelo de negocio las inversiones de O.G estarán centrados en 3 áreas principalmente los cuales consisten en:

- Desarrollo de subsistemas espaciales
- Investigación y desarrollo de tecnología actualizada entorno al diseño de subsistemas espaciales.
- Asesoría especializada

10.7. Análisis Financiero

De acuerdo con [64] esta es la etapa final de la estrategia financiera de negocios y corresponde al de las etapas anteriores en cuanto a la determinación de la inversión inicial y del costo operativo según el periodo en estudio, es decir si se realiza para corto, medio o largo plazo.

Dentro de esta ultima etapa se buscará obtener herramientas que permita validar la viabilidad del proyecto, empleando criterios que permitan realizar la tabla numérica de la previsión de flujo de caja y que este se vea apoyado por firmes criterios de evaluación del proyecto, tal que permita un adecuado análisis de costos, para finalmente lograr estimar las proyecciones financieras necesarias de acuerdo a como sugiere [64], mediante el balance general que se obtenga.

11. Estrategia de gestión social y ambiental

En el desarrollo de actividades de una empresa, es importante tomar en cuenta el entorno en el que esta se ve inmersa. Dos componentes relevantes son el entorno social y el entorno ambiental. Sobre el entorno social de Orbital Guidance, este se compone de la población costarricense y centroamericana, además de las personas que integran a las organizaciones clientes de nuestro producto Clarity. Para estas personas (y haciendo énfasis en el planteamiento de la misión y visión de O.G) el equipo tiene el interés de mostrar las oportunidades de desarrollo y de crecimiento en el ámbito espacial, dentro del contexto latinoamericano. En el contexto ambiental, el entorno se divide en dos: Tierra y órbita. Las acciones realizadas en pos de la producción de Clarity tienen repercusiones en el ambiente terrestre, las cuales han de ser minimizadas; mientras que en órbita, las acciones tomadas por los operadores de las diferentes misiones que integren el dispositivo Clarity (a quienes atañen directamente las directrices presentadas por UNOOSA en [20]) serán las que repercutan en la conservación del entorno orbital como un recurso natural.

Por lo anterior, dado el interés conjunto, se debe plantear una estrategia de gestión conjunta para los ámbitos social y ambiental. Se plantea en [65] una estructura para el establecimiento de un plan de gestión social, el cual se tomó como base para incorporar elementos de gestión ambiental tal que se incluyan las siguientes iniciativas:

11.1. Programa de información y comunicación

Este programa incluirá charlas técnicas contratadas, charlas de divulgación, gestión de redes sociales a manera de divulgación científica y colaboración con otros entes de divulgación para la visibilización al público general de las actividades en el ámbito espacial dentro del marco del desarrollo latinoamericano. Dentro de los tópicos a tratar en este programa estarán los referentes al desarrollo tecnológico en América Latina, al espacio, a la tecnología satelital y especialmente a los conceptos que engloban a los subsistemas del eventual catálogo de Orbital Guidance.

En el ámbito comercial, la información y comunicación se realizará de manera personalizada con los adquirentes de los productos de Orbital Guidance. La comunicación con estos entes tiene como fin la instrucción sobre la integración, uso y el correcto proceso de desecho mediante maniobras en órbita, esto último con el fin de contribuir en el aumento del porcentaje de misiones que cumplen con las directrices de UNOOSA para la reducción de desechos espaciales.

Integrando al público general y a los clientes/adquirentes del producto Clarity, se presentarán temas de concientización sobre la preservación del espacio y, especialmente, las órbitas geocéntricas, exponiendo tanto su importancia en el desarrollo de actividades comerciales, de investigación, de comunicación y exploración, como también su valor como recurso natural agotable. La exposición del posible advenimiento del síndrome de Kessler junto con sus consecuencias en las órbitas terrestres es importante para mostrar a la sociedad la importancia de la conservación de este recurso.

11.2. Programa de acompañamiento social

Como parte del programa de acompañamiento social que se plantea en Orbital Guidance, está la propuesta de proyectos de graduación o pasantías donde se capacitarán profesionales en el área espacial. Esto con el fin de generar oportunidades en esta rama que se viene desarrollando en el país y hacer crecer a su vez la red de contactos que incursionan en el área espacial.

11.3. Programa de seguimiento y evaluación

Para la empresa, Orbital Guidance es de suma importancia ser un ente en pro al desarrollo sostenible, por lo que a la hora de relacionarse con socios de manufactura y venta de componentes para negocios comerciales, se busca que dichas organizaciones vayan acorde con el enfoque que se tiene. Para esto se realiza un análisis e investigación previa de los métodos y materia prima que utilizan como su viabilidad en términos de conservación del ambiente.

Una vez se obtiene el producto final, se busca que se de un buen manejo de este. Se debe de tomar en cuenta el modo de uso para mantener la funcionalidad del sistema al máximo, vida útil de la estructura y posteriormente la manera correcta de desechar el producto. Además del programa de información y comunicación, se tendrá canales de servicio al cliente personalizados para así tener una relación más estrecha con el consumidor, que este reciba las indicaciones necesaria de manera más clara y se logre cumplir con lo establecido en términos sociales y de ambiente.

11.4. Gestión de residuos eléctricos y electrónicos

Si bien este punto no está presente en la estructura propuesta en [65], es de vital importancia en el desarrollo de las actividades de empresas que manejan dispositivos eléctricos y electrónicos contar con un plan para gestionar los residuos que sus actividades generan.

Para la ejecución de la gestión de dichos residuos se exploró la metodología expuesta en la Guía Técnica para la Gestión Integral de los Residuos Electrónicos y Eléctricos [66], cuyas generalidades se presentan en la sección 12 de este documento.

Si bien en esta guía se exponen lineamientos generales para la gestión integral de desechos electrónicos (GIRE), existe una diferencia fundamental entre el ciclo de vida de los residuos electrónicos tomados en cuenta en dicha guía y el ciclo de vida útil de los dispositivos desarrollados por Orbital Guidance, para los cuales la recepción por parte de un punto de venta o por un ente gestor de residuos no aplica, ya que el dispositivo estará en órbita. Aún así, los dispositivos, componentes y elementos a utilizar durante el desarrollo de las actividades de Orbital Guidance sí estarán sujetos al ciclo de vida o ruta descrita en la figura 24, por lo que O.G se mapea al rol de *Usuario* (asociado a la categoría de Comprador/Generador), adquiriendo las responsabilidades de informarse sobre las maneras de gestionar dichos elementos y de hacer entrega de estos (de manera directa o indirecta) a un gestor autorizado.

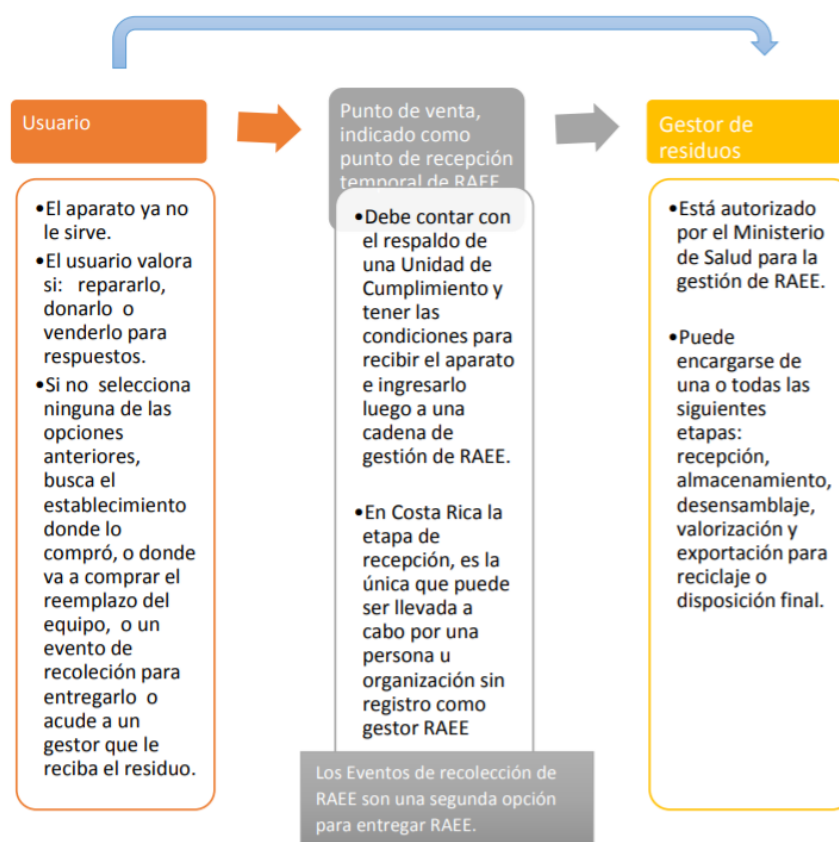


Figura 24: Ciclo de vida/Ruta de un residuo electrónico en Costa Rica.
Obtenido de [66].

12. Normativa y regulaciones

De acuerdo con [67], las normas y estándares son esenciales para el desarrollo de proyectos en todas las áreas, ya que establecen las regulaciones y procedimientos a seguir para la obtención y el uso de un producto. Estos pueden incluir aspectos de software, hardware, resultados de análisis y pruebas, protocolos, definiciones, entre otros, que son de gran interés durante la realización de un proyecto.

Entre los beneficios de las normas se pueden mencionar la reducción de esfuerzos y recursos, cierran brechas tecnológicas, reducen los conflictos en regulaciones, facilitan el comercio, ofrecen protección contra litigios y permiten la estabilización y desarrollo de mercados.

Clarity es un proyecto que tiene el propósito de diseñar un subsistema AOCS para constelaciones de satélites. Todo el ciclo de vida del proyecto debe basarse en normas y estándares, su definición y planteamiento, su diseño, su desarrollo e implementación, manejo y uso, incluso los procedimientos para su fin de ciclo de vida. En esta sección se presentan las características, normas, regulaciones y leyes que se utilizan durante el proyecto Clarity y que son necesarias acatar para su desarrollo adecuado

12.1. Requerimientos del Proyecto

Los requerimientos del proyecto serán expuestos tomando como base la norma ISO/IEC/ IEEE 29148-2018: Systems and software engineering-Life cycle processes- Requirements engineering. En esta norma se establecen los puntos a desarrollar para los requerimientos del proyecto, así como su contenido y el formato. La norma [54] propone las especificaciones de los requerimientos, y los se separan en las siguientes clases:

- Requerimientos del negocio.
- Requerimientos de involucrados.
- Requerimientos del sistema.
- Requerimientos del software.

De las anteriores categorías de requerimientos, se procederá a desarrollar los correspondientes al sistema y al software, en los cuales también se podrán encontrar los aspectos relacionados a la verificación para estas áreas.

12.2. Leyes

12.2.1. Guía Técnica para la Gestión Integral de los Residuos Electrónicos y Eléctricos.

Esta es una guía que busca dar recomendaciones, ideas y buenas prácticas que promuevan una gestión integral de los RAEE (Residuos Electrónicos y Eléctricos). Una gestión integral de estos residuos incluye acciones para su valorización, así como una manipulación que no comprometa la seguridad para la salud humana y el ambiente, cuando los dispositivos electrónicos y eléctricos han terminado su ciclo de vida y son descartados por sus consumidores.

El objetivo de esta guía es reducir el peso y volumen de residuos electrónicos que se generan, así como su efecto contaminante, por medio de una recolección selectiva, la recuperación, reuso y reciclaje de materiales residuales [66].

12.3. Diseño de Sistema

12.3.1. Selección de Materiales y Procesos

El propósito de este estándar es definir los requerimientos y declaraciones aplicables a los materiales, partes mecánicas y procesos para satisfacer los requerimientos de rendimiento de la misión. El estándar también define los requerimientos de documentación y los procedimientos relevantes para obtener la aprobación para el uso de materiales, partes mecánicas y procesos en la fabricación de sistemas espaciales y equipo asociado. El estándar cubre lo siguiente, según [68]:

- Administración, incluyendo organización, revisiones, estado de aceptación y control de documentación.
- Criterios de selección y reglas.
- Evaluación, validación y calificación, o pruebas de verificación.
- Inspección en la adquisición y recepción.

12.3.2. Simbología Eléctrica

Los símbolos utilizados para representar componentes y otros elementos que conforman el sistema deberán seguir lo establecido en la norma (IEEE 315-1975). Este estándar provee una lista de símbolos gráficos para diagramas eléctricos y electrónicos, así como letras que designan la clase a la que pertenece cada uno de ellos. Los símbolos gráficos representan la función de una parte en el circuito, y son utilizados en diagramas de una línea, en esquemáticos o diagramas elementales, o en diagramas de conexión. Los símbolos gráficos también están correlacionados con listas de partes, descripciones o instrucciones en términos de designaciones.

Las letras para la designación de clases tienen el propósito de identificar un objeto en una categoría o clase. Esta asignación debe concordar con American National Standard Reference Designations for Electrical and Electronics Parts and Equipment, Y32.16-1975 (IEEE Std 200-1975) [69].

12.3.3. Planos y Diagramas

Los diseños de planos y diagramas deberán adaptarse al estándar ASME Y14.100-2017: Engineering Drawing Practices. Este estándar establece los requerimientos esenciales y documentos de referencia aplicables a la preparación y revisión de diseños de ingeniería generados manualmente o por computadora, y listas asociadas, a menos que se aplique a un estándar de especialidad. Es posible que este estándar deba ser utilizado en conjunto con los estándares ASME Y14.24, ASME Y14.34, ASME Y14.35M, y ASME Y14.41 [70].

12.3.4. Diseño de Circuitos Impresos

Para el diseño de circuitos impresos es importante usar como base las normas IPC, las cuales son unas de las más aceptadas para el diseño y fabricación de circuitos impresos o PCB's. Esta norma define todos los requerimientos específicos para diseñar y fabricar una placa de circuito impreso, y tiene efectos considerables para los que fabrican PCB's, ya que pueden afectar los parámetros de procesamiento de la fabricación. Dependiendo de las características y procedimientos del proyecto, se tendrá que estudiar varias de estas normas [71].

12.4. Diseño de Software

12.4.1. Lenguaje de Modelado

El propósito de ISO/IEC 19514:2017 es especificar el lenguaje para el modelado de sistemas (SysML), un lenguaje de modelado de propósito general para ingeniería en sistemas. Su intención es especificar el lenguaje para que los encargados de ingeniería en sistemas aprendan a aplicar y utilizar SysML; y puedan proveer retroalimentación para mejorar futuras versiones. Este estándar documenta la arquitectura del lenguaje en términos de las partes de UML 2 que son reutilizadas y las extensiones de UML 2. Además, provee ejemplos de cómo el lenguaje puede ser usado para resolver problemas comunes de la ingeniería en sistemas. SysML está diseñado para ofrecer construcciones simples pero poderosas para el modelado de una gran gama de problemas de la ingeniería en sistemas. Es particularmente efectivo en la especificación de requerimientos, estructura, comportamiento, asignaciones y limitaciones en las propiedades del sistema para apoyar el análisis de ingeniería [72].

12.4.2. Calidad de Software

La norma ISO/IEC 9126 contiene especificaciones para la evaluación de la calidad de productos de software. El estándar establece que la calidad de las partes del software puede ser detallada tomando como referencia una o más de seis características principales: funcionalidad, confiabilidad, usabilidad, eficiencia, mantenibilidad y portabilidad [73]. El cuadro 18 muestra la pregunta central que se aplica a cada una de las características básicas mencionadas. Estas también se dividen en sub características que permiten realizar un análisis más profundo para la evaluación de la calidad de los productos de software.

12.4.3. Evaluación de Software

Para la evaluación de software, se puede aplicar el estándar ISO/IEC 14598, el cual está muy relacionado con el estándar de calidad ISO/IEC 9126. ISO/IEC 14598 define los términos técnicos, contiene requerimientos generales para la especificación y evaluación de la calidad de software y clarifica los conceptos generales. Adicionalmente, provee un marco de referencia para evaluar la calidad de todos los tipos de productos de software y establece los requerimientos para los métodos de medición del producto

Característica	Pregunta Central
Funcionabilidad	¿Las funciones y propiedades satisfacen las necesidades explícitas e implícitas?
Confiabilidad	¿Puede mantener el nivel de rendimiento, bajo ciertas condiciones y por cierto tiempo?
Usabilidad	¿El software es fácil de usar y aprender?
Eficiencia	¿Es rápido y minimalista en cuanto al uso de recursos?
Mantenibilidad	¿Es fácil de modificar y verificar?
Portabilidad	¿Es fácil de transferir de un ambiente a otro?

Cuadro 18: Características de ISO-9126 y aspecto que atiende cada una [73].

de software y su evaluación. Esta norma está destinada para el uso de desarrolladores, compradores y evaluadores independientes, particularmente aquellos responsables de la evaluación del producto de software. Los resultados de la evaluación producidos por la aplicación de la norma pueden ser utilizados por los administradores o encargados para medir el cumplimiento de requerimientos y hacer mejoras necesarias. Los resultados de la evaluación también pueden ser utilizados por analistas para establecer las relaciones entre las métricas internas y externas [74].

12.4.4. Procesos de Medición

La norma ISO/IEC/IEEE 15939:2017 provee una elaboración del proceso de medición de las normas ISO/IEC 15288 y ISO/IEC 12207. El proceso de medición es aplicable para las áreas de la ingeniería de sistemas y software, así como para disciplinas administrativas. El proceso es descrito a través de un modelo que define las actividades del proceso de medición que son requeridas para especificar adecuadamente qué información es requerida en las mediciones, como las mediciones y el análisis de resultados deben llevarse a cabo, y cómo determinar si el análisis de resultados es válido. El proceso de medición es flexible y adaptable a las necesidades de diferentes usuarios. La norma identifica un proceso que apoya la definición de un set adecuado de mediciones que satisfacen necesidades específicas de información. Define las actividades y tareas que son necesarias para exitosamente identificar, definir, seleccionar, aplicar y mejorar las mediciones en un proyecto o estructura organizacional de mediciones, También provee definiciones para términos de mediciones comúnmente usados [75].

12.4.5. Calidad de Datos

ISO/IEC 25012:2008 define un modelo general de calidad para datos contenidos en un formato estructurado en un sistema de computadora. Esta norma puede ser utilizada para establecer los requerimientos de calidad de datos, definir la calidad de medición de datos, o planear y llevar a cabo evaluaciones de calidad de datos. Puede ser usada, con base en [76]:

- Para definir y evaluar requerimientos de calidad en los procesos de producción, adquisición e integración de datos.

- Para identificar criterios de confianza para la calidad de datos, lo cual es bastante útil para el rediseño, valoración y mejoramiento de los datos.
- Para evaluar que los datos cumplan con la legislación y requerimientos.

La norma clasifica atributos de calidad en 15 características desde dos puntos de vista: inherente y dependiente del sistema. Las características de la calidad de datos varían en importancia y prioridad para diferentes interesados.

12.4.6. Diagramas de flujo

ISO 9001 es un estándar que establece que los diagramas de flujo juegan un papel de suma importancia durante el análisis de procesos operacionales. Los diagramas de flujo son diseñados para dar un enfoque fácil de entender de flujos de trabajo e interrelaciones de actividades que usualmente son complejos. Los diagramas de flujo son comúnmente usados como parte de la documentación, ya que se han convertido en una herramienta para representar mapas de procesos y la interrelación de actividades. Son utilizados no sólo para describir o resumir procesos, sistemas o flujos de trabajo, sino también para el diseño, revisión y mejoramiento de estos [77].

12.4.7. Ciclo de vida del software

El estándar ISO/IEC/IEEE 12207:2017 provee procesos que pueden ser empleados para definir, controlar y mejorar los procesos de ciclo de vida del software en una organización o proyecto. Los procesos, actividades y tareas de este documento pueden también ser aplicados durante la adquisición de un sistema que contiene software, ya sea solo o en conjunción con ISO/IEC/IEEE 15288:2015, Systems and software engineering-System life cycle processes.

En el contexto de esta norma, hay un progreso de los sistemas hechos por humanos que usan un poco o nada de software a aquellos en los que el software es el interés primordial. Es muy raro encontrar un sistema complejo sin software, y todos los sistemas de software requieren un sistema de componentes físicos (hardware) para operar. La elección de si aplicar la norma ISO/IEC/IEEE 12207:2017 o ISO/IEC/IEEE 15288:2015 depende del sistema de interés. Los procesos en ambos documentos tienen el mismo propósito y resultado, pero difieren en las actividades y tareas para el desarrollo de ingeniería en software o ingeniería en sistemas, respectivamente [78].

13. Conclusiones y recomendaciones para la implementación del diseño

13.1. Conclusiones

- La sofisticación de los instrumentos científicos a bordo de satélites ha implicado un aumento en la tasa de transmisión requerida para el envío de los datos recopilados por el sistema, dando como resultado la selección de las comunicaciones ópticas como el método para realizar estas transmisiones. Este método de comunicación requiere niveles de precisión elevados, por lo que la inclusión de un sistema avanzado de control de orientación y órbita es vital para la operación de satélites modernos.
- Mediante la vista funcional del sistema se es posible establecer una correspondencia entre el dominio del problema y el dominio de la solución.
- El análisis tanto de los requerimientos del sistema y software, así como de aspectos derivados de las interacciones de los usuarios con el sistema, permitió seleccionar las soluciones especificadas en el cuadro 16. La verificación del cumplimiento de los requerimientos planteados se hará mediante las estrategias de inspección, análisis o simulación, demostración y prueba.
- A partir de la síntesis de las arquitecturas física y lógica del sistema se logró mapear las funcionalidades descritas en los diagramas BDD e IBD de las figuras 18 y 22 con los componentes, interfaces y algoritmos que se especifican en el cuadro 16.
- Mediante el análisis de diversos métodos de gestión de riesgos fue posible seleccionar la metodología PMBoK ya que esta se centra en proyectos de ingeniería y software.
- Dado el análisis planteado en la exploración de las etapas de la estrategia financiera, se definió como recurso clave la elaboración de una previsión de flujo de caja, detallando las posibles estrategias de financiamiento y flujo de capital.
- Se definió que la estrategia de gestión social y ambiental deberá estar compuesta de programas que permitan la información y comunicación, el acompañamiento social y el seguimiento y evaluación, aplicando estos instrumentos al sector social que engloba a Orbital Guidance y a los socios comerciales. Un aspecto de vital importancia es la concientización sobre la importancia de las órbitas terrestres y la mitigación de la generación de desechos espaciales.
- Se listó una selección extensiva de normas y regulaciones en los ámbitos de leyes, diseño de sistema, diseño de software y requerimientos del proyecto, con el fin de facilitar el desarrollo y eventual comercialización del proyecto.

13.2. Recomendaciones

- Se recomienda buscar que las soluciones comerciales seleccionadas para la implementación del sistema satisfagan los requerimientos de los stakeholders en términos de precio, volumen e interfaz de comunicación.
- Es recomendable buscar acompañamiento financiero por parte de entidades públicas para darle mayor visibilidad al proyecto.
- Se recomienda realizar simulaciones y pruebas de los diversos algoritmos seleccionados para garantizar el funcionamiento de los mismos.
- Es recomendable investigar acerca de opciones comerciales actuales e innovadoras que puedan mapeadas a las soluciones definidas en el cuadro 16.

14. Anexo A: Tablas de casos de uso y diagrama extendido

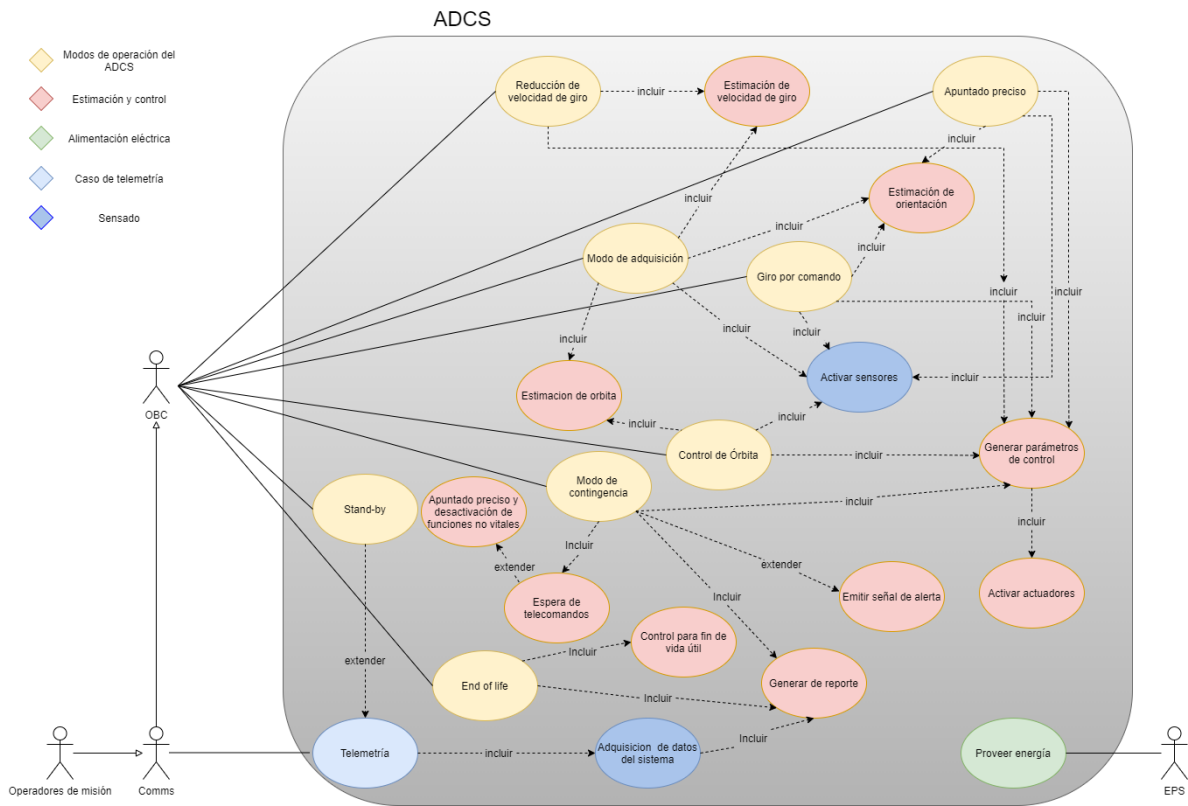


Figura 25: Diagrama de casos de uso extendido del AOCS.

Caso de uso #1	Modo de espera
Actores	OBC, Comms, Operador
Descripción	El OBC es capaz de informar al ADCS cuando cambiar de modo e incluso el operador puede solicitar telemetría del sistema
Precondiciones	El satélite tuvo que ser lanzado y el OBC a encendido el AOCS
Postcondiciones	El AOCS entrara en modo de reducción de velocidad de giro
Incluye	No tiene
Extiende	* Telemetría
Generalización	No tiene
Flujo de evento	1. El AOCS se enciende debido a la energía que le brinda el EPS 2. En caso de que se solicite telemetría, se toman los datos y se genera un reporta el cual es enviado de vuelta al usuario 3. El OBC le indica al AOCS cuando salir de este modo

Caso de uso #2	Modo de reducción de velocidad de giro
Actores	OBC
Descripción	Este modo se encarga de estabilizar la velocidad de rotación del satélite
Precondiciones	Haber terminado el modo de espera o solicitud por el modo seguro
Postcondiciones	El satélite es capaz de continuar con el modo de adquisición inicial o reincorporarse a su modo normal
Incluye	<ul style="list-style-type: none"> * Activar sensores * Estimación de velocidad de giro
Extiende	No tiene
Generalización	No tiene
Flujo de evento	<ol style="list-style-type: none"> 1. El AOCS toma datos de sus sensores incorporados 2. Utiliza los datos para verificar que el sistema necesita estabilización 3. Le solicita al OBC que estabilice la velocidad de rotación. 4. Se verifica que este estabilizando, en caso contrario activa el modo seguro

Caso de uso #3	Modo adquisición inicial
Actores	OBC
Descripción	Este modo se encarga de obtener el estado inicial del sistema y terminar de posicionar el satélite en su posición inicial
Precondiciones	La velocidad de giro del sistema debe de ser estable
Postcondiciones	El AOCS se encuentra disponible para operar con normalidad
Incluye	<ul style="list-style-type: none"> * Activar sensores * Estimar orientación * Estimar orbita * Estimar velocidad de giro * Generar reporte
Extiende	No tiene
Generalización	No tiene
Flujo de evento	<ol style="list-style-type: none"> 1. El AOCS toma datos de sus sensores incorporados 2. Se estiman los estados de orbita, orientación y velocidad de giro 3. El AOCS le transmite al operador los datos de actuales en un reporte 4. Se orienta el sistema hacia al sol utilizando el apuntado preciso.

Caso de uso #4	Modo de apuntado preciso
Actores	OBC, Comms, Operador
Descripción	En este modo el sistema es capaz de apuntar en una determinada dirección de forma precisa mediante telecomandos proporcionados por el operador
Precondiciones	El satélite se encuentra estable
Postcondiciones	Cambio de orientación del satélite de forma precisa, en espera de nuevas instrucciones
Incluye	<ul style="list-style-type: none"> * Activar sensores * Estimar orientación * Generar parámetros de control * Activar actuadores
Extiende	No tiene
Generalización	No tiene
Flujo de evento	<ol style="list-style-type: none"> 1. El operador envía una solicitud para el apuntado la cual es evaluada por el y se le devuelve el acceso al modo 2. Se envían las instrucciones del apuntado y estas son recibidas por el AOCS 3. Se activan los sensores para recolectar los datos actuales 4. Se estima la orientación del sistema 5. Con los datos actuales se generan los parámetros del control 6. Se utilizan los actuadores para lograr la orientación deseada

Caso de uso #5	Modo de giro por comando
Actores	OBC, Comms, Operador
Descripción	se ejecuta un comando el cual cambia la orientación del satelite mediante una maniobra de giro
Precondiciones	El satélite se encuentra estable
Postcondiciones	Cambio de Orientación del satélite, en espera de nuevas instrucciones
Incluye	<ul style="list-style-type: none"> * Activar sensores * Estimar orientación * Generar parámetros de control * Activar actuadores
Extiende	No tiene
Generalización	No tiene
Flujo de evento	<ol style="list-style-type: none"> 1. El operador envía el comando del giro, recibido por el sistema de comunicaciones y procesado por el OBC 2. Se activan los sensores para recolectar los datos actuales 3. Se estima la orientación del sistema 4. Con los datos actuales se generan los parámetros del control 5. Se utilizan los actuadores para lograr la orientación deseada

Caso de uso #6	Modo de control de orbita
Actores	OBC, Comms, Operador
Descripción	Se ejecuta una instrucción que le permite cambiar la orbita en la que se encuentra
Precondiciones	El satélite se encuentra estable
Postcondiciones	Cambio de orbita del satélite, en espera de nuevas instrucciones
Incluye	<ul style="list-style-type: none"> * Activar sensores * Estimar orbita * Generar parámetros de control * Activar actuadores
Extiende	No tiene
Generalización	No tiene
Flujo de evento	<ol style="list-style-type: none"> 1. El operador envía el comando de control de orbita, recibido por el sistema de comunicaciones y procesado por el OBC 2. Se activan los sensores para recolectar los datos actuales 3. Se estima la orientación del sistema 4. Con los datos actuales se generan los parámetros del control 5. Se utilizan los actuadores para lograr la controlar la orbita del satélite

Caso de uso #7	Modo seguro
Actores	OBC, Comms, Operador
Descripción	El modo seguro se ejecuta de forma periódica o en eventos de sensado y telemetría, si se detectan anomalías se le informa al operador y se busca asegurar la vida del satélite.
Precondiciones	Detección de anomalía.
Postcondiciones	Se esperan comandos específicos esto puede lograr la recuperación del sistema o determinar su fin de vida
Incluye	<ul style="list-style-type: none"> * Generar reporte al operador * Esperar telecomandos
Extiende	<ul style="list-style-type: none"> * Emitir señal de alerta * Apuntado preciso y desactivación de funciones no vitales
Generalización	No tiene
Flujo de evento	<ol style="list-style-type: none"> 1. El AOCS detecta una anomalía 2. Se genera un reporte al operador 3. Se esperan comando específicos del operador 4. Si el operador lo desea puede desactivar funciones del satélite así como apuntar al sol para preservar la vida útil del satélite 5. Se puede emitir una señal en caso de que sea necesario por medio de Comms en casos donde se pierda la comunicación normal

Caso de uso #8	End of life
Actores	OBC, Comms, Operador
Descripción	El operador es capaz de decidir el método de terminación de vida útil del satélite. Esto conlleva a la desactivación de todas sus funciones
Precondiciones	Determinación del fin de ciclo de vida
Postcondiciones	El satélite dejara de funcionar
Incluye	* Generar reporte * Control para fin de vida
Extiende	No tiene
Generalización	no tiene
Flujo de evento	1. El OBC genera un reporte al operador para que este seleccione el método 2. El operador selecciona el me todo y le proporciona los datos al sistema 3. Dependiendo del método el AOCS ejecuta el control del necesario 4. El satélite desactiva todas sus funciones.

15. Anexo B: Requerimientos del sistema

System Requirements Specification

Project: Clarity

Document: SyRS

Author: Steven Rojas Cubero Costa Rica Institute of Technology

Published on: 2021-05-01

Table of Contents

No table of contents entries found.

1. Introduction

Type: Section

1.1 System purpose

[SyRS-2] El sistema deberá controlar de manera precisa la orientación y órbita de pequeños satélites dada la necesidad de un mejor desempeño en estos parámetros, con el fin de lograr los objetivos de la misión.

Type: Section

1.2 System scope

[SyRS-3] El proyecto Clarity deberá ser capaz de estabilizar las velocidades de giro del satélite, obtener y mantener orientaciones establecidas mediante telecomandos o parámetros de la misión y poder realizar ajustes a la órbita del sistema.

Type: Section

1.3 System overview

Type: Section

1.3.1 System context

[SyRS-5] El sistema contará con un operador en Tierra quien enviará telecomandos al módulo de comunicaciones para establecer contacto con la computadora a bordo y así enviar comandos al ADCS mediante el protocolo USB. El ADCS calculará las acciones de control enviadas a los actuadores mediante los datos recopilados por la sensórica. Finalmente se generará un paquete de telemetría para enviar a Tierra.

Type: Section

1.3.2 System functions

Type: Section

1.3.2.1 Capacidades

[SyRS-126]

- El sistema deberá ser capaz de controlar de manera precisa la orientación y la órbita del satélite.
- El sistema deberá ser capaz de detectar e informar anomalías en su operación, además de su aislamiento en modo seguro.
- El sistema deberá ser capaz de inducir el fin del ciclo operativo del satélite.

1.3.2.2 Condiciones

[SyRS-127]

- El sistema deberá utilizar el protocolo USB para la comunicación con la computadora a bordo.
- El sistema deberá ser compatible con el bus KRATOS de EXA.

1.3.2.3 Limitaciones

[SyRS-128]

- El precio deberá ser menor a 30 mil dólares americanos.
- El proceso de diseño e implementación deberá realizarse en un año calendario.

- Se deberán utilizar componentes comercialmente disponibles y sin restricciones de exportación.
- El volumen del subsistema no deberá superar 1U de CubeSat (10cmx10cmx10cm).
- El consumo de energía nominal no deberá superar 1W.

Rationale:

[1]

1.3.3 User characteristics

[SyRS-7]

- El operador de la misión será el encargado de enviar telecomandos y recibir datos de telemetría en la estación en Tierra.
- Los integradores del sistema serán las personas encargadas de realizar la conjunción de las partes del satélite, tomando en cuenta sus interfaces y características físicas.

Type: Section

1.4 Assumptions and dependencies

[SyRS-8]

- Se podrán lograr los niveles de precisión, consumo de potencia y costo deseados, utilizando componentes disponibles comercialmente.
- Se dependerá de la disponibilidad de información sobre el OBC ICEPS de EXA para implementar correctamente la comunicación entre el mismo y el ADCS diseñado.
- Será posible realizar el control de la orientación y órbita mediante los actuadores disponibles comercialmente.

Type: Section

1.5 Definitions

[SyRS-9]

- Orbital Guidance: Equipo de trabajo.
- Clarity: Nombre del proyecto.
- Subsistema de control y determinación de orientación y órbita: Sistema encargado de determinar y controlar la orientación y órbita del satélite .
- Computadora a bordo: Elemento de procesamiento de mayor nivel jerárquico en la arquitectura del satélite encargado del manejo de comandos y datos.
- Subsistema de telemetría, rastreo y comando: Sistema encargado de la transcepción de datos y comandos entre el satélite y la estación en Tierra.
- Subsistema de potencia eléctrica: Subsistema encargado de suplir la potencia necesaria a los diferentes subsistemas del satélite.
- Telemetría : Conjunto de mediciones físicas obtenido o capturado por medición remota tales como estado de los recursos, actitud y operación, órbita, datos de sincronización para navegación, imágenes, datos retransmitidos, modos de operación y entre otros.

Type: Section

1.6 Acronyms and abbreviations

[SyRS-10]

- OG: Orbital Guidance.

System Requirements Specification

- ADCS: Attitude Determination and Control Subsystem (Subsistema de control y determinación de orientación y órbita).
- OBC: On-Board Computer (Computadora a bordo).
- Comms: Telemetry tracking and Control Subsystems (Subsistema de telemetría, rastreo y comando).
- EPS: Electric Power Subsystem (Subsistema de potencia eléctrica).
- EXA: Agencia Espacial Civil Ecuatoriana.
- USB: Universal Serial Bus.
- ICEPS: Irvine-Class Electrical Power Supply .

Type: Section

2. System requirements

Type: Section

2.1 Functional requirements

Type: Section

2.1.1 Telemetría

[SyRS-47] El sistema deberá generar paquetes de telemetría.

Source: Fundamental en todos los casos de uso.

2.1.2 Comunicación con OBC

[SyRS-48] El sistema deberá recibir y decodificar comandos enviados por el OBC.

Source: Permite determinar el caso de uso indicado en cada circunstancia.

2.1.3 Sensado

[SyRS-49] El sistema deberá poder adquirir los datos medidos por la sensórica.

Source: Presente en todos los casos de uso.

2.1.4 Estimación de orientación y órbita

[SyRS-50] El sistema deberá poder estimar la orientación y órbita con los datos de la sensórica.

Source: Presente en todos los casos de uso.

2.1.5 Cálculo de error

[SyRS-51] El sistema deberá calcular el error entre el estado de la orientación y órbita actual y el deseado, además dicho error deberá ser calculado abordo con verificación en tierra.

Source: Presente en todos los casos de uso exceptuando el modo de adquisición.

2.1.6 Cálculo de torque

[SyRS-52] El sistema deberá calcular el torque de control requerido para la corrección del error de orientación abordo y se deberá ser verificado en tierra.

Source: Presente en el caso de uso de apuntado preciso, giro por comando, End of Life y modo de contingencia.

2.1.7 Cálculo del delta-V

[SyRS-53] El sistema deberá calcular el delta-V requerido para el control de órbita abordo y deberá ser verificado en tierra.

Source: Presente en el caso de uso End of Life y Control de Órbita.

2.1.8 Control de actuadores

[SyRS-54] El sistema deberá envíar las señales de control a los actuadores para generar el torque requerido.

Source: Se emplea en todos los casos de uso excepto en el modo de adquisición.

2.1.9 Control de actuadores delta-V

Source: Presente en el caso de uso End of Life y Control de Órbita.

2.1.9.1 Control en lazo cerrado

[SyRS-129] El sistema deberá envíar las señales de control a los actuadores delta-V.

2.1.9.2 Control en lazo abierto

[SyRS-130] El sistema deberá poder enviar señales de lazo abierto para el control de los actuadores delta-V.

2.1.10 Detección y aislamiento de anomalías

Source: Es un subproceso que debe estar presente en todos los casos de uso.

2.1.10.1 Detección de anomalías

[SyRS-131] El sistema deberá verificar que las lecturas de los sensores se encuentren en un rango especificado por los parámetros de la misión o telecomandos (detección de anomalías).

2.1.10.2 Notificación de anomalías

[SyRS-132] El sistema deberá notificar al OBC en caso de presencia de anomalías.

2.1.10.3 Aislamiento de anomalías

[SyRS-133] El sistema deberá poder apagar sensores y/o actuadores individualmente de manera autónoma o por telecomando.

Rationale:

Si se determina el componente que provocó la falla.

2.1.11 Reinicio de software

[SyRS-58] El sistema deberá ser capaz de reiniciar su software si se le comanda.

Source: El operador comandará el reinicio en caso de presentar problemas con el sistema o ajenos al mismo.

2.1.12 Cambio de modo

[SyRS-59] El sistema deberá poder cambiar de modo operacional (ver sección 2.6), de manera autónoma o por telecomando.

Source: Este permite la variación entre los diferentes casos de uso.

2.2 Usability requirements

Type: Section

2.2.1 Integración con el sistema satélite

[SyRS-66] Clarity deberá contar con documentación suficiente para su integración en un CubeSat que utilice el bus KRATOS.

2.2.2 Teleoperación

[SyRS-67] El operador deberá ser capaz de enviar telecomandos para ejecutar operaciones en el subsistema Clarity.

Source: Se define el caso de uso del sistema.

2.3 Performance requirements

Type: Section

2.3.1 Precisión en el control de orientación

[SyRS-76] El sistema deberá lograr una precisión de apuntado menor a 1°.

Source: Presente en los casos de uso de apuntado preciso, giro por comando y modo de contingencia y End Of Life.

Rationale:

[2]

2.3.2 Consumo de potencia

[SyRS-78] El sistema deberá tener un consumo nominal de potencia de 1W.

2.3.3 Periodo de Estabilización

[SyRS-89] El sistema deberá reducir la rotación inicial en un tiempo máximo de dos órbitas de un valor de 35 [°/s] hasta 0 [°/s] .

Source: Presente en el caso de uso de modo de contingencia.

Rationale:

[2]

2.3.4 Delta-V

[SyRS-90] El sistema deberá proveer un delta-V máximo de 250 m/s.

Source: Presente en el caso de uso de control de Órbita y End of Life..

2.3.5 Vida útil mínima

[SyRS-91] El sistema deberá tener una vida útil operacional de al menos 2 años.

2.3.6 Tasa de utilización

[SyRS-92] El sistema deberá poder realizar dos maniobras de mantenimiento de órbita y una maniobra de deorbitaje

2.4 System interface requirements

Type: Section

2.4.1 Interfaz con sensórica

Source: Presente en todos los casos de uso.

2.4.1.1 Protocolo de comunicación

[SyRS-152] Se deberá hacer uso de protocolos comunes (I2C, UART, etc).

2.4.1.2 Acondicionamiento de la señal

[SyRS-85] Se deberán amplificar y digitalizar las diferentes señales medidas por los sensores.

2.4.1.3 Administración de potencia

[SyRS-86] El sistema deberá administrar la alimentación eléctrica correspondiente a cada sensor.

2.4.1.4 Conmutación de sensores

[SyRS-150] El sistema deberá controlar la conmutación de los diferentes sensores, entre sus estados de encendido y apagado.

2.4.2 Interfaz con actuadores

Source: Presente en todos los casos de uso excepto el modo de adquisición.

2.4.2.1 Alimentación energética

[SyRS-125] El sistema deberá administrar la alimentación eléctrica correspondiente a cada actuador.

2.4.2.2 Conmutación de actuadores

[SyRS-87] El sistema deberá controlar la conmutación de los diferentes actuadores, entre sus estados de encendido y apagado.

2.4.3 Interfaz con OBC

[SyRS-81] La interfaz con OBC deberá ser implementada mediante protocolo USB.

Source: Presente en todos los casos de uso.

2.4.4 Interfaz con EPS

[SyRS-82] Se deberá hacer la conexión con los buses de potencia según el voltaje de alimentación de los componentes.

Source: Presente en todos los casos de uso.

2.5 System operations

Type: Section

2.5.1 Human system integration requirements

Type: Section

2.5.1.1 Recepción de telecomandos

[SyRS-94] El sistema deberá poder recibir telecomandos enviados por el operador de la misión por medio del OBC.

2.5.1.2 Envío de telemetría

[SyRS-116] El sistema deberá poder enviar paquetes de telemetría al OBC.

Source: Presente en todos los casos de uso.

2.5.2 Reliability requirements

Type: Section

2.5.2.1 Detección de anomalías

Source: Presente en todos los casos de uso.

2.5.2.1.1 Sensórica

2.5.2.1.1.1 Apagado no controlado

[SyRS-134] El sistema deberá detectar el apagado no controlado de los sensores.

2.5.2.1.1.2 Desviación de lecturas

[SyRS-135] El sistema deberá detectar la existencia de desviaciones en las lecturas dentro de una ventana definida por telecomando.

2.5.2.1.2 Actuadores

[SyRS-98] Detección de apagado no controlado.

2.5.3 Other quality requirements

Type: Section

2.5.3.1 Compatibilidad con el bus KRATOS

[SyRS-99] El sistema deberá ser compatible con el bus KRATOS realizando su comunicación por medio del protocolo USB.

2.5.3.2 Compatibilidad estructural

[SyRS-105] El sistema deberá ser compatible de manera física con la estructura de una plataforma CubeSat.

2.6 System modes and states

[SyRS-21] La definición de los siguientes estados se hace con base en lo expuesto en [\cite{PNP2002}, ADCS & conceptop de operaciones].

Type: Section

Rationale:

[3]

2.6.1 Standby

[SyRS-44] En este modo sólo deberá realizar envío de telemetría.

2.6.2 Reducción de velocidad de giro

[SyRS-43] Este modo deberá cumplir con el objetivo de reducción de la velocidad angular del satélite a un valor pequeño. Es el modo al que deberá entrar el ADCS posterior al despliegue del satélite.

2.6.3 Adquisición de orientación inicial

[SyRS-42] Este modo deberá operar una vez logrado reducir los valores de velocidad angular del satélite, se procederá a inducir a la rotación del sistema para obtener los parámetros iniciales de orientación para el desarrollo de la misión.

2.6.4 Modo de apuntado preciso

[SyRS-41] Este modo de alta precisión deberá minimizar el error de orientación. Este modo deberá ser utilizado durante el desarrollo de las tareas de la misión que requieren precisión.

2.6.5 Modo de giro por comando

[SyRS-40] Este modo efectuará el cambio de orientación del satélite por comando cuando se requiera del apuntado a un nuevo objetivo.

2.6.6 Modo de control de órbita

[SyRS-38] Este modo deberá activar los actuadores de propulsión para ejercer un delta-V que permita controlar la órbita del satélite.

2.6.7 Modo seguro

[SyRS-37] Este modo deberá aislar los actuadores de forma que solamente se mantengan las operaciones vitales del sistema.

2.7 Physical characteristics

Type: Section

2.7.1 Physical requirements

Type: Section

2.7.1.1 Volumen

[SyRS-100] El sistema no deberá exceder una unidad de CubeSat (10cmx10cmx10cm).

2.7.1.2 Masa

[SyRS-101] El sistema no deberá tener una masa mayor a 1,3 kg.

2.7.1.3 Integración estructural

[SyRS-102] El sistema deberá ser integrable de manera física con la estructura de una plataforma CubeSat.

2.8 Environmental conditions

Type: Section

2.8.1 Altitud

[SyRS-115] El sistema deberá operar en el rango de 300 a 400 km de altitud (Órbita baja terrestre).

2.8.2 Densidad atmosférica

[SyRS-70] El sistema deberá operar a una densidad atmosférica en el rango de $10e-12$ a $10e-10$ kg/m³ [ref].

2.8.3 Radiación

[SyRS-71] El sistema deberá poder operar en el entorno de partículas alfa y beta, rayos gamma y X, y neutrones-L atenuados por el escudo de KRATOS.

2.8.4 Temperatura

[SyRS-72] El sistema deberá poder operar en un rango de temperaturas de 10 a 20 °C.

Rationale:

Cabe denotar que el bus KRATOS cuenta con control térmico por tanto no se incluye en este apartado.

2.8.5 Reentrada a la atmósfera

[SyRS-74] Los materiales utilizados deberán quemarse completamente al reentrar a la atmósfera.

2.9 System security requirements

Type: Section

2.9.1 Pirotécnicos

[SyRS-106] El sistema deberá no contener elementos pirotécnicos.

2.9.2 Detección de anomalías

[SyRS-107] El sistema deberá poder detectar anomalías y reportarlas al OBC.

Source: Presente en todos los casos de uso.

2.9.3 Interferencia de partes móviles

[SyRS-108] Las partes móviles del sistema no deberán interferir con los demás subsistemas del satélite.

2.9.4 Mitigación de generación de basura espacial

[SyRS-109] El sistema deberá poder realizar una maniobra que permita la reentrada a la atmósfera y que sus componentes se quemen completamente en ese proceso.

Source: Aplicado en el caso de uso End of Life.

2.10 Information management requirements

Type: Section

2.10.1 Telemetría

[SyRS-103] El sistema deberá enviar paquetes de información que pueden incluir estado de salud, modo operacional actual, últimos valores de los sensores y valores estimados recientes de orientación y órbita.

2.10.2 Comandos

[SyRS-104] El sistema deberá ser capaz de recibir comandos enviados por el OBC.

2.10.3 Anomalías

[SyRS-110] El sistema deberá informar al OBC en caso de detectar anomalías.

2.11 Policy and regulation requirements

Type: Section

2.11.1 Dimesiones del CubeSat

[SyRS-117] El sistema deberá cumplir con las restricciones dimensionales establecidas en los requerimientos de diseño de CubeSat.

2.11.2 Restricciones de importación

[SyRS-118] Los componentes del sistema no deberán estar sujetos a restricciones de importación (por ejemplo, ITAR).

2.11.3 Materiales y procesos

[SyRS-119] El sistema deberá cumplir con el estándar ECSS-Q-70-71A (selección de materiales y procesos).

2.11.4 Mitigación de desechos espaciales

[SyRS-120] El sistema deberá cumplir con las directrices para la reducción de desechos espaciales de la Comisión sobre la Utilización del Espacio Ultraterrestre con Fines Pacíficos (UNOOSA).

Source: Aplicado en el caso de uso End of Life.

2.11.5 Requerimientos y verificación

[SyRS-121] El sistema deberá cumplir con el estándar ISO/IEC/IEEE 29148-2018 de gestión de requerimientos y su verificación.

2.11.6 Simbología eléctrica

[SyRS-123] El diseño de planos eléctricos deberá cumplir con la simbología estipulada en la norma IEEE 315-1975

2.11.7 Planos y diagramas

[SyRS-122] Se deberá cumplir con las prácticas estipuladas en el estándar ASME Y14.100-2017

2.11.8 Diseño de circuitos impresos

[SyRS-154] El diseño de circuitos impresos deberá cumplir con lo establecido en las normas IPC.

2.12 System life cycle sustainment requirements

Type: Section

2.12.1 Logística

[SyRS-112] Se deberá contar con la capacidad de exportar el sistema a personería física y jurídica.

2.12.2 Provisión de planos y documentación

[SyRS-113] Se deberá proveer a los integradores y operadores planos y documentación para la correcta implementación del sistema.

2.12.3 Vida útil del sistema

[SyRS-114] El sistema deberá tener una vida útil de al menos 6 años.

2.13 Packaging, handling, shipping and transportation requirements

[SyRS-30] El peso máximo del paquete a exportar será de una tonelada por envío y las dimensiones máximas del paquete serán 1.2mx1.2mx1.6m. (DHL Express Worldwide)

Type: Section

3. Verification

[SyRS-31] La verificación del subsistema se llevará a cabo de acuerdo a lo establecido mediante la norma ISO/IEC 29148: 2018.

Type: Section

3.1 Método de inspección

[SyRS-143] Se verificará las propiedades del objeto por medio de la examinación y observación.

Rationale:

Se le llama inspección ya que generalmente, es un método no destructivo, y en muchas ocasiones se utilizan los sentidos de la vista, escucha, olor, tacto y sabor, así como la manipulación física simple.

3.2 Método de verificación por Análisis o Simulación

[SyRS-147] Se llevará a cabo través de datos analíticos o simulaciones en condiciones definidas se demuestra el cumplimiento teórico del requerimiento.

Rationale:

Este método se emplea cuando una prueba en condiciones realistas no es posible realizarla o no es rentable.

3.3 Método de verificación por demostración.

[SyRS-148] Se llevará en una verificación cualitativa del rendimiento funcional sin o con el mínimo de instrumentación o equipo de pruebas.

Rationale:

Se llevan a cabo una serie de pruebas estimulando el sistema para demostrar que este responde apropiadamente o para demostrar que los operadores son capaces de realizar sus funciones cuando utilizan el sistema

3.4 Método de verificación por prueba.

[SyRS-149] Se llevará por medio de este método se puede verificar cuantitativamente las capacidades de operación, soporte y rendimiento de un dispositivo en condiciones reales o simuladas

Rationale:

Se suele utilizar equipo o instrumentación especializada para así obtener datos más precisos.

4. References

- [SyRS-32] [1] California Polytechnic State University.CubeSat Design Specification. Especificaciones de diseño. 2015. url: https://static1.squarespace.com/static/5418c831e4b0fa4ecac1bacd/t/56e9b62337013b6c063a655a/1458157095454/cds_rev13_final2.pdf
- [2] "AeroCube-OCSD - Satellite Missions - eoPortal Directory", Directory.eoportal.org, 2021. url: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/a/aerocube-ocsd>
- [3] A. Pasetti, "Aocs Framework Project", Pnp-software.com, 2002. url: <https://www.pnp-software.com/AocsFramework/AocsBackground.html>.

Type: Section

16. Anexo C: Requerimientos de software

Software Requirements Specification

Project: SRS-4

Document: SRS

Author: Steven Rojas Cubero Costa Rica Institute of Technology

Published on: 2021-05-02

Table of Contents

No table of contents entries found.

1. Introduction

Type: Section

1.1 Purpose

[SRS-2] El software deberá ser el responsable de los distintos algoritmos para control y manipulación de los actuadores, además de poder interpretar datos de entrada del operador y controlar los diferentes sensores para poder tomar medidas correctivas según el modo del sistema.

Type: Section

1.2 Scope

[SRS-3] El software deberá procesar correctamente datos para poder controlar de manera precisa los actuadores para los distintos modos del sistema o parámetros proporcionados por telecomando.

Type: Section

1.3 Product perspective

Type: Section

1.3.1 System interfaces

[SRS-5] El sistema deberá enviar y recibir datos al OBC por medio del protocolo USB, además tomará los datos de los sensores para poder interpretarlos en los algoritmos y controlar los actuadores.

Type: Section

1.3.2 User interfaces

[SRS-6] El sistema deberá contar con una interfaz para la comunicación con el OBC, donde pueda recibir telecomandos y enviar informes.

Type: Section

1.3.3 Hardware interfaces

[SRS-7]

- Señales de control para actuadores.
- Datos de sensórica.
- Comunicación con OBC por protocolo USB.
- Alimentación eléctrica con EPS (*Electrical Power System*).

Type: Section

1.3.4 Software interfaces

[SRS-8] El sistema deberá recibir telecomandos desde OBC que podrá modificar valores en los algoritmos y enviará información de vuelta al OBC.

Type: Section

1.3.5 Communications interfaces

Type: Section

1.3.5.1 Protocolo de comunicación con periféricos

[SRS-33] El sistema deberá contar con un protocolo de recolección de datos a través de los sensores y envío de órdenes a los actuadores.

1.3.5.2 Protocolos de transmisión de datos y telecomandos

[SRS-32] El sistema deberá utilizar el protocolo USB para la comunicación con el OBC

1.3.6 Memory constraints

[SRS-10] El sistema deberá almacenar en memoria una cantidad de estados anteriores, necesarios para poder realizar las predicciones y los cálculos de orientación y órbita, además de datos de entradas actuales de los sensores, comandos, matrices de control e información para reportes.

Type: Section

1.3.7 Operations

Type: Section

1.3.7.1 Op de espera

[SRS-34] El operador no tendrá control y se restablecerá el control después de un tiempo previamente determinado.

Source: SB

1.3.7.2 Op de comandos

[SRS-35] El usuario podrá usar comandos para controlar el sistema.

Source: AP, GC, CO, MN, MS, RR

1.3.7.3 Op de evaluación de datos

[SRS-36] Deberá evaluar datos para encontrar la aproximación más adecuada del estado del satélite.

Source: AP, GC, CO, MN, MS, RR, MA, EL

1.3.7.4 Op de control

[SRS-37] Envía los parámetros de control hacia los actuadores.

Source: AP, GC, CO, MN, MS, RR, EL

1.3.7.5 Op de transmisión de estado

[SRS-38] El sistema enviará un informe con el estado actual del satélite al usuario.

Source: AP, GC, CO, MN, MS, RR, EL, MA

1.3.7.6 Op de emergencia

[SRS-39] El usuario perderá el control y entrará a modo seguro.

Source: MS

1.3.7.7 Op detección de anomalías

[SRS-40] Modo de operación en el cual el ADCS siempre ejecuta la detección de anomalías a través del chequeo periódico o emergente del sistema o agentes externos.

Source: MN, AP, GC, CO, MA, RR

1.3.7.8 Op orientación al sol

[SRS-41] Los paneles se orientarán de forma precisa hacia el sol con el fin de asegurar las horas activas del sistema.

Source: MS, MN

1.3.7.9 Op determinación de órbita

[SRS-42] A través de los datos sensados se determina la órbita actual.

Source: AP, MN, CO

1.3.7.10 Op determinación de orientación

[SRS-43] A través de los datos sensados se determina la órbita actual.

Source: AP, MN, GC

1.3.7.11 Op sensado de datos

[SRS-44] Será capaz de extraer datos de forma recurrente y correcta.

Source: AP, GC, CO, MN, MS, RR, MA, EL

1.3.7.12 Op generación de reporte

[SRS-45] Reporte generado en caso de emergencia o solicitud sobre el sistema.

Source: AP, GC, CO, MN, MS, RR, MA, EL

1.3.7.13 Op interrupción del modo normal

[SRS-46] El usuario es capaz de seleccionar el modo operativo desde la interfaz del modo normal.

Source: MN

1.3.7.14 Op end of life

[SRS-47] Operación que permite al ADCS utilizar algoritmos de control para dar fin a su vida útil a través del protocolo especificado por el operador de la misión.

Source: EL

1.3.7.15 Op de apagado

[SRS-48] En caso de perturbaciones no deseadas el sistema apagará los actuadores y se envía un informe al operador.

Source: RR, MS

1.3.7.16 Op optimización de los parámetros de control

[SRS-49] El modo de apuntado preciso necesita de módulos de alto procesamiento para la generación de los parámetros óptimos que sigan la trayectoria especificada.

Source: AP

1.3.7.17 Op generación de parámetros de control periódicos

[SRS-50] La adquisición de datos periódicos es una de las funciones básicas que deberá poseer el sistema en su estado normal para retroalimentación del mismo.

Source: AP, GC, CO, MN, MS, RR, MA, EL

1.3.7.18 Op determinación de velocidad de giro

[SRS-134] Se encarga de determinar la velocidad de rotación en el eje angular del sistema.

Source: RR, MN, MA, GC, MS, AP

1.3.7.19 Op sincronización

[SRS-147] El sistema podrá sincronizarse con el Timer del OBC

Source: MA

1.3.8 Site adaptation requirements

Type: Section

1.3.8.1 Timer

[SRS-51] El sistema necesitará un timer o indicador para comenzar el proceso de reducción de velocidad de torque inicial.

1.3.8.2 Parámetros de los distintos algoritmos.

[SRS-52] El sistema necesitará matrices de control para cambiar los parámetros de los distintos algoritmos.

1.3.8.3 Modo seguro

[SRS-53] El sistema deberá acceder al modo seguro en el caso que los datos de los sensores se encuentren fuera del rango de los valores predeterminados de entrada.

1.3.9 Interfaces with services

Type: Section

1.3.9.1 Compatibilidad con Linux

[SRS-54] El sistema deberá utilizar librerías compatibles con Linux industrial IIOS.

1.3.9.2 Reloj

[SRS-56] El sistema deberá utilizar el servicio de reloj (TAS) del OBC y sincronizarse con el mismo

1.3.9.3 Adquisición de comandos

[SRS-57] El sistema deberá utilizar el servicio de adquisición de comandos y datos (CDAS).

1.3.9.4 Transferencia de mensajes

[SRS-58] El sistema deberá utilizar el servicio de transferencia de mensajes (MTS).

1.3.9.5 Almacenamiento de archivos

[SRS-59] El sistema deberá utilizar el servicio de almacenamiento de archivos y paquetes (FPSS).

1.4 Product functions

Type: Section

1.4.1 Enviar datos

[SRS-62] El sistema deberá enviar datos al OBC para el usuario con informes de estado del nanosatélite.

1.4.2 Predecir el movimiento

[SRS-63] El sistema deberá predecir el movimiento del nanosatélite.

1.4.3 Interpretar datos

[SRS-148] El sistema deberá interpretar datos provenientes de los sensores.

1.4.4 Direccionamiento

[SRS-149] El sistema deberá determinar el direccionamiento del sistema.

1.4.5 Rotación

[SRS-150] El sistema deberá determinar la rotación del sistema.

1.4.6 Controlar a los actuadores

[SRS-152] El sistema deberá controlar a los actuadores.

1.4.7 Detectar anomalías

[SRS-153] El sistema deberá detectar anomalías e intentar contrarrestarlas.

1.5 User characteristics

Type: Section

1.5.1 Operadores

[SRS-70] Los operadores de misiones enviarán telemandos para ejecutar instrucciones con respecto al control para las misiones específicas.

1.5.2 Desarrolladores

[SRS-71] Los desarrolladores serán los responsables de modificar el software para que cumpla los criterios necesarios para el buen funcionamiento de las tareas de los operadores.

1.6 Limitations

Type: Section

1.6.1 Limitado a compatibilidad con Linux

[SRS-72] El sistema deberá ser compatible con Linux industrial IIOS.

1.6.2 Limitado a datos de los sensores

[SRS-73] El sistema deberá estar limitado a recolección de datos de los sensores y retroalimentación del estado actual.

1.6.3 Limitado al control

[SRS-75] Sistema deberá estar limitado al control de los actuadores.

1.7 Assumptions and dependencies

[SRS-17]

- El sistema se deberá conectar por medio de un puerto USB 2.0 al OBC.
- El sistema deberá realizar la ejecución de las maniobras necesarias para la estabilización y control de la órbita en un rango de 2000s a 4000s.
- El sistema solo deberá usarse alrededor de la órbita terrestre.
- Anomalías: Este es un elemento producido por la detección de parámetros inusuales cuando se reciben datos de retroalimentación y sensado.

- Errores: Este es por factor humano y se denota cuando hay errores al indicar los parámetros en los telecomandos.

Type: Section

1.8 Definitions

[SRS-18]

- Clarity: Nombre del proyecto.
- Linux industrial: Sistema operativo del OBC.
- Telemetría: Sistema de medición para enviar y recibir datos físicos.
- Telecomandos: Comandos transmitidos por algún medio digital desde estación en tierra.
- Estado: Las condiciones de posición, velocidad, aceleración y orientación del sistema.
- Optimización: Mejoramiento de algoritmos.

Type: Section

1.9 Acronyms and abbreviations

[SRS-19]

- ADCS: Attitude determination and control subsystem.
- ADC: Analog to Digital Converter.
- OBC: On board computer.
- EPS: Electrical power system.
- USB: Universal Serial Bus.
- E: Input del sistemas o entradas.
- CS: Proceso de conversión a salida.
- S: Output del sistema o Salidas.
- Op: Operación.
- AP: Modo apuntado preciso.
- GC: Modo giro por comando.
- EL: Modo End of life.
- CO: Modo Control de órbita.
- MN: Modo normal.
- MA: Modo de adquisición.
- MS: Modo seguro.
- RR: Modo de reducción de velocidad de giro.
- SB: Modo Stand-By.
- TM: Todos los modos de uso del operador.
- R: Relación.
- USB: Universal serial bus.

Type: Section

2. Requirements

Type: Section

2.1 External interfaces

Type: Section

2.1.1 Entradas externas

2.1.1.1 Formato Entrada

[SRS-125] Se necesitarán entradas digitalizadas para poder procesar.

2.1.1.2 Telecomando

[SRS-77] El sistema deberá recibir telecomandos para poder realizar varios modos de operación.

2.1.1.3 Datos obtenidos de los sensores

[SRS-78] El sistema deberá recibir datos de los sensores.

2.1.2 Salidas externas

2.1.2.1 Formato salida

[SRS-126] El sistema deberá entregar una salida digitalizada.

2.1.2.2 Control de actuadores.

[SRS-80] El sistema deberá proporcionar señales de salida para el control de los actuadores.

2.1.2.3 Reportes de estado

[SRS-81] El sistema deberá enviar informes de errores y de estado al OBC.

2.2 Functions

Type: Section

2.2.1 Entrada (E)

2.2.1.1 Telecomandos (E1)

[SRS-83] El sistema deberá ser capaz de recibir telecomando por medio del Bus KRATOS OBC.

Source: MN, GC, CO, AP, RR

2.2.1.2 Datos espaciales (E2)

[SRS-84] El sistema deberá ser capaz de obtener datos desde los sensores por medio de un ADC.

Source: MN, GC, CO, AP, RR, AM, MS

2.2.1.3 Retroalimentación del sistema (E3)

[SRS-85] El sistema deberá de realizar una retroalimentación por medio de la comunicación interna del microcontrolador.

Source: MN, GC, CO, AP, RR, AM, MS

2.2.1.4 Comando control automático de velocidad de giro (E4)

[SRS-86] El sistema deberá ser capaz de recibir comandos preestablecidos para la estabilización del giro del satélite de forma autónoma.

Source: AP, GC, CO, MN, MS, RR

2.2.1.5 Error telecomando (E5)

[SRS-87] El sistema deberá de ser capaz recibir información errónea en los telecomandos.

Source: MS

2.2.1.6 Error retroalimentación (E6)

[SRS-88] El sistema deberá ser capaz de recibir retroalimentación errónea.

Source: MS

2.2.1.7 Error datos espaciales (E7)

[SRS-89] El sistema deberá ser capaz de recibir datos de sensores erróneos.

Source: MS

2.2.2 Proceso de conversión a salida (CS)

2.2.2.1 Apuntado preciso (CS1)

[SRS-92] El sistema deberá poseer un algoritmo para control de apuntado preciso.

Source: AP

2.2.2.2 Control de órbita (CS2)

[SRS-93] El sistema deberá poseer un algoritmo para control de órbita.

Source: CO, AP, MS

2.2.2.3 Control de giro por comando (CS3)

[SRS-91] El sistema deberá poseer un algoritmo para control de giro por comando.

Source: GC, AP

2.2.2.4 End of life (CS4)

[SRS-94] El sistema deberá poseer un algoritmo para end of life.

Source: EL

2.2.2.5 Selección de datos (CS5)

[SRS-95] El sistema deberá poseer un algoritmo para selección de datos de los sensores.

Source: AP, GC, CO, MN, MS, RR, MA, EL

2.2.2.6 Velocidad angular (CS6)

[SRS-96] El sistema deberá poseer un algoritmo para reducir velocidad angular.

Source: MS, RR

2.2.2.7 Modo seguro (CS7)

[SRS-97] El sistema deberá poseer un algoritmo de modo seguro.

Source: MS

2.2.2.8 Detección de errores (CS9)

[SRS-136] El sistema deberá poseer un algoritmo para la detección de errores en parámetros de telecomandos.

Source: De telecomandos, AP, GC, CO, MN, MS, RR, MA

2.2.2.9 Detección de anomalías (CS10)

[SRS-137] El sistema deberá poseer un algoritmo para la detección de anomalías de datos de entrada.

Source: En la retroalimentación y obtención de datos de sensores. AP, GC, CO, MN, MS, RR, MA, EL

2.2.3 Salida (S)

2.2.3.1 Movimiento de actuadores (S1)

[SRS-100] El sistema deberá producir señales para el control de actuadores.

Source: AP, GC, EL, CO, MN, MS, RR

2.2.3.2 Retroalimentación del sistema (S2)

[SRS-101] El sistema deberá producir retroalimentación de estado.

Source: AP, CO, MN, MS, RR, MA, EL, GC

2.2.3.3 Retroalimentación operador (S3)

[SRS-102] El sistema deberá producir reportes para el operador.

Source: AP, GC, CO, MN, RR, MA, EL

2.2.3.4 Informe de error (S4)

[SRS-103] El sistema deberá producir informe de anomalías para el operador.

Source: MS

2.2.4 Relacion (R)

2.2.4.1 Relación-Telecomandos (R1)

[SRS-122] El sistema deberá ser capaz de relacionar los telecomandos con los variados modos de uso.

Source: MN, GC, CO, AP, RR

2.2.4.2 Relación-anomalías (R2)

[SRS-123] El sistema deberá ser capaz de identificar anomalías para su protección.

Source: AP, GC, CO, MN, MS, RR, MA, EL

2.2.4.3 Relación-Control de giro (R3)

[SRS-124] El sistema deberá ser capaz de recolectar datos para estabilizar su velocidad de giro.

Source: RR, MS, GC, AP

2.3 Usability requirements

Type: Section

2.3.1 Autónomo

[SRS-105] El sistema deberá ser capaz de funcionar de manera autónoma.

2.3.2 Anomalías

[SRS-106] El sistema deberá ser capaz de detectar y resolver anomalías.

2.3.3 Telecomandos

[SRS-107] El sistema deberá ser capaz de recibir y ejecutar telecomandos.

2.3.4 Actuadores

[SRS-108] El sistema deberá ser capaz de controlar actuadores.

2.3.5 Envío de datos

[SRS-109] El sistema deberá enviar datos procesados al OBC.

2.4 Performance requirements

Type: Section

2.4.1 No linealidad

[SRS-154] Los algoritmos deberán ser capaces de trabajar con sistemas no lineales.

2.4.2 Telemetría

[SRS-110] El sistema deberá realizar la recopilación de la telemetría en menos de 60 segundos para su posterior procesamiento, con un margen de error no mayor al 5% del total de los datos medidos.

2.4.3 Ejecución de maniobras.

[SRS-111] El sistema deberá realizar la ejecución de las maniobras necesarias para la estabilización y control de la órbita en un rango de 2000s a 4000s, aproximadamente de 30 a 60 minutos.

2.4.4 Detección y recuperación

[SRS-112] El sistema deberá activar un protocolo de verificación y recuperación cada vez que se detecte una anomalía.

2.5 Logical database requirements

Type: Section

2.5.1 Estados

[SRS-113] El sistema deberá ser capaz de almacenar los estados anteriores necesarios para la retroalimentación.

2.5.2 Creación de informes

[SRS-114] El sistema tendrá que almacenar datos para la generación de informes.

2.5.3 Linux IIOS

[SRS-115] El sistema deberá ser compatible con Linux IIOS y sus librerías.

2.5.4 Matrices de control

[SRS-116] El sistema deberá poder almacenar matrices de control.

2.5.5 Control de errores

[SRS-117] El sistema deberá poseer conocimiento para detección de errores.

2.6 Design constraints

Type: Section

2.6.1 USB 2.0

[SRS-127] El sistema deberá comunicarse con el OBC por medio de una conexión con protocolo USB 2.0.

2.6.2 Open source

[SRS-128] Se utilizarán programas de acceso libre.

2.7 Standards compliance

Type: Section

2.7.1 Calidad de software

[SRS-129] Se definirá la calidad del producto software cuando este es usado en un ambiente específico y un contexto de uso específico.

Source: ISO/IEC 9126

2.7.2 Evaluación de software

[SRS-130] Se utilizará para evaluar la calidad del software en sus diferentes etapas.

Source: ISO/IEC 14598

2.7.3 Procesos de medición

[SRS-131] Nos dará un modelo que ayuda a especificar la planificación, performance y evaluación de mediciones.

Source: ISO 15939

2.7.4 Calidad de datos

[SRS-132] Se utilizará para verificar la calidad de los datos.

Source: ISO/IEC 25012

2.7.5 Ciclo de vida del software

[SRS-156] Se empleará para definir, controlar y mejorar los procesos de ciclo de vida del software en una organización o proyecto.

Source: ISO/IEC/IEEE 12207:2017

2.7.6 Lenguaje de modelado

[SRS-155] Especificará el lenguaje para el modelado de sistemas (SysML).

Source: ISO/IEC 19514:2017

2.7.7 Diagramas de flujo

[SRS-157] Se diseñarán para dar un enfoque fácil de entender de flujos de trabajo.

Source: ISO 9001

2.8 Software system attributes

Type: Section

2.8.1 Fiabilidad

2.8.1.1 Comunicación constante

[SRS-140] El sistema deberá tener intercomunicación con OBC en todo momento.

2.8.1.2 Optimización

[SRS-141] El sistema deberá ser optimizado.

Source: SRS-18

2.8.2 Disponibilidad

2.8.2.1 Uso en vida útil

[SRS-142] El sistema deberá poder ejecutar las funciones definidas en su diseño durante toda su vida útil.

2.8.3 Portabilidad

[SRS-120] El software será capaz de ser transferido de un ambiente a otro.

Source: ISO/IEC 9126

2.8.4 Licencias

[SRS-144] El sistema de software permitirá el uso y modificación sencillo a nivel de licencias.

Source: Open source

2.8.5 Automatización

[SRS-145] El sistema podrá realizar funciones predeterminadas de forma automática.

2.8.6 Operaciones de usuario

[SRS-146] El sistema necesitará de telecomandos para realizar las ordenes emitidas por el operador.

3. Verification

[SRS-29]

Type: Section

4. Supporting information

[SRS-30]

Type: Section

5. References

[SRS-31]

- Kristian Budde Thomas, Brunn Allan and Hedegaard. Designing on board computer and payload for the AAU Cubesat. url: <http://www.inpe.br/crn/conasat/arquivos/projetos/AAUSAT/AAUSAT-OBC-report.pdf>
- Beatriz Lacruz Alcaraz. Implementación y validación del sistema de control de altitud del microsatélite UMPSat-2. bea. url: http://oa.upm.es/44960/4/TFM_BEATRIZ_LACRUZ_ALCARAZ.pdf
- ECE Paris. System Specifications for Attitude Determination and Control System. 2017. url: http://www.ece3sat.com/pdf/System_Specifications_ADCS_SOA.pdf
- Pieter Johannes Botma. The Design and Development of an ADCS OBC for a CubeSat. December de 2011. url: <https://core.ac.uk/download/pdf/37345235.pdf>
- Abdulaziz Alanazi and Jeremy Straub. “settings Open Access Article Engineering Methodology for Student-Driven CubeSats”. En: (2019). url: <https://www.mdpi.com/2226-4310/6/5/54/htm>
- SPACECRAFT ONBOARD INTERFACE SERVICES. Dic. de 2013. url: <https://public.ccsds.org/Pubs/850x0g2.pdf>
- Johan CARVAJAL-GODÍNEZ. Agent-based architectures supporting fault-tolerance in small satellites Engineering Methodology for Student-Driven CubeSats. 2021. url: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:b528d7be-e82d-4205-abdf-3fb3fa7f1011?collection=research>
- Abdal Shehab BA and Mohammed Chessab. Attitude Determination and Control System design of KufaSat. Ago. de 2014. url: https://www.researchgate.net/publication/291328986_Attitude_Determination_and_Control_System_design_of_KufaSat
- Fernando Omar Arciniega Martínez. Normas y Estándares de calidad para el desarrollo de Software. 2020. url: <http://fernandoarciniega.com/normas-y-estandares-de-calidad-para-el-desarrollo-de-software/>
- ISO 25000. ISO/IEC 25012 . <https://iso25000.com/index.php/normas-iso-25000/iso-25012>

Type: Section

17. Anexo D: Matriz de verificación del sistema

Requerimientos del sistema			Métodos de verificación				Comentarios	Estado
Sección	ID	Requerimientos	Inspección	Análisis	Demostración	Prueba		
Requerimientos funcionales	SyRS-47	Telemetría				x		
	SyRS-48	Comunicación con OBC				x		
	SyRS-49	Sensado				x		
	SyRS-50	Estimación de Orientación y Órbita		x				
	SyRS-51	Cálculo de Error		x				
	SyRS-52	Cálculo de Torque		x				
	SyRS-53	Cálculo de Delta-V		x				
	SyRS-54	Control de Actuadores				x		
	SyRS-129	Control de Actuadores Delta-V (Lazo Cerrado)				x		
	SyRS-130	Control de Actuadores Delta-V (Lazo Abierto)				x		
	SyRS-131	Detección de Anomalías			x			
	SyRS-132	Notificación de Anomalías			x			
	SyRS-133	Aislamiento de Anomalías			x			
	SyRS-58	Reinicio de Software				x		
	SyRS-59	Cambio de Modo				x		
Usabilidad	SyRS-66	Integración con el Sistema Satélite		x				
	SyRS-67	Teleoperación			x			
Requerimientos de rendimiento	SyRS-76	Precisión en el Control de Orientación		x				
	SyRS-78	Consumo de Potencia				x		
	SyRS-89	Periodo de Estabilización		x				
	SyRS-90	Delta-V		x				
	SyRS-91	Vida Útil Mínima		x				
	SyRS-92	Tasa de Utilización		x				
Interfaz del sistema	SyRS-152	Protocolo de Comunicación	x					
	SyRS-85	Acondicionamiento de la Señal (Sensórica)			x			
	SyRS-86	Administración de Potencia (Sensórica)				x		
	SyRS-150	Conmutación de Sensores				x		
	SyRS-125	Alimentación Energética (Actuadores)				x		
	SyRS-87	Conmutación de Actuadores				x		
	SyRS-81	Interfaz con OBC	x					
	SyRS-82	Interfaz con EPS	x					
Operación del sistema	SyRS-94	Recepción de Telecomandos			x			
	SyRS-116	Envío de Telemetría				x		
	SyRS-134	Apagado no Controlado (Anomalía en Sensórica)			x			
	SyRS-135	Desviación de Lecturas (Anomalía en Sensórica)			x			
	SyRS-98	Detección de Anomalías (Actuadores)			x			
	SyRS-99	Compatibilidad con el Bus KRATOS		x				
	SyRS-105	Compatibilidad Estructural	x					
Estados y modos del sistema	SyRS-44	Standby		x				
	SyRS-43	Reducción de Velocidad de Giro		x				
	SyRS-42	Adquisición de Orientación Inicial		x				
	SyRS-41	Modo de Apuntado Preciso		x				
	SyRS-40	Modo de Giro por Comando		x				
	SyRS-38	Modo de Control de Órbita		x				
	SyRS-37	Modo Seguro			x			
Características físicas	SyRS-100	Volumen	x					
	SyRS-101	Masa	x					
	SyRS-102	Integración Estructural	x					
Condiciones del medio ambiente	SyRS-115	Altitud		x				
	SyRS-70	Densidad Atmosférica			x			
	SyRS-71	Radiación			x			
	SyRS-72	Temperatura			x			
	SyRS-74	Reentrada a la Atmósfera		x				
Seguridad del sistema	SyRS-106	Pirotécnicos	x					
	SyRS-107	Detección de Anomalías			x			
	SyRS-108	Interferencia de Partes Móviles	x					
	SyRS-109	Mitigación de Generación de Basura Espacial		x				
Manejo de la Información	SyRS-103	Telemetría				x		
	SyRS-104	Comandos				x		
	SyRS-110	Anomalías			x			
Políticas y Regulación	SyRS-117	Dimensiones de CubeSat	x					
	SyRS-118	Restricciones de Importación		x				
	SyRS-119	Materiales y Procesos		x				
	SyRS-120	Mitigación de Desechos Espaciales		x				
	SyRS-121	Requerimientos y Verificación		x				
	SyRS-123	Simbología Eléctrica		x				
	SyRS-122	Planos y Diagramas		x				
	SyRS-154	Diseño de Circuitos Impresos		x				

Requerimientos del sistema			Métodos de verificación				Comentarios	Estado
Sección	ID	Requerimientos	Inspección	Análisis	Demostración	Prueba		
Mantenimiento del Ciclo de Vida del Sistema								
	SyRS-112	Logística		x				
	SyRS-113	Provisión de Planos y Documentación	x					
	SyRS-114	Vida Útil del Sistema		x				
Empaquetado, Manejo, Envío y Transporte								
	SyRS-30	Empaquetado, Manejo, Envío y Transporte	x					

18. Anexo E: Matriz de verificación del software

Requerimientos del software			Métodos de verificación				Comentarios	Estado
Sección	ID	Requerimientos	Inspección	Análisis	Demostración	Prueba		
Interfaces Externas	SRS-125	Formato Entrada	x					
	SRS-77	Telecomando			x			
	SRS-78	Datos Obtenidos de los Sensores		x				
	SRS-126	Formato Salida	x					
	SRS-80	Control de Actuadores			x			
	SRS-81	Reportes de Estado				x		
Funciones	SRS-83	Telecomandos		x				
	SRS-84	Datos Espaciales			x			
	SRS-85	Retroalimentación del Sistema			x			
	SRS-86	Comando de Control Automático de Velocidad de Giro		x				
	SRS-87	Error Telecomando			x			
	SRS-88	Error Retroalimentación			x			
	SRS-89	Error Datos Espaciales			x			
	SRS-92	Apuntado Preciso		x				
	SRS-93	Control de Órbita		x				
	SRS-91	Control de Giro por Comando		x				
	SRS-94	End of Life		x				
	SRS-95	Selección de Datos			x			
	SRS-96	Velocidad Angular			x			
	SRS-97	Modo Seguro			x			
	SRS-136	Detección de Errores			x			
	SRS-137	Detección de Anomalías			x			
	SRS-100	Salida Movimiento de Actuadores				x		
	SRS-101	Salida Retroalimentación del Sistema			x			
	SRS-102	Retroalimentación Operador			x			
	SRS-103	Informe de Error	x					
	SRS-122	Relación-Telecomandos			x			
	SRS-123	Relación-Anomalías			x			
	SRS-124	Relación-Control de Giro		x				
Usabilidad	SRS-105	Autónomo		x				
	SRS-106	Anomalías			x			
	SRS-107	Telecomandos				x		
	SRS-108	Actuadores				x		
	SRS-109	Envío de Datos			x			
Requerimientos de Rendimiento	SRS-154	No Linealidad		x				
	SRS-110	Telemetría				x		
	SRS-111	Ejecución de Maniobras		x				
	SRS-112	Detección y Recuperación			x			
Base de Datos Lógica	SRS-113	Estados		x				
	SRS-114	Creación de Informes			x			
	SRS-115	Linux IIOS		x				
	SRS-116	Matrices de Control	x					
	SRS-117	Control de Errores		x				
Restricciones de Diseño	SRS-127	USB 2.0	x					
	SRS-128	Open Source		x				
Cumplimiento de Normas	SRS-129	Calidad del Software			x			
	SRS-130	Evaluación de Software		x				
	SRS-131	Procesos de Medición		x				
	SRS-132	Calidad de Datos		x				
	SRS-156	Ciclo de Vida del Software		x				
	SRS-155	Lenguaje de Modelado		x				
	SRS-157	Diagramas de Flujo		x				
Atributos del Sistema de Software	SRS-140	Comunicación Constante				x		
	SRS-141	Optimización		x				
	SRS-142	Uso en Vida Útil		x				
	SRS-120	Portabilidad		x				
	SRS-144	Licencias		x				
	SRS-145	Automatización		x				
	SRS-146	Operaciones de Usuario			x			

Referencias

- [1] Joseph N. Pelton y Scott Madry. "Introduction to the Small Satellite Revolution and Its Many Implications". En: *Handbook of Small Satellites: Technology, Design, Manufacture, Applications, Economics and Regulation*. Ed. por Joseph N. Pelton y Scott Madry. Cham: Springer International Publishing, 2020, págs. 1-29. ISBN: 978-3-030-20707-6. DOI: 10.1007/978-3-030-20707-6_1-2. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-20707-6_1-2.
- [2] L. Scatteia, A. Frayling y T. Atie. "The role of emerging space nations in supporting sustainable development and economic growth". En: *Leading insights on the space sector* 153 (2020). URL: <https://www.pwc.fr/fr/assets/files/pdf/2020/03/en-france-pwc-space-practice-emerging-space-nations-paper.pdf>.
- [3] Paul Scully-Power. "Space 2.0 - The next world revolution". En: *Journal & Proceedings of the Royal Society of New South Wales* 153.1 (2020), págs. 104-107.
- [4] *Increasing computing performance of ADCS subsystems in small satellites for earth observation*. 10th IAA Symposium on Small Satellites for Earth Observation. Berlin, Alemania, 2015. URL: https://www.researchgate.net/publication/277635649_Increasing_computing_performance_of_ADCS_subsystems_in_small_satellites_for_earth_observation.
- [5] L. Algarañaz y col. *The role of emerging space nations in supporting sustainable development and economic growth*. 2011. URL: https://www.procomer.com/wp-content/uploads/Materiales/condiciones-oportunidades-desarrollo-industria-aeroespacial-costa-rica2020-01-03_19-49-00.pdf.
- [6] California Polytechnic State University. *CubeSat 101: Basic Concepts and Processes for First-Time CubeSat Developers*. NASA, 2017.
- [7] J.M Kuiper. *Attitude Determination and Control System (ADCS)*. URL: <https://www.tudelft.nl/lr/organisatie/afdelingen/space-engineering/space-systems-engineering/research/miniaturization/attitude-determination-and-control-system-adcs>.
- [8] S. Janson y R. Welle. "The NASA Optical Communications and Sensor Demonstration Program: An Update". En: The Aerospace Corporation. 2014.
- [9] *AeroCube 7-OCSD-A (AeroCube 7 - Optical Communication and Sensor Demonstration-A)*. eoPortal Directory. URL: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/a/aerocube-ocsd#foot2%5C%29>.
- [10] A. Chaves. *Introducción a subsistemas satelitales*. Presentación de clase. 2021.
- [11] ECE Paris. "System Specifications for Attitude Determination and Control System". En: (). URL: http://www.ece3sat.com/pdf/System_Specifications_ADCS+_SOA.pdf.
- [12] J. Carvajal. "Agent-based Architectures Supporting Fault-Tolerance in Small Satellites". Tesis doct. Delft University of Technology, feb. de 2021. DOI: <https://doi.org/10.4233/uuid:b528d7be-e82d-4205-abdf-3fb3fa7f1011>.
- [13] A. Pasetti. *Background on Attitude and Orbit Control Systems (AOCS)*. 2002. URL: <https://www.pnp-software.com/AocsFramework/AocsBackground.html>.
- [14] S. Wu. *Satellite System Engineering – Attitude and Orbit Control System*. Presentación. Chinese Academy of Science, Shanghai Engineering Centre for Microsatellite, 2016.
- [15] J. Keese. *Satellite Telemetry, Tracking and Control Subsystems*. Presentación. Massachusetts Institute of Technology, 2003.
- [16] Hans Kuiper y Dennis Dolken. "A cutting edge 6U CubeSat ADCS design for Earth observation with sub-meter spatial resolution at 230–380 km altitude". En: *CEAS Space Journal* 12 (jun. de 2020). DOI: 10.1007/s12567-020-00323-7.

- [17] NASA Ames Research Center, Small Spacecraft Systems Virtual Institute. *State of the Art of Small Spacecraft Technology*. Ed. por S. Weston. 2020. URL: <https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa-2020/in-space-propulsion>.
- [18] California Polytechnic State University. *CubeSat Design Specification*. Especificaciones de diseño. 2015. URL: https://static1.squarespace.com/static/5418c831e4b0fa4ecac1bacd/t/56e9b62337013b6c063a655a/1458157095454/cds_rev13_final2.pdf.
- [19] NASA. *NASA Procedural Requirements for Limiting Orbital Debris and Evaluating the Meteoroid and Orbital Debris Environments*. Requerimientos de proceso. 2017. URL: https://www.orbitaldebris.jsc.nasa.gov/library/npr_8715_006b_.pdf.
- [20] Comisión de Naciones Unidas para el uso pacífico del Espacio Ultraterrestre. *Directrices para la reducción de desechos espaciales de la Comisión sobre la Utilización del Espacio Ultraterrestre con Fines Pacíficos*. 2010. URL: <https://www.unoosa.org/documents/pdf/spacelaw/sd/COPUOS-GuidelinesS.pdf>.
- [21] T. Farah y P. Roy. “Performance Analysis of Low Earth Orbit (LEO) Satellite Link in the presence of Elevation Angle, Fading, And Shadowing”. Tesis de licenciatura. BRAC University, ago. de 2009.
- [22] G. Dieter y L. Schmidt. *Engineering Design*. 5.^a ed. New York: McGraw-Hill, 2013. ISBN: 978-0-07-339814-3.
- [23] EcuRed. *Giroscopio*. URL: <https://www.ecured.cu/Giroscopio>.
- [24] OmegaEngineering. *Acelerómetro ¿Qué es un acelerómetro?* URL: <https://es.omega.com/prodinfo/acelerometro.html>.
- [25] AZoSensors. *What is a Sun Sensor?* URL: <https://www.azosensors.com/Article.aspx?ArticleID=223>.
- [26] EcuRed. *Magnetómetro*. URL: <https://www.ecured.cu/Magnet%5C%C3%5C%B3metro>.
- [27] DEWESoft. *RECEPTORES GPS / GNSS Y SISTEMAS DE NAVEGACIÓN INERCIAL (INS E IMU)*. URL: <https://dewesoft.com/es/productos/interfaces-y-sensores/receptores-gps-imu>.
- [28] Eduardo Interiano. *Introducción al filtro de Kalman*. URL: <http://www.ie.tec.ac.cr/einteriano/control/clase/11.ControlconFiltrodeKalman.pdf>.
- [29] Landis Markley y D. Mortari. “How to estimate attitude from vector observations”. En: 103 (ene. de 2000).
- [30] Jared Gilliam. “Attitude Determination and Control of ARKSAT-1”. En: (dic. de 2020). URL: <https://scholarworks.uark.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1097&context=meeguht>.
- [31] F. Reichel y col. “The Attitude Determination and Control System of the Picosatellite UWE-3”. En: *IFAC Proceedings Volumes* 46.19 (2013). 19th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace, págs. 271-276. ISSN: 1474-6670. DOI: <https://doi.org/10.3182/20130902-5-DE-2040.00088>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667015363345>.
- [32] Aymeric Kron, Amélie St-Amour y Jean de Lafontaine. “Four Reaction Wheels Management: Algorithms Trade-Off and Tuning Drivers for the PROBA-3 Mission”. En: *IFAC Proceedings Volumes* 47.3 (2014). 19th IFAC World Congress, págs. 9685-9690. ISSN: 1474-6670. DOI: <https://doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.00604>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016431460>.
- [33] Microsat Systems Canda Inc. *What is a Reaction Wheel?* URL: <http://www.reactionwheel.ca/resources/reactionwheel.html>.

- [34] CubeSatShop. *WNCTR-M002 Magnetorquer Rod*. URL: <https://www.cubesatshop.com/product/nctr-m002-magnetorquer-rod/>.
- [35] CubeSatShop. *Tensor Tech RS100 – Reaction Sphere*. URL: <https://www.cubesatshop.com/product/reaction-sphere/>.
- [36] Stefano Carletta y Paolo Teofilatto. “Design and Numerical Validation of an Algorithm for the Detumbling and Angular Rate Determination of a CubeSat Using Only Three-Axis Magnetometer Data”. En: *International Journal of Aerospace Engineering* 2018 (2018), págs. 1-12. DOI: 10.1155/2018/9768475.
- [37] S. Segan y D. Marceta. “Orbit determination and parameter estimation: Extended Kalman filter (EKF) versus least squares orbit determination (LSQOD)”. En: *Astronomical Observatory* 86 (2009), págs. 197-202.
- [38] Víctor Arroyo, Alicia Cordero y Juan R. Torregrosa. “Approximation of artificial satellites’ preliminary orbits: The efficiency challenge”. En: *Mathematical and Computer Modelling* 54.7 (2011). Mathematical models of additive behaviour, medicine engineering, págs. 1802-1807. ISSN: 0895-7177. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2010.11.063>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0895717710005546>.
- [39] Matteo Dentis, Elisa Capello y Giorgio Guglieri. “A Novel Concept for Guidance and Control of Spacecraft Orbital Maneuvers”. En: *International Journal of Aerospace Engineering* 2016 (2016), págs. 1-14. DOI: 10.1155/2016/7695257.
- [40] Willer Gomes dos Santos, Evandro Marconi Rocco y Valdemir Carrara. “Trajectory Control During an Aeroassisted Maneuver Between Coplanar Circular Orbits”. en. En: *Journal of Aerospace Technology and Management* 6 (jun. de 2014), págs. 159-168. ISSN: 2175-9146. URL: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2175-91462014000200159&nrm=iso.
- [41] Cypress. *Cypress Semiconductor PSoC® (Programmable System-on-Chip)*. 2019. URL: <https://www.mouser.co.cr/new/cypress-semiconductor/cypress-psoc/>.
- [42] STMicroelectronics. *STM32F1 Series*. URL: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f1-series.html>.
- [43] Facultad de Ingeniería. *Introducción al microcontrolador MSP430*. UNAM. URL: http://kali.azc.uam.mx/erm/Media/1123021/introduccion_al_msp430.pdf.
- [44] freeRTOS. *What is An RTOS?* Amazon Web Services. URL: <https://www.freertos.org/about-RTOS.html>.
- [45] Yocto Project. *Yocto Project Quick Start*. URL: <https://www.yoctoproject.org/docs/2.1/yocto-project-qs/yocto-project-qs.html>.
- [46] Scott Campbell. *BASICS OF THE I2C COMMUNICATION PROTOCOL*. URL: <https://www.circuitbasics.com/basics-of-the-i2c-communication-protocol/>.
- [47] Computer Hope. *USB*. URL: <https://www.computerhope.com/jargon/u/usb.htm>.
- [48] Scott Campbell. *BASICS OF UART COMMUNICATION*. URL: <https://www.circuitbasics.com/basics-uart-communication/>.
- [49] Microsemi Product Portfolio. *BJT Modules (Power Integrated Circuit, PIC)*. URL: <https://www.microsemi.com/product-directory/regulators/676-power-integrated-circuit-pic>.
- [50] Scott Campbell. *Electronics Tutorials*. URL: https://www.electronics-tutorials.ws/transistor/tran_7.html.
- [51] RS. *Relay Interfaces*. URL: <https://uk.rs-online.com/web/c/relays/general-purpose-relay-accessories/relay-interfaces/>.
- [52] Mouser Electronics. *Analog Devices Inc. ADM1278 Hot Swap Controller with PMBus™ Interface*. URL: <https://www.mouser.com/new/analog-devices/adi-adm1278-controller/>.

- [53] Altova. *Diagrama de bloque interno*. 2021. URL: https://www.altova.com/manual/es/UModel/umodelenterprise/uminternal_block_diagramsys.html.
- [54] *Systems and software engineering — Life cycle processes — Requirements engineering*. Español. ISO/IEC/IEEE, nov. de 2018.
- [55] ISOTools. *¿Por qué es importante la gestión de riesgos para tu empresa?* Mar. de 2015. URL: <https://www.isotools.org/2015/03/13/por-que-es-importante-la-gestion-de-riesgos-para-tu-empresa/>.
- [56] David Muñoz Holguín. *Comparación de metodologías para la gestión de riesgos en los proyectos de las Pymes*. Oct. de 2016. URL: <https://www.redalyc.org/pdf/1513/151354939004.pdf>.
- [57] Sarafí Juan y Salvador Capuz-Rizo. “ANÁLISIS COMPARATIVO DE ESTÁNDARES Y METODOLOGÍAS DE GESTIÓN DE RIESGOS DEL PROYECTO”. En: jul. de 2020.
- [58] Urmila K. *Financial Strategy*. Abr. de 2021. URL: <https://www.businessmanagementideas.com/strategic-management/financial-strategy/21040>.
- [59] Martin Gillespie. *What is Cash Flow Forecasting?* Abr. de 2021. URL: <https://www.cashanalytics.com/what-is-cash-flow-forecasting/>.
- [60] O. Zelaya. *COSTA RICA – Creación de la Agencia Espacial Costarricense (AEC)*. Mar. de 2021. URL: <https://central-law.com/costa-rica-creacion-de-la-agencia-espacial-costarricense-aec/>.
- [61] Pymes El Financiero. *¿Qué es el capital semilla y cómo funciona en el país?* Jun. de 2015. URL: <https://www.elfinancierocr.com/pymes/que-es-el-capital-semilla-y-como-funciona-en-el-pais/Y453Q6T2CBF3XKQWSMD6YT5V7U/story/>.
- [62] K. Mora. *TEC Emprende Lab se convierte en agencia operadora de capital semilla*. Feb. de 2021. URL: <https://www.tec.ac.cr/hoyeneltec/2021/02/26/tec-emprende-lab-se-convierte-agencia-operadora-capital-semilla>.
- [63] ”M. Camacho et all”. *Guía para el Uso del Crowdfunding a Base de Recompensas en Costa Rica*. Jun. de 2015. URL: https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/6648/guia_uso_crowdfunding_base_recompensas_costa_rica.pdf.
- [64] R. Garzozzi M. Messina C. Moncada J. Ochoa G. Ilabell R. Zambrano. *Planes de negocios para emprendedores*. first. Vol. 1. varios: Iniciativa Latinoamericana de Libros de Texto Abiertos, 2014.
- [65] Agencia Nacional de Infraestructura. *PLAN DE GESTIÓN SOCIAL (PGS)*. URL: <https://www.ani.gov.co/glosario/plan-de-gestion-social-pgs>.
- [66] *Guía Técnica para la Gestión Integral de los Residuos Electrónicos y Eléctricos (RAEE)*. Comité Ejecutivo para la Gestión Integral de Residuos Eléctricos y Electrónicos (CEGIRE). San José, Costa Rica, mar. de 2016.
- [67] Juan Chaves Noguera. *Estándares y Pruebas*. Jul. de 2020.
- [68] ECSS. *ECSS-Q-70-71A Rev.1 – Space product assurance – Data for selection of space materials and processes*. Jun. de 2004. URL: <https://ecss.nl/standard/ecss-q-70-71a-rev-1-space-product-assurance-data-for-selection-of-space-materials-and-processes-18-june-2004/>.
- [69] IEEE. *Graphic Symbols for Electrical and Electronics Diagrams*. English. Canadian Standards Association, dic. de 1993. URL: https://www.ee.iitb.ac.in/~spilab/Tips/ansii_graphic_symbols_for_electrical_and_electronics_daigrams_1993.pdf.
- [70] ASME. *Engineering Drawing Practices*. 2017. URL: <https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/y14-100-engineering-drawing-practices>.
- [71] Altium. *CUMPLIR CON LAS NORMAS IPC PARA CIRCUITOS IMPRESOS*. URL: <https://www.altium.com/es/solution/complying-with-ipc-standards-for-pcb-design>.

- [72] ISO/IEC. *Information technology — Object management group systems modeling language (OMG SysML)*. Mar. de 2017. URL: <https://www.iso.org/standard/65231.html>.
- [73] María Antonieta Abud Figueroa. *Calidad en la Industria del Software. La Norma ISO-9126*. Ene. de 2012. URL: <https://www.nacionmulticultural.unam.mx/empresasindigenas/docs/2094.pdf>.
- [74] ISO/IEC. *Information technology — Software product evaluation*. Abr. de 1999. URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/c2ba7d60-5124-4b9b-8c1b-1d6a335d9a28/iso-iec-14598-1-1999>.
- [75] ISO/IEC. *Systems and software engineering — Measurement process*. Mayo de 2017. URL: <https://www.iso.org/standard/71197.html>.
- [76] ISO/IEC. *Software engineering — Software product Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) — Data quality model*. Dic. de 2008. URL: <https://www.iso.org/standard/35736.html>.
- [77] 9001Simplified. *ISO 9001 Flowcharts*. Sep. de 2018. URL: <https://www.9001simplified.com/learn/iso-9001-flowcharts.php>.
- [78] ISO/IEC. *Systems and software engineering — Software life cycle processes*. Nov. de 2017. URL: <https://www.iso.org/standard/63712.html>.