

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería Electrónica



Taller Integrador

Reporte Final

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

14 de junio de 2021

Índice

1. Introducción y organización del equipo de trabajo	4
1.1. Descripción del problema	4
1.2. Estado del arte	6
1.3. Equipo Orbital Guidance	10
1.3.1. Misión y visión de OG	10
1.3.2. Objetivos y valores de OG	10
1.3.3. Definición de roles	11
1.3.4. Matrices de gestión organizacional	14
1.3.5. Organigrama y metodología de trabajo	14
1.4. Planificación de Actividades	18
2. Visión general del proyecto	21
2.1. Análisis de los alcances del proyecto	21
2.2. Descripción del concepto de operaciones	21
2.2.1. Modos de operación del satélite	22
2.2.2. Modos de operación del AOCS	23
2.2.3. Asociación entre modos de operación del satélite y Clarity	23
2.3. Vista operacional del sistema	24
2.3.1. Diagrama de casos de uso	24
2.3.2. Diagrama de secuencias	26
2.4. Exploración del espacio de diseño	30
2.4.1. Árbol de problemas y subproblemas de diseño	31
2.4.2. Descripción de problemas	32
2.4.3. Propuestas de solución	33
2.4.4. Filtros absolutos	36
2.4.5. Resumen de la selección de soluciones	36
2.5. Arquitectura del sistema	38
2.5.1. Vista funcional del sistema	38
2.5.2. Síntesis de la arquitectura física del sistema	38
2.5.3. Arquitectura de software	42
3. Diseño detallado	45
3.1. Diseño de hardware	45
3.1.1. Microcontrolador	45
3.1.2. Sensores	46
3.1.3. Actuadores	47
3.1.4. Interfaz de control de potencia	49
3.1.5. Otros componentes	49
3.2. Diseño de software	53
3.2.1. Software General	53
3.2.2. Comunicación	54

3.2.3. Estimación	55
3.2.4. Control	58
3.2.5. Adquisición de datos	61
3.2.6. Generar informes	62
3.3. Integración del diseño	63
3.3.1. Integración eléctrica	65
3.3.2. Integración mecánica	67
3.3.3. Integración de software	73
4. Análisis del diseño	74
4.1. Estrategia de verificación de requerimientos	74
4.1.1. ¿Cómo se verifica?	74
4.1.2. ¿Quién o quienes verifican?	74
4.1.3. ¿Cuándo se verifica?	75
4.1.4. ¿Dónde se verifica?	75
4.2. Desempeño del Diseño	79
4.3. Trayectoria del satélite	79
4.4. Dinámica del Satélite	80
5. Estrategia de sostenibilidad y regulaciones	89
5.1. Estrategia de sostenibilidad	89
5.1.1. Programa de información y comunicación	89
5.1.2. Programa de acompañamiento social	90
5.1.3. Programa de seguimiento y evaluación	90
5.1.4. Gestión de residuos eléctricos y electrónicos	90
5.2. Regulaciones.	93
5.2.1. Normas y estándares aplicables.	93
5.2.2. Implementación de las normas y estándares.	97
6. Gestión de riesgos	99
6.1. Identificación	99
6.2. Análisis	102
6.3. Mitigación	104
7. Plan de negocios	108
7.1. Modelo de negocios	108
7.1.1. Análisis de Mercado	108
7.1.2. Modelo de negocios de Orbital Guidance	108
7.2. Estrategia financiera	109
7.3. Obtención de financiamiento	110
7.4. Capital inicial de trabajo	111
7.5. Capital para inicio de operación	112
7.6. Fuentes de ingreso	113
7.7. Estructura de Costos	113

7.8. Inversiones	114
7.9. Análisis financiero	114
8. Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro	118
8.1. Conclusiones	118
8.2. Recomendaciones y trabajo futuro	121
9. Anexo A: Tablas de casos de uso	122
10. Anexo B: Matrices de Pugh	126
11. Anexo C: Requerimientos del sistema	129
12. Anexo D: Requerimientos de software	145
13. Anexo E: Matrices de verificación	163
14. Anexo F: Plano del diseño del bracket de sujeción del propulsor	170
15. Anexo G: Diagrama Eléctrico	173
Referencias	174

1. Introducción y organización del equipo de trabajo

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.

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 incor-

poración 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 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. Dentro de este ámbito de necesidades reside el eje central de este proyecto, el cual es la presición en el apuntado de los instrumentos del satélite, provista por el AOCS. Como se mencionó anteriormente, la sofisticación de los instrumentos de medición utilizados como carga útil en las misiones espaciales llevadas a cabo por satélites pequeños ha traído consigo la necesidad de tasas de transmisión más altas para el cumplimiento de la misión, además, nichos emergentes, como lo son las constelaciones de satélites para ofrecer internet satelital, han explotado las altas capacidades que ofrecen las comunicaciones ópticas.

Se presentan en [10, 11] determinaciones teóricas para los requerimientos de precisión en satélites con sistemas de comunicación óptica, las cuales se hacen tomando en cuenta aspectos relevantes para esta tecnología, como lo es la apertura del haz y fluctuaciones en el ángulo de llegada generadas por efectos diversos. Estas determinaciones teóricas, junto con sus simulaciones, concluyen que el requerimiento de precisión se encuentra en el orden de los micro radianes (alrededor de 50 micro grados), sin embargo, en [9] se explica que los sistemas ópticos con las características que se plantean en [10, 11] exceden las capacidades de las plataformas CubeSat en términos de volumen y masa. En [9] se presenta la misión AeroCube 7 - Optical Communication and Sensor Demonstration-A, en la cual se logró establecer comunicación mediante su sistema de comunicaciones ópticas (diseñado para lograr transmisiones a tasas de 50 Mbits/s en una plataforma CubeSat) utilizando un ADCS con una precisión de apuntado de 0.1 grados. Dados los comentarios provistos por el Project Sponsor de Clarity, este valor de precisión muestra un desempeño bajo, por lo que se debería tomar como el límite y más bien apuntar a valores en el orden de los 0.01 grados, o milí radianes.

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 atmósfera, 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. De esto nace el objetivo del proyecto, el cual consta del diseño de un AOCS que permita proveer de las características necesarias para un alto desempeño de nanosatélites.

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 [12]. 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.

Según [13], 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

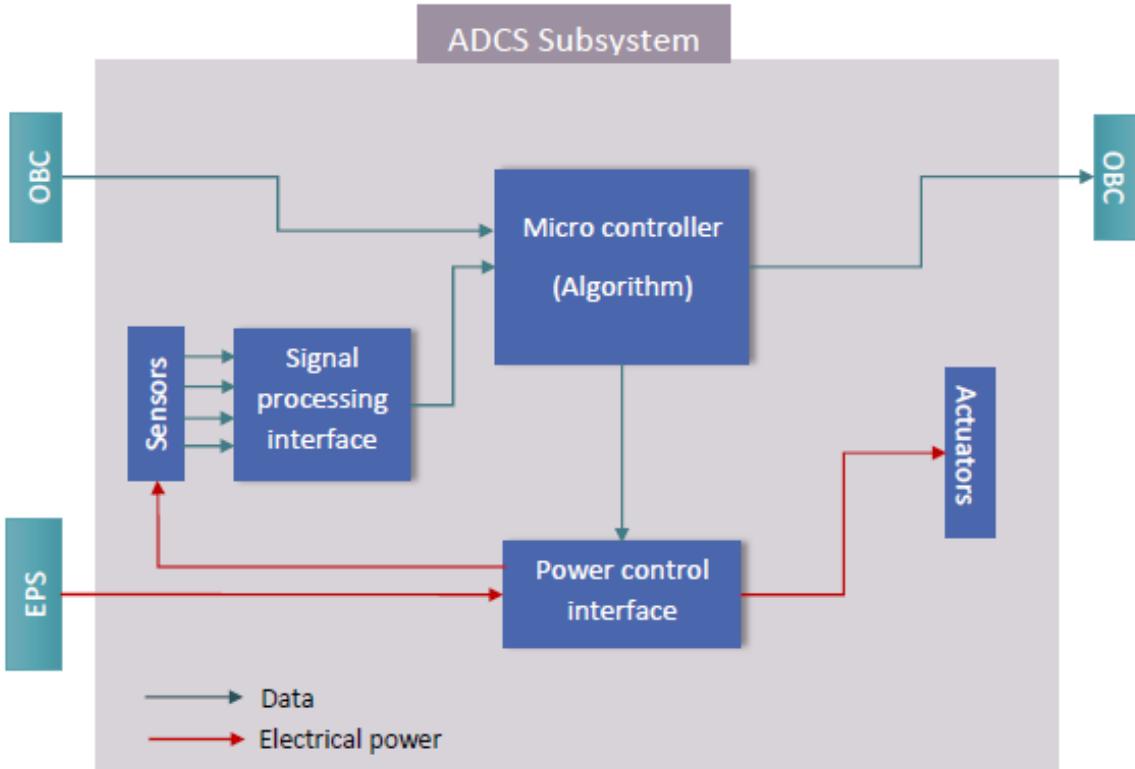


Figura 1: Esquema general de la composición de un ADCS. La diferencia entre el esquema presentado y el de un AOCS radica en la inclusión de actuadores generadores de ΔV .

Obtenido de [13].

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 [14] 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 interesar 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 interesar al AOCS con el C&DH 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 [14] se presenta en la figura 2.

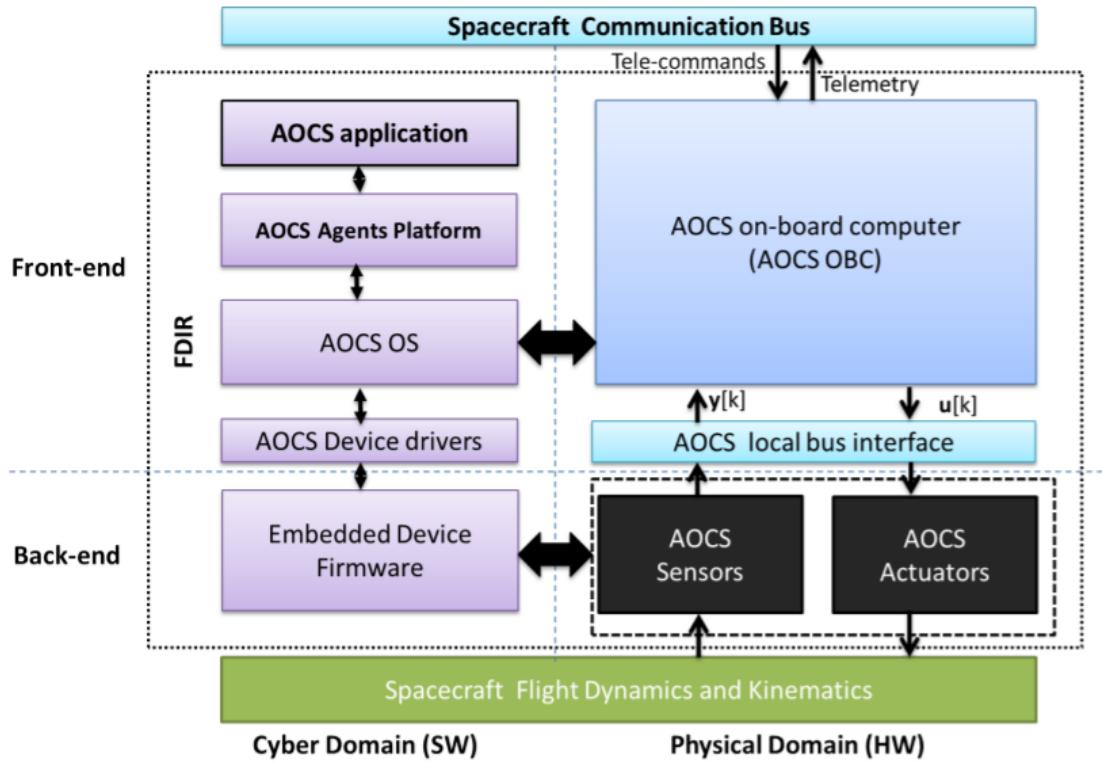


Figura 2: Arquitectura propuesta de un AOCS.

Obtenido de [14].

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 [15]. Una vista interpretada como de alto nivel se presenta en [16], donde se definen tres modos de operación: Modo seguro, modo nominal y modo de control de órbita. Dentro del modo seguro expuesto en [16] 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 [15] 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 [14], los cuales están en un nivel de abstracción intermedio en cuanto al presente en [16] y [15], 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 [17], 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 presión 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 [18]. Según [19], sistemas de 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 10cm × 10cm × 10cm 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 [20] que no deben utilizarse elementos pirotécnicos en ninguno de los sub sistemas del satélite.

Para la mitigación de generación de desechos espaciales se detalla en las especificaciones de diseño de CubeSats [20] que se deben seguir los procedimientos establecidos por NASA en [21], pero a un nivel global se deben seguir los lineamientos establecidos por UNOOSA. Según las directrices establecidas por este ente [22] para la reducción de desechos espaciales, se debe limitar la presencia de naves espaciales en la órbita baja terrestre (LEO, la cual, según [23], 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.

1.3. Equipo Orbital Guidance

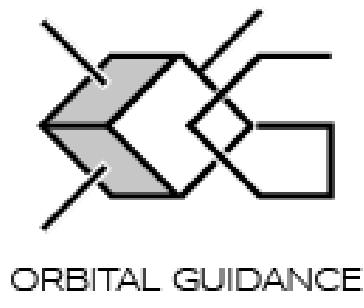


Figura 3: Logotipo de Orbital Guidance.

Orbital Guidance nace de la conformación de un equipo de trabajo para el curso Taller Integrador de la carrera de Ingeniería Electrónica en el primer semestre del año 2021. El campo de trabajo de OG es el ámbito espacial, en específico en el diseño de subsistemas satelitales especializados y de alto desempeño.

En esta sección se describirá la naturaleza de OG como empresa mediante la misión y visión que la guían, así como los diferentes objetivos y valores que marcan el paso para el cumplimiento pleno de los anteriores. Además de esto, se presenta la conformación del equipo, así como también el organigrama y metodología de trabajo que se utilizó en el desarrollo del proyecto.

1.3.1. Misión y visión de OG

La misión y visión de una empresa (junto con los valores y objetivos), según [24], son declaraciones que definen el rumbo de la cultura organizacional del equipo o empresa dado que constituyen el núcleo central de la dimensión cultural y estratégica en una organización. Estos elementos atienden a las aspiraciones del equipo o empresa, hacia dónde se quiere apuntar y delimitan a alto nivel el campo de trabajo de la misma.

Misión: La misión de Orbital Guidance es el diseño de subsistemas especializados para pequeños satélites con capacidad operativa que permitan la integración con tecnologías actuales para ampliar sus alcances, de acuerdo a las necesidades del cliente y en el contexto del crecimiento Latinoamericano en el ámbito espacial.

Visión: Ser partícipes activos en el desarrollo de tecnología espacial en uso, aportando a la visibilidad de Latinoamérica como una región activa e inclusiva en este ámbito.

1.3.2. Objetivos y valores de OG

Los valores, según [24], establecen la manera en la que se deben desarrollar las diferentes tareas que realiza la organización para el cumplimiento de sus metas. Por otra parte, los objetivos son puntos a cumplir definidos para acercar a la organización al

cumplimiento de su meta.

Objetivos:

- Realizar una adecuada selección de hardware para la satisfacción de las necesidades de los clientes.
- Diseñar algoritmos de control y comunicación eficientes para la ejecución de funciones según la arquitectura del sistema.
- Establecer una comunicación activa con el fin de identificar las necesidades del cliente.

Valores:

- Calidad y desempeño
- Integridad
- Enfoque en el cliente

1.3.3. Definición de roles

Orbital Guidance cuenta con un equipo de trabajo conformado por diez estudiantes avanzados de la carrera de Ingeniería Electrónica. Este equipo está segmentado en tres secciones: Gerencia, área técnica y área administrativa. A continuación se presentan y definen los roles que ocupan los integrantes de OG.

■ Gerente de proyecto: José María Jiménez Coronado

Según la Universidad Internacional Iberoamericana [25], el gerente del proyecto es quien define, plantea y planifica el proyecto estableciendo objetivos y velando por su cumplimiento. Este rol cumple con las tareas de ser intermediario entre el equipo y el sponsor, coordinar la planificación de tareas, supervisar el cumplimiento de los objetivos del proyecto y gestionar los cambios cuando estos sean necesarios. Se especifica en [26] que este rol tiene la autoridad y la responsabilidad sobre el proyecto y es el encargado de formar sub-equipo técnicos para la coordinación del trabajo especializado, así como la calendarización y coordinación de reuniones.

■ Administrador del proyecto: Oscar Arias Cruz

Acorde con la metodología de trabajo Scrum, el administrador de proyecto hará la labor del “Scrum Master” esto incluye, pero no se limita a: facilitación de reuniones y ceremonias, facilitar y coordinar procesos, dar retroalimentación y activamente procurar remover impedimentos [27].

■ Supervisor: Edwing Gómez Ruiz

El supervisor es el encargado de planificar las tareas o labores, así como organizar y dirigir a su equipo. También tiene la función de solucionar problemas y tomar decisiones ante las situaciones. Además, el supervisor está pendiente de las actividades y desempeño del personal que dirige [28].

- **Documentador: Frander Díaz Ureña**

El documentador es el encargado de recopilar los materiales generados y presentarlos de una manera ordenada de forma que sea posible dar a conocer los alcances obtenidos en el proyecto [29].

- **Secretaria: Isela Aley De la Hoz**

El puesto de secretaría tiene como responsabilidades encargarse del área administrativa, asistir a los puestos gerenciales o ejecutivos en términos de anotaciones, agenda y manejo de comunicaciones. Para este puesto es vital tener habilidades organizativas y atención al detalle. En la metodología de Scrum además, se encarga de planificar los eventos y mantiene el horario de los equipos actualizados[30].

- **Asesor financiero: Richard Sánchez Miranda**

Un asesor financiero es un profesional que brinda consultoría y asesoramiento sobre las finanzas de una persona o entidad. Es decir, pueden ayudar a las personas y las empresas a alcanzar metas u objetivos financieros antes brindando a los clientes estrategias y formas de generar más ingresos, reducir costos o eliminar deudas, los asesores financieros pueden ayudar a evaluar la rentabilidad de proyectos de forma independiente para cuidar del bienestar financiero de la persona o entidad [31].

- **Business Intelligence: Steven Rojas Cubero**

El encargado de BI se encuentra envuelto en un proceso interactivo en el que explora y analiza información estructurada sobre un área (normalmente almacenada en un datawarehouse), para descubrir tendencias o patrones, a partir de los cuales derivar ideas y extraer conclusiones. El proceso de Business Intelligence incluye la comunicación de los descubrimientos y efectuar los cambios. Las áreas incluyen clientes, proveedores, productos, servicios y competidores [32].

- **Gestión de riesgos: Anyelo Pacheco Elizondo**

El gestor de riesgos es el encargado de buscar y analizar posibles riesgos que puedan suceder al trabajar en el proyecto y también riesgos inherentes al producto. Además, este rol tiene la tarea de desarrollar planes para estos riesgos imprevistos [33].

- **Control de calidad: Óscar Arias Cruz**

Este rol se encarga de revisar la calidad del material o productos que entren o salgan de la compañía. Al encargado de este rol le corresponden tareas de análisis de los productos, llevar un control detallado de los defectos, verificar los resultados de las pruebas de calidad [34].

- **Líder técnico: Frander Díaz Ureña**

Según la metodología de trabajo Scrum el líder técnico tiene dos principales funciones, las cuales son, recibir del Business Analyst especificaciones de alto nivel para transformarlas en actividades detalladas que se asignan a roles técnicos específicos y supervisar el trabajo técnico que delega. Es el experto a nivel técnico para la ejecución de las tareas de desarrollo y debe considerar usar la tecnología que permita obtener los resultados óptimos del proyecto en el tiempo definido [35].

- **Ingeniero de hardware: Richard Sánchez Miranda**

Ofrece servicios de ingeniería de hardware específicos de dominio en ingeniería de VLSI ASIC, FPGA y SoC, diseño de placas, software integrado, ingeniería mecánica y diseño, creación de prototipos y servicios de ingeniería de valor agregado, como ingeniería de cumplimiento, verificación y validación independientes y fabricación de bajo volumen. Además, analizan equipos complejos para determinar la mejor manera de mejorarlos y diseñar nuevos tipos de dispositivos de tecnología de la información [36].

- **Ingeniero de software: Anyelo Pacheco Elizondo**

Este se encarga de crear, implementar, mantener y mejorar algoritmos para la resolución de problemas, utilizándolos en la solución a la necesidad del cliente.

- **Diseño estructural: José María Jiménez Coronado**

El encargado del diseño mecánico o estructural es la persona responsable de la elección de componentes y materiales y del diseño físico del ensamblaje del producto mediante herramientas CAD según las especificaciones y requerimientos del problema [37].

- **Integrador: Sebastián Vargas Zúñiga**

A grandes rasgos, los integradores se encargan de unir componentes independientes –incluso de diferentes proveedores– para crear un sistema único, adecuado a la realidad y tareas particulares de una compañía [38]. Es por ello que el integrador tiene que proveer de un plan de compilación para efectuar dicha integración de los subsistemas. Así mismo, este posee un amplio conocimiento en todo el sector técnico que compete al sistema específicamente hablando de las interdependencias entre los subsistemas y las herramientas utilizadas para la integración, por lo tanto este también requiere un alto nivel de coordinación ya que se tiene que comunicar con los demás roles técnicos.

- **Validación y verificación: Isela Aley De la Hoz**

El encargado del puesto de validación y verificación es el responsable de planificar, diseñar, implementar y evaluar las pruebas necesarias para garantizar calidad y el cumplimiento de requerimientos del proyecto. Para poder realizar las actividades de este rol se requiere conocer el funcionamiento del sistema y de las herramientas a utilizar para la verificación. Además, se necesitan habilidades para diagnosticar y resolver problemas [39].

- **Ingeniero en sistemas: Steven Rojas Cubero**

La Ingeniería de Sistemas es la encargada de encontrar soluciones prácticas a la vida cotidiana a través de conocimientos matemáticos y ciencias de la ingeniería. La ingeniería de sistemas requiere de un método, el análisis, la experiencia, un enfoque investigativo y un soporte científico. La obligación principal del ingeniero es poner los recursos de la naturaleza al servicio del ser humano. El ingeniero debe poseer algunas cualidades básicas para su profesión: Creatividad, capacidad de pensamiento convergente, capacidad de pensamiento divergente, capacidad analítica y el dominio de un idioma técnico [40].

■ **Normas y estándares: Edwing Gómez Ruiz**

El gestor de normativas es el encargado de la investigación de las normas y estándares que debe seguir su organización para su funcionamiento eficiente y la satisfacción del cliente. Este debe verificar que se cumplan estas normas para garantizar la calidad y seguridad en la organización, así como también de los productos y servicios que ofrecen [41].

■ **Simulaciones y cálculos: Wilson Bermúdez Campos**

Según [42], es la persona encargada de estudiar y describir la comprensión de los elementos de un sistema de interés, teniendo en cuenta las características esenciales del mismo, obteniendo así un modelo matemático que describa el comportamiento del mismo. Además, mediante el uso de software de simulación, verificar el funcionamiento del sistema y experimentar diferentes decisiones analizando sus resultados, y con esto contribuir en las tareas de gestión y de toma de decisiones durante el proceso de diseño.

1.3.4. Matrices de gestión organizacional

Para el correcto manejo del recurso humano en el desarrollo del proyecto Clarity por parte de Orbital Guidance, se definieron diferentes matrices que establecen relaciones, responsabilidades y el escalamiento en caso de alguna eventualidad. La primera matriz que se definió fue la de roles y responsabilidades, en la cual se asignan las responsabilidades correspondientes a cada uno de los roles definidos. Dicha matriz se puede observar en la figura 4.

Para establecer el nivel de involucramiento y responsabilidad de los roles con respecto a las actividades a realizar, se desarrolló una matriz RACI, la cual tiene como fin asignar funciones a cada rol dependiendo del papel que este debe desarrollar en determinada actividad. Para completar esta matriz existen 4 tipos de funciones, las cuales son: **Responsible** (Responsable), **Accountable** (Autoridad), **Consulted** (Consultor) e **Informed** (Informado). Dicha matriz se dividió en 3 partes para poder visualizarla correctamente, las matrices de las partes 1, 2 y 3 se muestran en las figuras 5, 6 y 7 respectivamente.

Para definir la estrategia de comunicación dentro del equipo en caso de eventualidades, se definió una matriz de escalamiento. Esta matriz se utiliza para dar a conocer al equipo el escalamiento jerárquico que se debe realizar cuando se necesita ayuda con la realización de una tarea o se sobrepasa el límite de tiempo para realizar la misma. En la figura 8 se puede observar la matriz de escalamiento.

1.3.5. Organigrama y metodología de trabajo

En esta sección se presenta el organigrama planteado para la empresa Orbital Guidance (OG) y la metodología asumida para el desarrollo del trabajo dentro del proyecto. Dicho organigrama se observa en la figura 9 y representa las relaciones básicas en términos de jerarquía. Las relaciones internas no se representan en este diagrama por cuestiones de forma y orden, ya que en el desarrollo del proyecto se evidenció la existencia de relaciones entre todos los roles, inclusive entre áreas.

R&R Matrix																			
Tarea / Rol	Sponsor	Gerente del proyecto	Administrador del proyecto	Líder técnico	Integrador	Diseñador Estructural	Validación y verificación	Ingeniero en sistemas	Normas y estandares	Hardware	Software	Simulaciones y Cálculos	Supervisor	Secretaria	Asesor financiero	Gestor de riesgos	Control de calidad	Documentador	Business intelligence
Contexto del proyecto	X	X	X																
Planificación de reuniones			X	X															
Estructura de trabajo	X	X	X											X					
Formulación de modelo de negocios																			X
Presupuesto	X	X		X										X					X
Calidad					X		X		X			X				X			
Cambiar procedimientos administrativos				X									X						
Aprobar cambios	X	X																	
Proveer herramientas de trabajo	X		X																
Investigación técnica				X	X	X	X	X	X	X	X	X				X	X		
Diseño del sistema					X	X		X		X	X								
Ánalisis de resultados			X	X			X				X	X	X			X	X	X	
Documentación de resultados														X				X	
Identificación de riesgos						X	X		X								X	X	
Gestión Interfaces				X				X											
Gestión de requerimientos																			
Generar el product backlog		X																	
Generar el sprint backlog			X																

Figura 4: Matriz R&R.

Actividades	Sponsor	Gerente del proyecto	Administrador del proyecto	Líder técnico	Integrador	Diseñador Estructural	Validación y verificación	Ingeniero en sistemas	Normas y estandares	Hardware	Software	Simulaciones y Cálculos	Supervisor	Secretaria	Asesor financiero	Gestor de riesgos	Control de calidad	Documentador	Business intelligence
Definición del problema	R	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Asignación de roles	I	R	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Coordinación de reuniones*	I	R	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	C	I	I	I	I
Administración de tareas*	C	R	C	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Administración de sprints*	C	R	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Generación de product backlog*	R	C	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Desglose de tareas para sprints*	I	R	C	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	C	I	I	I	I
Recopilación de feedback y toma de decisiones	C	C	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	R	C	C	C	C	C
Investigación de soluciones técnicas	C	I	I	R	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Definición de presupuesto	R	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Definición de modelo de negocios	I	I	A	C	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	A	I	I	I	R
Documentación de resultados*	I	C	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	R	I
Generación de presentaciones*	I	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	R	C
Definición del scope del proyecto	I	R	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Definir actividades de trabajo	I	C	R	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I

Figura 5: Matriz RACI, parte 1.

Para asegurar que el proyecto pueda desarrollarse correctamente y que las habilidades del equipo puedan aprovecharse al máximo es necesario utilizar una metodología de trabajo que permita al equipo organizar el trabajo de forma estructurada y eficiente. Generalmente las metodologías ágiles se suelen utilizar para proyectos de este tipo,

Actividades	Sponsor	Gerente del proyecto	Administrador del proyecto	Líder técnico	Integrador	Diseñador Estructural	Validación y verificación	Ingeniero en sistemas	Normas y estándares	Hardware	Software	Simulaciones y Cálculos	Supervisor	Secretaria	Asesor financiero	Gestor de riesgos	Control de calidad	Documentador	Business intelligence
Búsqueda de alternativas	C	A	R	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Selección de solución	I	R	C	C	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Búsqueda de componentes	I	I	R	I	I	I	I	C	C	C	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Selección de componentes	I	I	R	A	I	I	I	C	C	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Generación de diagrama de concepto	I	C	C	C	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	R	I
Gestión de requerimientos	I	I	I	I	C	I	I	R	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Gestión de interfaces	I	I	I	I	A	I	I	R	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Definición de la arquitectura lógica	I	I	I	R	C	I	I	C	C	I	C	I	I	I	I	C	I	I	I
Definición de la arquitectura física	I	I	I	R	I	C	I	C	C	I	I	I	I	I	I	C	I	I	I
Gestión de riesgos del sistema	I	I	I	A	I	C	I	C	C	I	I	I	I	I	I	R	C	I	I
Ejecución de simulaciones	I	I	A	I	I	I	I	I	C	C	R	I	I	I	I	I	I	I	I
Compilación de normativas	I	A	A	I	I	I	I	R	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Gestión de la calidad	I	A	A	C	C	C	C	C	C	C	I	I	C	C	C	R	C	I	I
Verificación de la rentabilidad de la solución	I	I	A	I	I	I	I	I	I	I	I	I	C	R	I	I	I	C	I

Figura 6: Matriz RACI, parte 2.

Actividades	Sponsor	Gerente del proyecto	Administrador del proyecto	Líder técnico	Integrador	Diseñador Estructural	Validación y verificación	Ingeniero en sistemas	Normas y estándares	Hardware	Software	Simulaciones y Cálculos	Supervisor	Secretaria	Asesor financiero	Gestor de riesgos	Control de calidad	Documentador	Business intelligence
Diseño de hardware	I	I	I	A	I	I	C	C	C	R	C	C	I	I	C	I	I	I	I
Diseño de software	I	I	I	A	I	I	C	C	C	C	R	C	I	I	I	I	I	I	I
Diseño estructural	I	I	I	A	I	R	I	C	C	I	C	C	I	I	I	C	I	I	I
Integración del sistema	I	I	I	A	R	I	C	C	I	C	C	C	I	I	I	I	I	I	I
Verificación de la gestión de interfaces	I	I	I	A	A	I	C	R	C	C	C	C	I	I	I	I	I	I	I
Verificación y validación	I	I	I	A	I	I	R	I	C	C	C	C	I	I	I	I	I	I	I
Análisis financiero	I	I	A	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	C	R	I	I	C
Verificación de cumplimiento de objetivos	I	R	A	A	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Gestión de la calidad del producto final	I	I	A	A	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	R	I	I	I
Generación del informe final	I	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	R	C
Determinación del estado del proyecto	R	A	A	A	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Presentación de los resultados	I	R	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A

Figura 7: Matriz RACI, parte 3.

Matriz de escalación																			
Responsable	Teléfono	Correo				Puesto				Nivel									
Frander Diaz	86149130	diazfrander@gmail.com				Líder técnico				1									
Oscar Arias	85656776	98.oscararias@gmail.com				Administrador del proyecto				1									
José María Jiménez	87297756	josemarijc2010@hotmail.com				Gerente del proyecto				2									
Johan Carvajal	25502687	johcarvajal@tec.ac.cr				Sponsor				3									

Figura 8: Matriz de escalamiento.

específicamente, se trabajará una metodología Scrum. A continuación, se describe los roles dentro de esta metodología, y cómo estos se relacionan con los roles descritos en el organigrama. La metodología Scrum está compuesta por ceremonias importantes que se explican en esta sección [43].

Los tres roles definidos dentro de la metodología Scrum son el Product Owner, el Scrum Master y el equipo de desarrollo. Sus responsabilidades se les asignan a otros

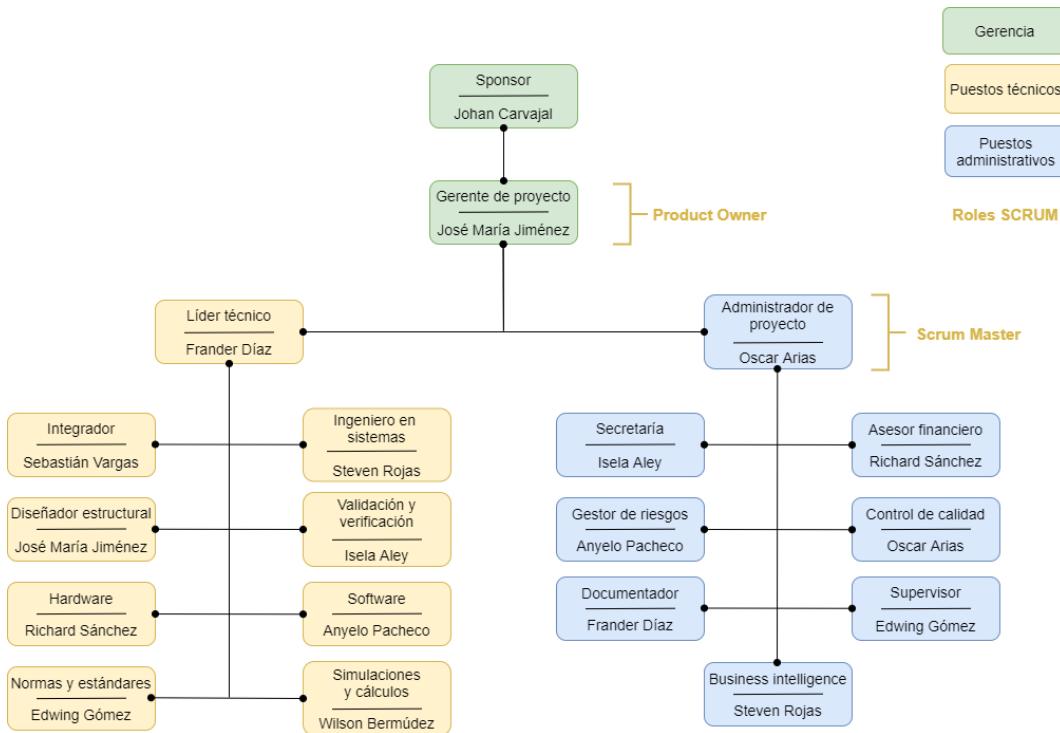


Figura 9: Organigrama del equipo de trabajo.

roles dentro del equipo [44].

- **Product Owner:** El propietario del producto se encarga de tomar decisiones que permitan al equipo desarrollar el producto de la mejor forma, para esto, es necesario que se conozca bien las expectativas del cliente para tener una visión general del trabajo acertada. Su otra tarea más importante es la de velar por el cumplimiento de los plazos planeados para las tareas. Este rol fue asignado al gerente del proyecto de Orbital Guidance, José María Jiménez Coronado.
- **Equipo de desarrollo:** El equipo de desarrollo es un grupo pequeño de personas, las relaciones internas en el equipo de trabajo son horizontales ya que dentro de este no hay jerarquía. El equipo debe ser interdisciplinario que pueda por sí solo desempeñar las tareas necesarias para el desarrollo del producto. Este rol les compete a todos los integrantes del equipo OG.
- **Scrum Master:** La persona que ejerce este rol está encargada de implementar en el equipo la metodología Scrum y brindar la ayuda necesaria al equipo para poder aplicar la metodología correctamente. Además, gestiona el backlog del producto de tal forma que pueda separarse en paquetes más concretos que se puedan realizarse semanalmente. El encargado de ejercer este rol es Óscar Arias.

Además de los roles, en Scrum es necesario entender los dos principales artefactos de esta metodología Product backlog y Sprint backlog

- **Product backlog:** Esta pila es una lista ordenada y cambiante de todos los requerimientos del producto, generarla es trabajo del propietario del producto. Esta contiene las características, requerimientos, funcionalidades, correcciones y mejoras necesarias en el producto.
- **Sprint Backlog:** Es un subconjunto de elementos de la pila de producto que se seleccionan para ser desarrollados en un sprint en particular, así como un plan para el desarrollo de estos elementos. Esta tarea se realiza en conjunto por el Scrum master y el equipo de desarrollo.

Finalmente, para entender el proceso de Scrum solo necesitamos conocer las ceremonias o eventos que se realizan.

- **Sprint:** Es un lapso de no más de un mes en el que se incrementa la cantidad de ítems de la lista del producto que están terminados. Está compuesto por la planificación del sprint, los Scrums diarios, la revisión del sprint y la retrospectiva del sprint.
- **Planeamiento del sprint:** Este evento tiene como producto un sprint backlog a desarrollar durante el sprint, el Scrum master se asegura de que los integrantes necesarios para completar el planeamiento estén en la reunión. Este plan se crea de forma conjunta entre todos los roles.
- **Scrum diario:** Es una reunión corta, de quince minutos, que se lleva a cabo para que el equipo sincronice las tareas que están realizando y se crea un plan para las siguientes 24 horas.
- **Revisión del sprint:** Al finalizar el sprint se realiza esta revisión para poder así actualizar la pila del producto y poder así planear el siguiente sprint.
- **Retrospectiva del sprint:** Este espacio es una oportunidad para el equipo de trabajo para poder analizar su desempeño y corregir apropiadamente. Este evento se sitúa justo entre la revisión del sprint y la planificación del siguiente.

Para la ejecución de la metodología se adaptaron los períodos entre los eventos definidos anteriormente tomando en cuenta la metodología del curso de Taller Integrador y la dinámica universitaria en la que los integrantes están inmersos. Cabe destacar de esta adaptación que lo que se realizó fue implementar reuniones semanales de aproximadamente dos horas que involucran a todos los miembros, en las cuales se presentaban avances, correcciones y el product backlog para la asignación de las tareas, así como la conformación de subgrupos de trabajo. Las sesiones de trabajo no se limitaron en tiempo ni en modo de ejecución, con el fin de permitir la flexibilidad necesaria para el cumplimiento de las demás tareas universitarias.

1.4. Planificación de Actividades

Con respecto a la planificación de actividades, OG ha planteado una distribución de tareas por fases para la realización de su primer proyecto:

En la fase 1 se define la empresa OG, construyendo su organización en conjunto con sus características y propuestas de valor. Además, se establecen los roles que llevan a cabo sus miembros, así como la metodología a seguir para sus operaciones. También se analiza el problema al cual responde el primer proyecto planteado por la empresa, nombrado Clarity, junto con los involucrados a este.

La fase 2 consiste en el análisis del proyecto Clarity para la propuesta de diseños y selección de la mejor solución al problema presentado. Para esto, es necesario la realización de un estudio que comprende las áreas de business intelligence, normas y estándares, riesgos, aspectos financieros y ambientales, requerimientos y se definen los métodos a aplicar para la validación y verificación de los requerimientos mencionados.

Por último, la fase 3 tiene el objetivo de trabajar en un diseño detallado de la solución planteada por la empresa, en el cual se desarrolla a detalle los aspectos de software, hardware y simulaciones relacionados al proyecto Clarity. Además, se concretan los procedimientos para la validación y verificación de los requerimientos, se lleva a cabo un análisis financiero de los recursos necesarios para la realización del proyecto y se plantea un plan contra los riesgos que se puedan presentar en el proyecto.

La figura 10 muestra el diagrama de Gantt utilizado por el equipo OG para las actividades que se realizaron durante todo el proyecto Clarity.

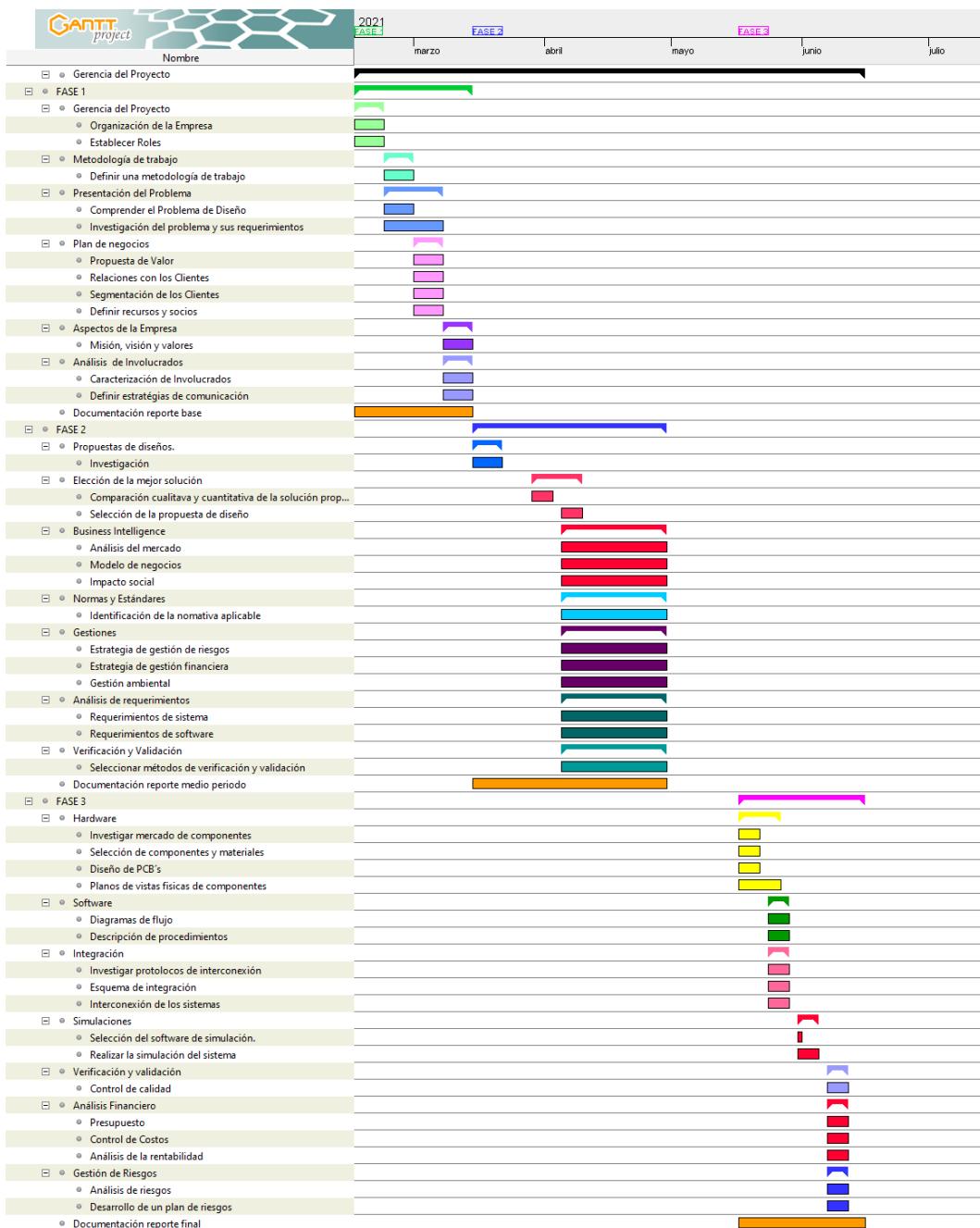


Figura 10: Diagrama de Gantt del equipo OG.

2. Visión general del proyecto

2.1. 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. Se puede ver la representación de este ejercicio en la figura 11.

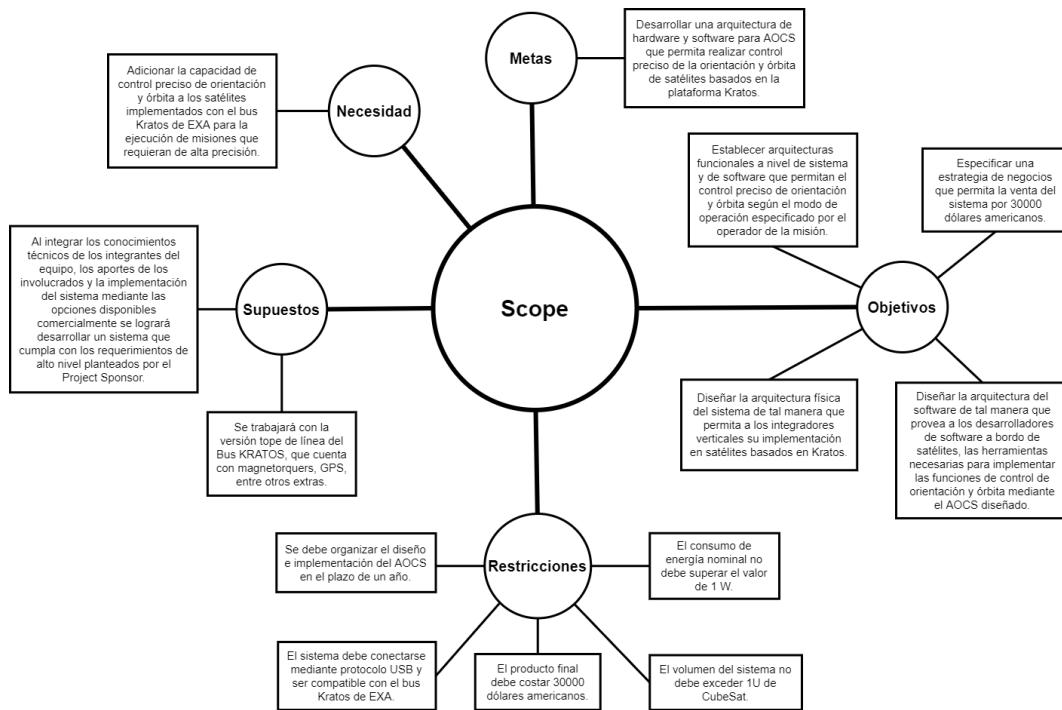


Figura 11: Scoping Exercise.

2.2. Descripción del concepto de operaciones

Para ilustrar el ciclo de vida en el ámbito de operación del proyecto Clarity se presenta en la figura 12 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.

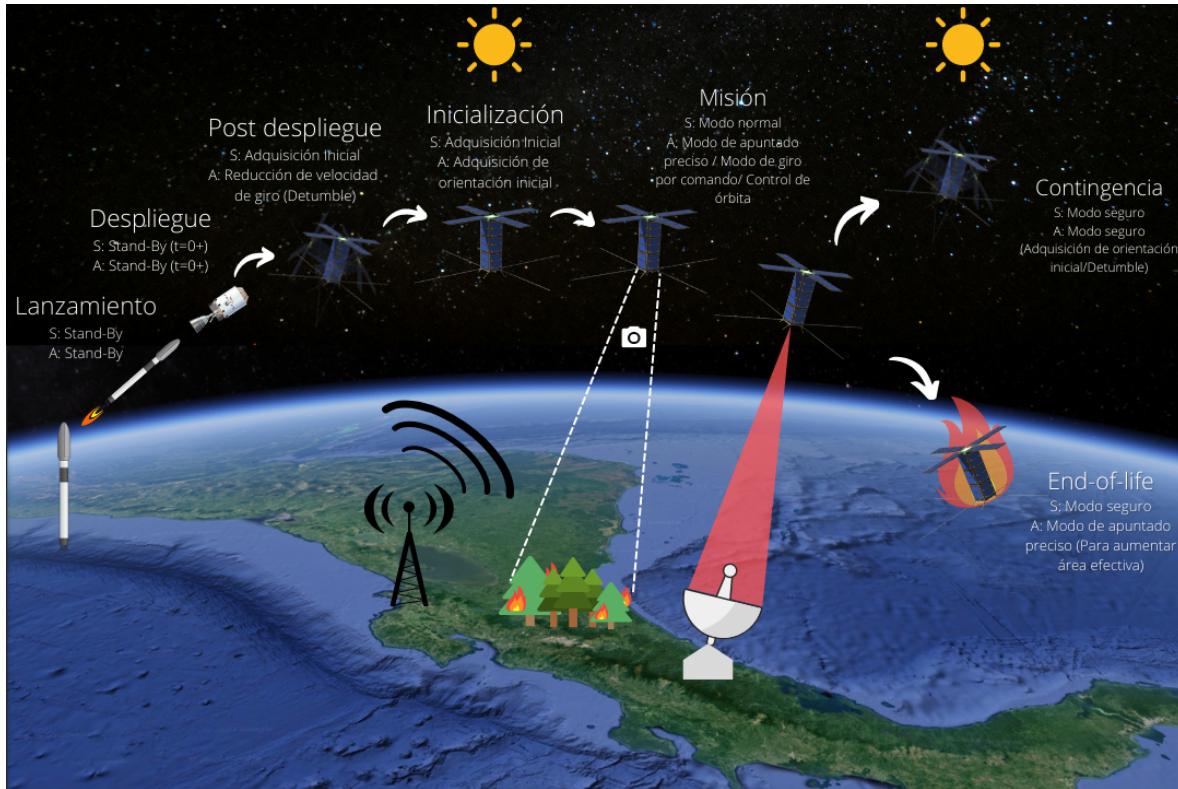


Figura 12: Concepto de operaciones del proyecto Clarity.

La descripción detallada de los modos de operación según los casos de uso, que se detallarán mas adelante, se encuentra en la sección 9 de anexos, sin embargo, se presenta a continuación una explicación de los mismos a manera de referencia, basada en la información disponible en [15].

2.2.1. 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.

2.2.2. 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 aislan 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.

2.2.3. Asociación entre modos de operación del satélite y Clarity

En el cuadro 1 se presentan las correspondencias 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.

2.3. Vista operacional del sistema

2.3.1. 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 13.

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 telemando es recibido por el sistema de telecomunicaciones este es decodificado y enviado al C&DH, el C&DH 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 sensado 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 telemando, 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 deseando mediante la minimización del error. Esta descripción puede ser apreciada de una mejor forma en el diagrama de casos de usos extendido en la figura 14.

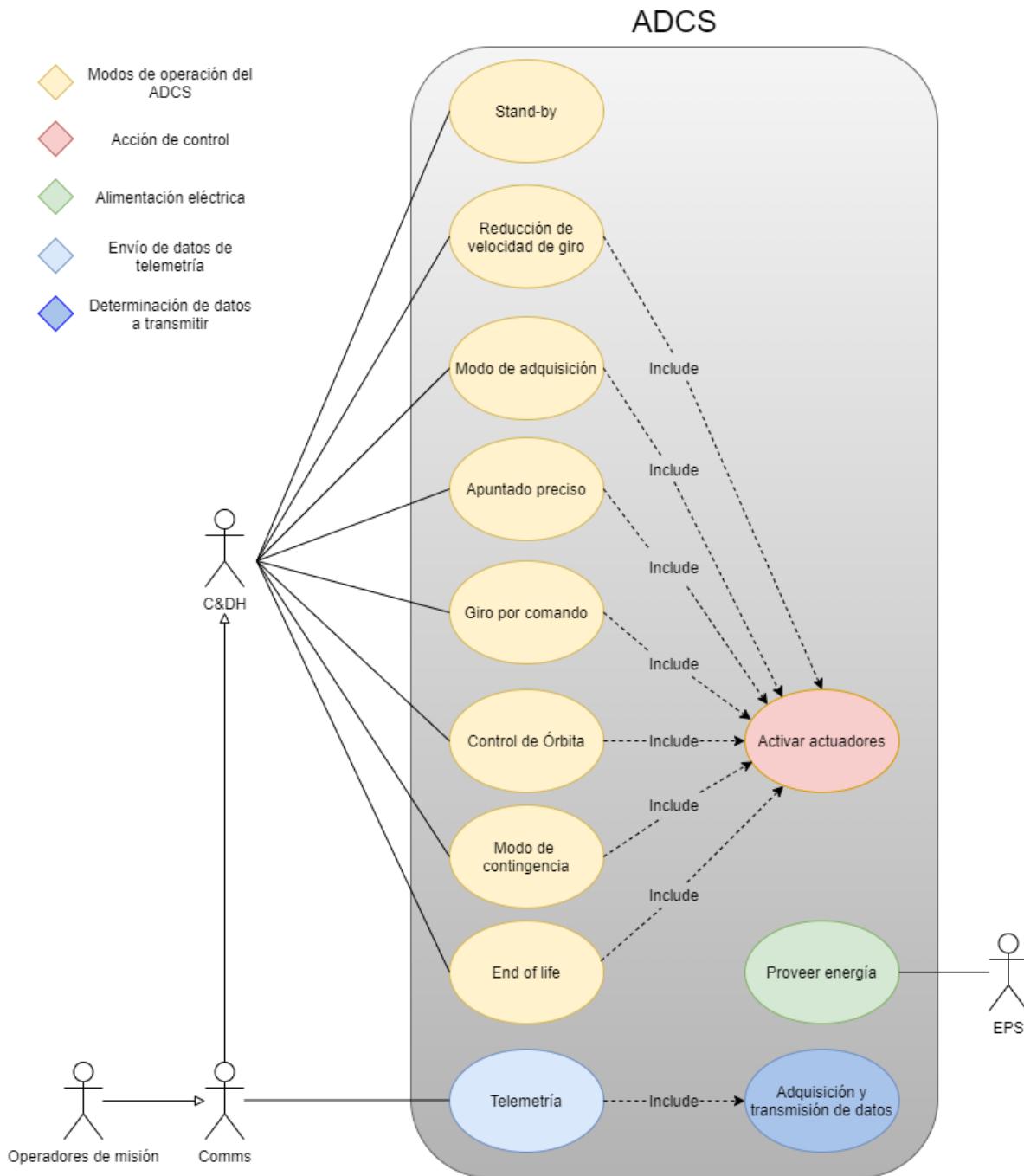


Figura 13: Diagrama de casos de uso del AOCS.

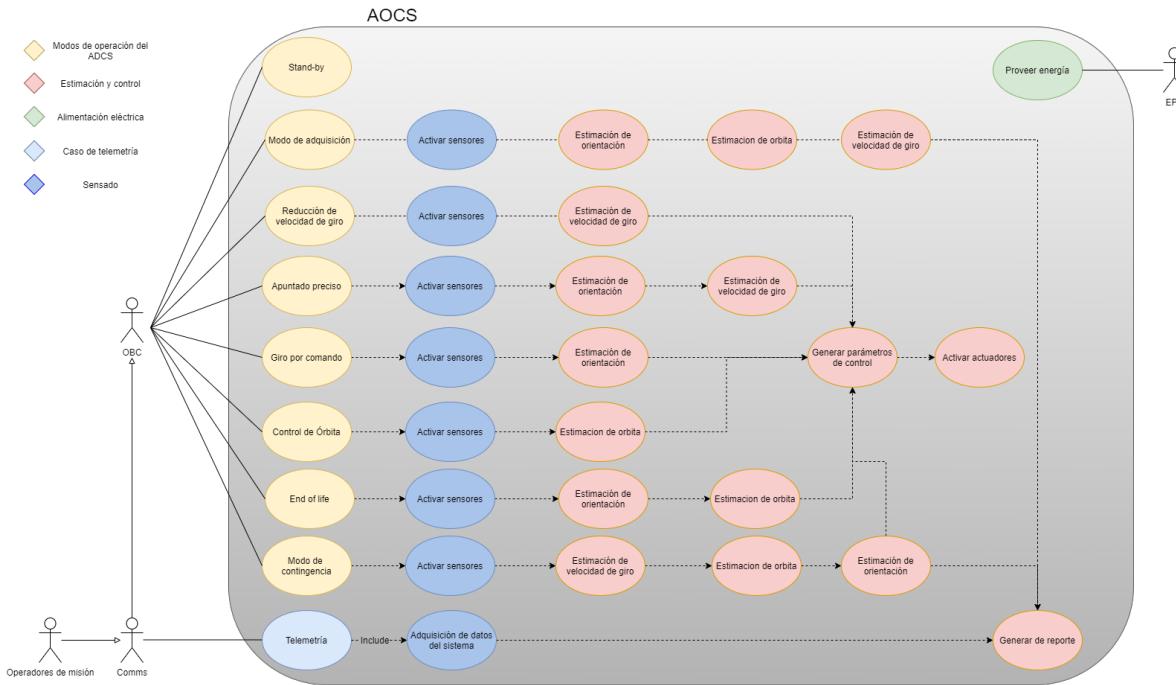


Figura 14: Diagrama de casos de uso extendido del AOCS.

2.3.2. 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 15, 16, 17, 19, 20, 21, 23 y 24 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 órbita, 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 C&DH, utiliza los sensores integrados en el AOCS con el fin de estimar la órbita, la velocidad de rotación y la orientación del sistema esto para proveer realimentación tanto al sistema como al operador.
- 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 C&DH,

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 órbita, giro por comando, apuntado preciso, en estos modos el telecomando es recibido por el sistema de comunicaciones y este es procesado y enviado al C&DH, este genera el paquete de instrucciones a ser ejecutado en el AOCS enviándole los datos requeridos como la órbita, 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 envía un reporte al C&DH el cual lo transmite al operador. El C&DH 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 órbita basura el sistema recibe los telecomandos para ejecutar el algoritmo de control de órbita y este genera un reporte final antes de detener todas sus funciones.

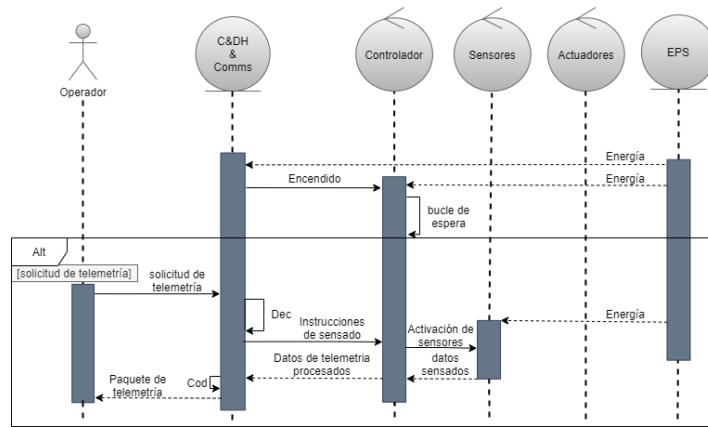


Figura 15: Modo de espera

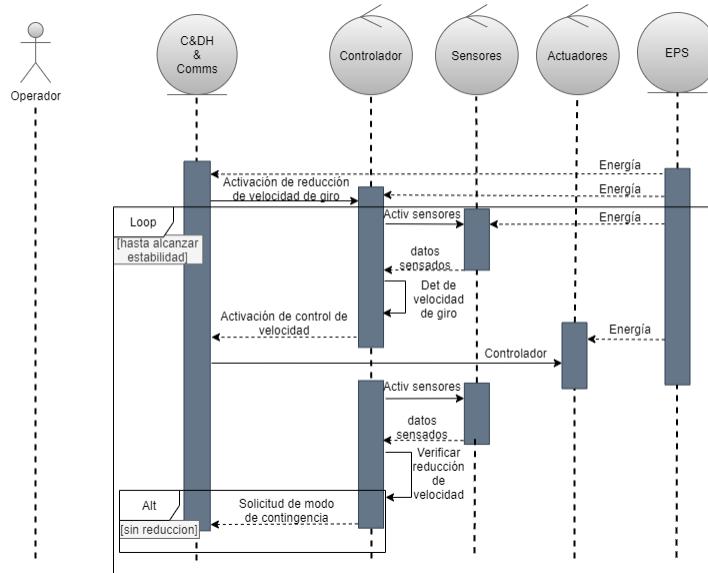


Figura 16: Modo de reducción de velocidad de giro

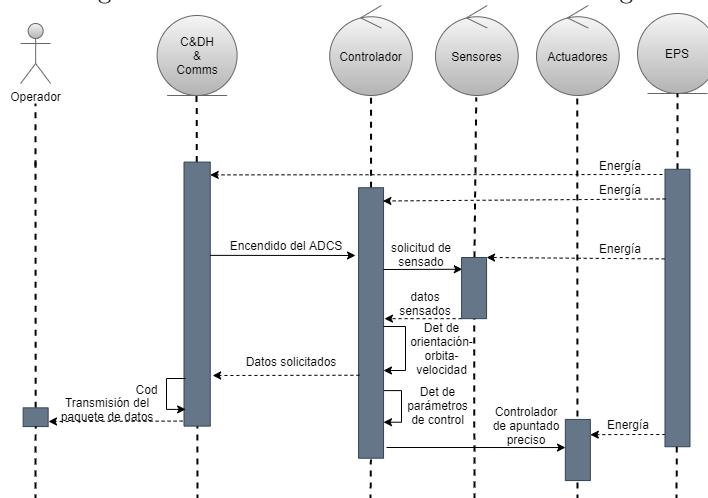


Figura 17: Modo de adquisición inicial

Página 28

Figura 18: Diagramas de secuencias para los primeros modos del AOCS

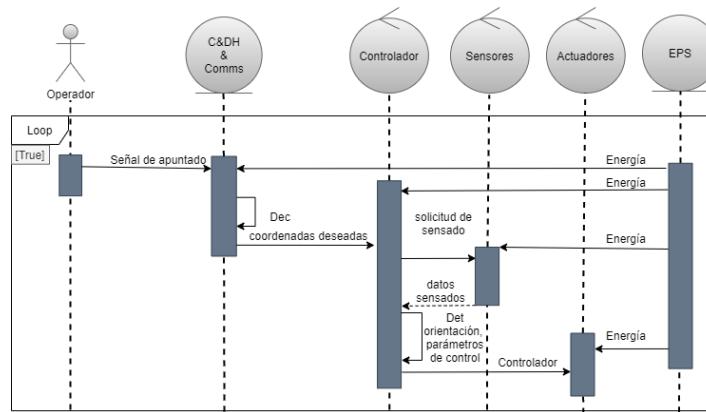


Figura 19: Modo de apuntado preciso

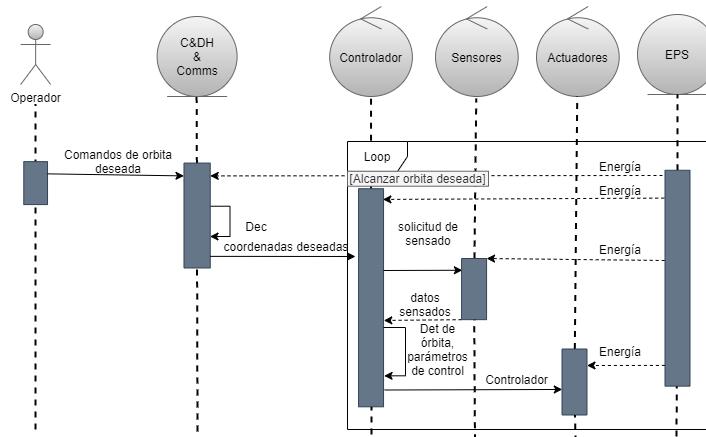


Figura 20: Modo de control de órbita

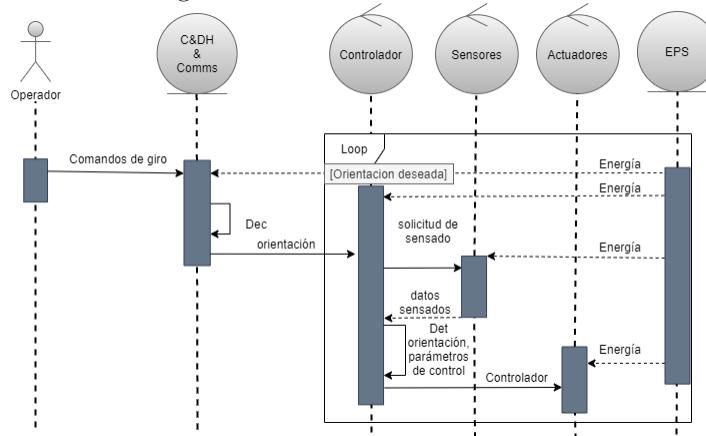


Figura 21: Modo de giro por comando

Figura 22: Diagramas de secuencias para los modos comunes del AOCS

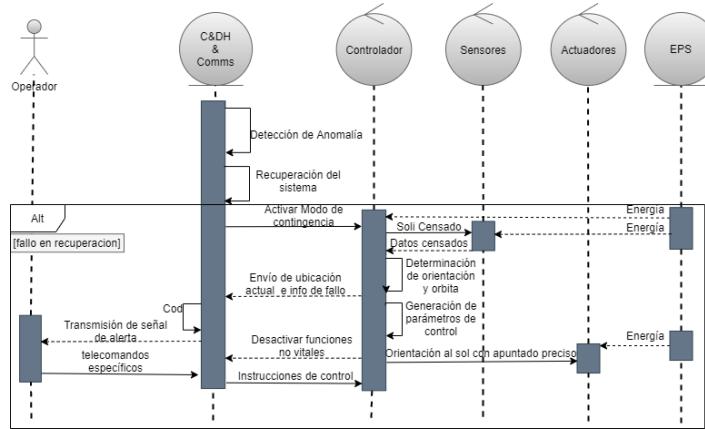


Figura 23: Modo seguro

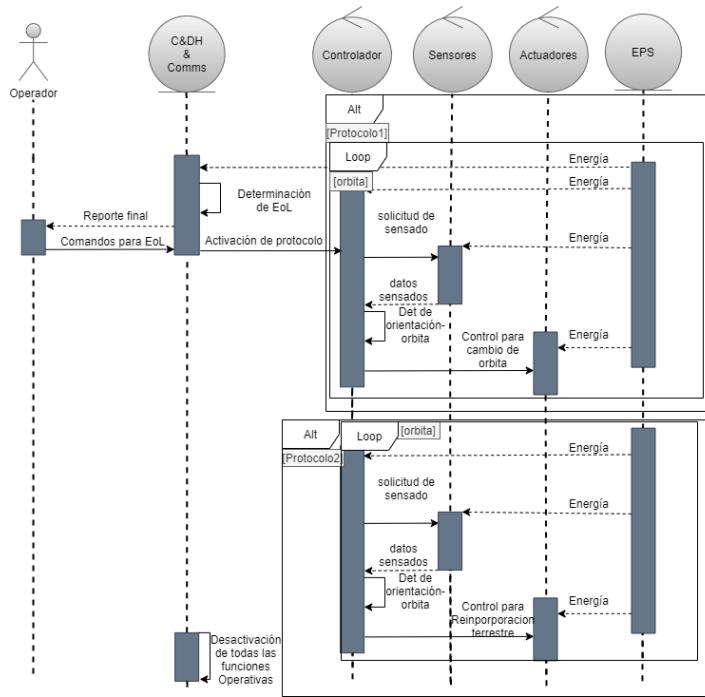


Figura 24: Fin de vida útil

Figura 25: Diagramas de secuencias para los modos finales del AOCS.

2.4. 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 [26] para la toma de decisiones mediante las 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.

2.4.1. Árbol de problemas y subproblemas de diseño

En la figura 26 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.

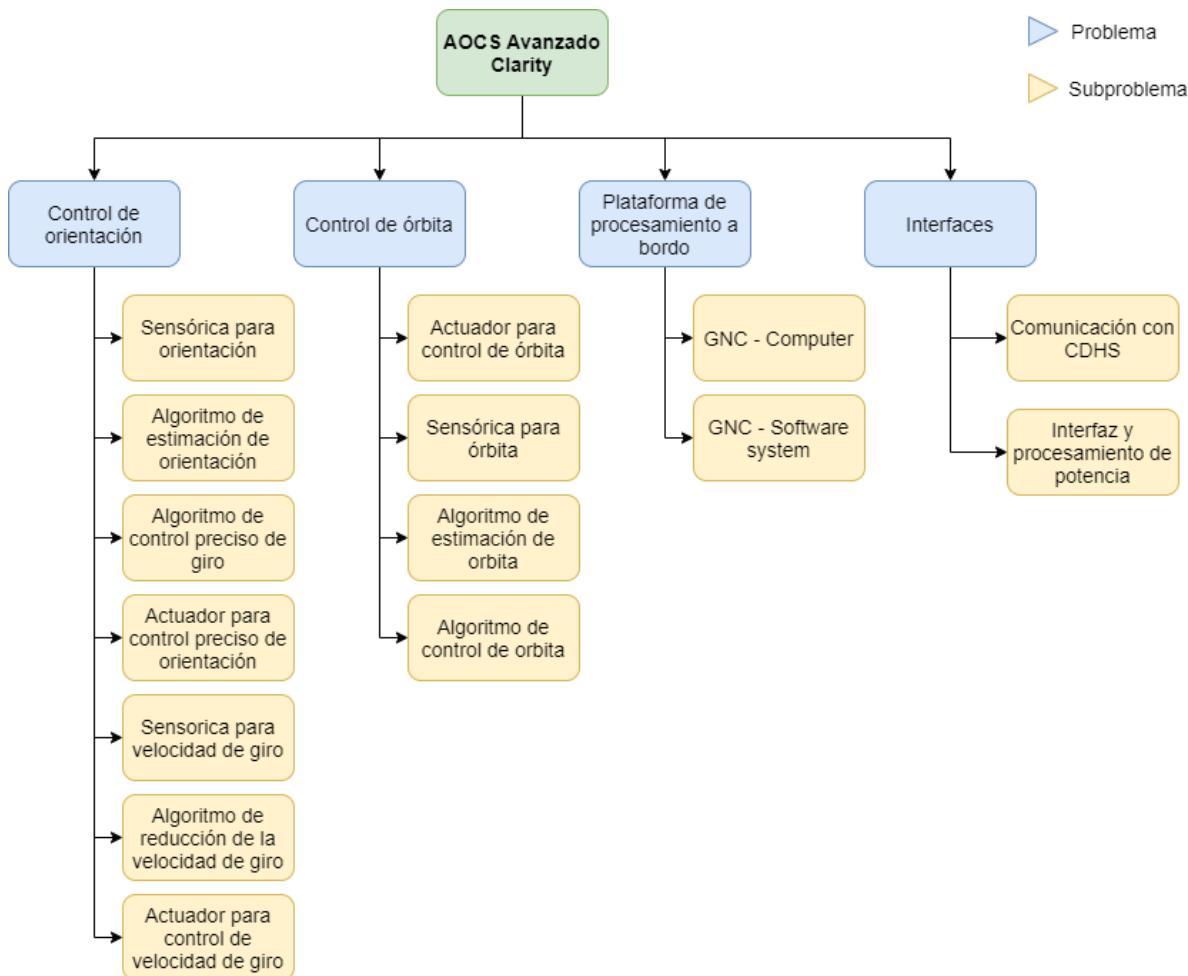


Figura 26: Árbol de problemas y subproblemas del proyecto Clarity.

2.4.2. Descripción de problemas

Con base en la figura 26 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. A continuación se presenta una descripción del problema general y una lista de los subproblemas identificados:

Control de orientación: Se refiere a los componentes y algoritmos necesarios para determinar los estados de rotación, orientación y posteriormente, realizar la acción de control tomando en cuenta factores como torque, tasa de rotación, anomalías.

- Sensórica para orientación
- Algoritmos de estimación de orientación
- Algoritmo de control preciso de giro
- Actuador para control preciso de orientación
- Sensórica para velocidad de giro
- Algoritmo de reducción de la velocidad de giro
- Actuador para control de velocidad de giro

Control de órbita: Se refiere a los componentes y algoritmos necesarios para la estimación de órbita y la acción de control.

- Actuador para control de órbita
- Sensórica para órbita
- Algoritmo de estimación de órbita
- Algoritmo de control de órbita

Plataforma de procesamiento a bordo: Se refiere a la computador a bordo y el software encargado de ejecutar los algoritmos de estimación y control del AOCS, además de mantener la comunicación con los componentes del sistema.

- GNC - Computer
- GNC - Software system

Interfaces: Se refiere a las interfaces requeridas para el funcionamiento del satélite, en términos de comunicación y manejo de provisión de energía eléctrica.

- Comunicación con C&DHS
- Interfaz y procesamiento de potencia

2.4.3. 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: Se refiere a los sensores requeridos para medir las diferentes variables que se necesitan para el funcionamiento del satélite como lo son: orientación, aceleración, velocidad, dirección con respecto al sol, intensidad y dirección de campo magnético.

- Giroscopio
- Acelerómetro
- Sensores solares (Kratos)
- Magnetómetro
- IMU (Kratos)

Algoritmos de estimación de orientación: Se refiere a algoritmos o métodos que permiten calcular, estimar o relacionar los factores necesarios para el correcto funcionamiento del satélite.

- TRIAD
- Filtro de Kalman Extendido (EKF)
- Singular Value Decomposition (SVD)
- Fast Optimal Attitude Matrix (FOAM)
- Second Estimator of the Optimal Quaternion(ESOQ-2)

Algoritmo de control preciso de giro: Se refiere a los algoritmos que manejan las variables de las ruedas de reacción y el magnetorquer, alineación, giro y momento angular.

- Follow B-Field Controller
- Combined Wheel Controller
- AMM algorithm

Actuador para control preciso de orientación: Se refiere a los actuadores que tienen como función realizar torques, controlar la orientación y proporcionar impulso.

- Ruedas de reacción
- Magnetorquers

- Propulsores.
- Esfera de reacción

Sensórica para velocidad de giro: Se refiere a los componentes requeridos para la medición de la tasa de rotación.

- IMU (Kratos)
- Magnetómetro
- Sensores solares (Kratos)
- IMU

Algoritmo de reducción de la velocidad de giro: Se refiere a algoritmos capaces de reducir o controlar la velocidad de giro del sistema.

- B-Dot/Detumbling (Kratos)
- B-Dot

Actuador para control de velocidad de giro: Se refiere a los componentes utilizados para la reducción de la tasa de rotación (Detumbling).

- Ruedas de reacción
- Magnetorquers (Kratos)
- Propulsores
- Esfera de reacción

Actuador para control de órbita: Se refiere a los componentes utilizados para la realización de maniobras impulsivas o de empuje.

- Propulsor químico
- Propulsor eléctrico
- Tether eléctrico
- Vela solar

Sensórica para órbita: Se refiere a los componentes requeridos para la ejecución del algoritmo de estimación de órbita.

- Magnetómetro
- IMU (Kratos)
- Sensores solares (Kratos)
- IMU

Algoritmo de estimación de órbita: Se refiere a algoritmos o métodos que comparan los valores medidos y estimados con los reales para el correcto control de la órbita.

- Filtro de Kalman extendido (EKF)
- Least Square Orbit Determination (LSQOD)
- Método de Jarrat
- Método de Ostrowski

Algoritmo de control de órbita: Se refiere a algoritmos que evalúan factores del satélite para controlar de manera precisa la órbita.

- ZEM/ZEV-LQR
- PID

GNC - Computer: Se refiere a sistemas o plataformas que procesan, integran y comunican las funciones de los dispositivos en la computadora.

- PSoC
- esp32
- STM32F1
- MSP430

GNC - Software System: Se refiere a las diferentes opciones para el sistema del software.

- RTOS
- Embedded Linux
- GPOS
- Bare bones (no OS)

Comunicación con CDHS: Se refiere a los protocolos de comunicación.

- I2C
- USB
- UART

Interfaz y procesamiento de potencia: Se refiere a componentes que permiten la conmutación de energía.

- BJT
- MOSFET
- Relé
- Hot-swap controller

2.4.4. Filtros absolutos

Tal como se definió anteriormente, para la ejecución de la metodología presentada en [26], 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.

2.4.5. Resumen de la selección de soluciones

A manera de resumen se presenta el cuadro 2 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 27, 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 C&DH	Protocolo USB
Interfaz eléctrica	Hot-swap controller

Cuadro 2: Problemas y soluciones seleccionadas para el proyecto Clarity.

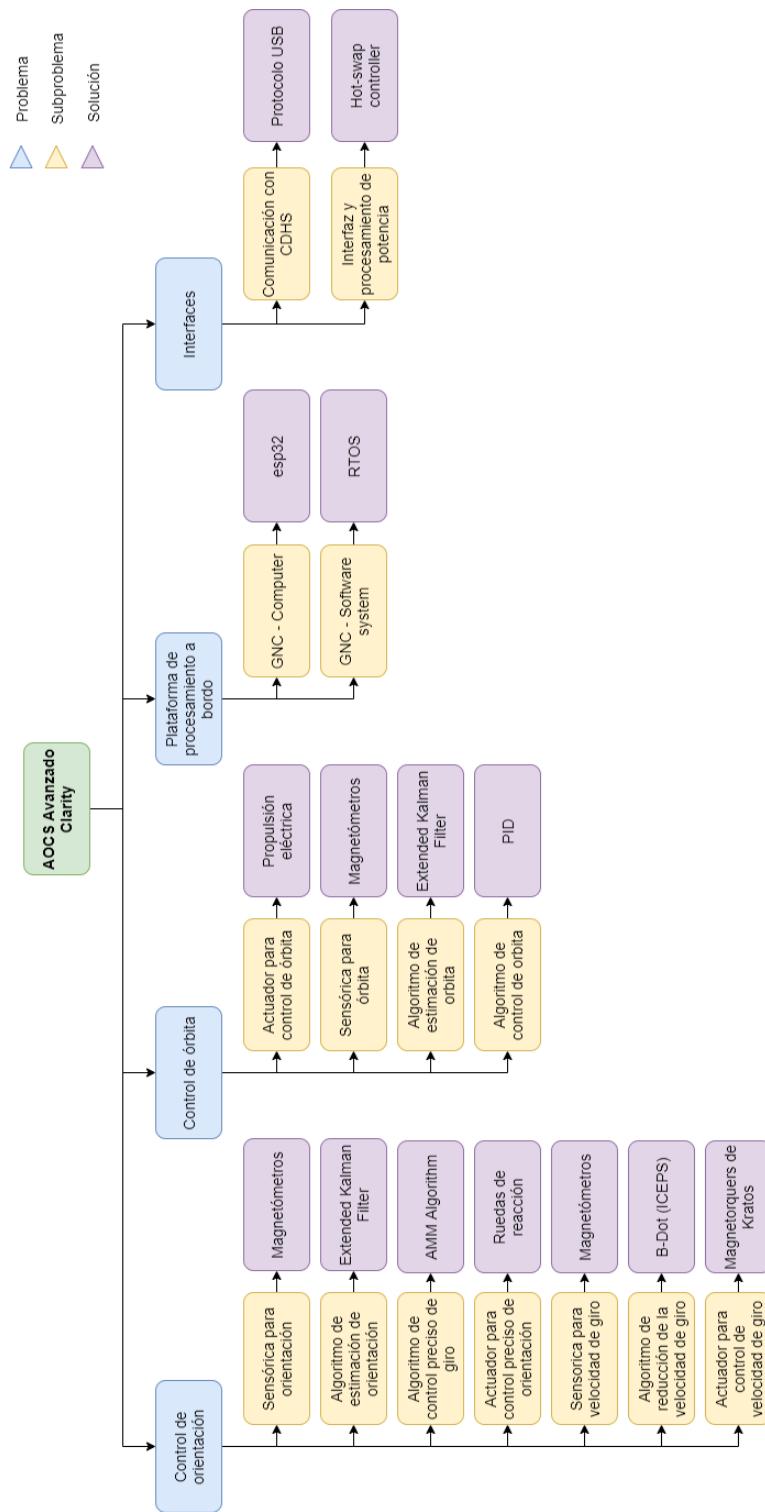


Figura 27: Árbol de soluciones del proyecto Clarity.

2.5. Arquitectura del sistema

2.5.1. 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*), él mismo se muestra en la figura 28 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.

2.5.2. 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 29, 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 30, el mismo mapea las funciones del sistema a componentes y sus respectivas interfaces especificadas.

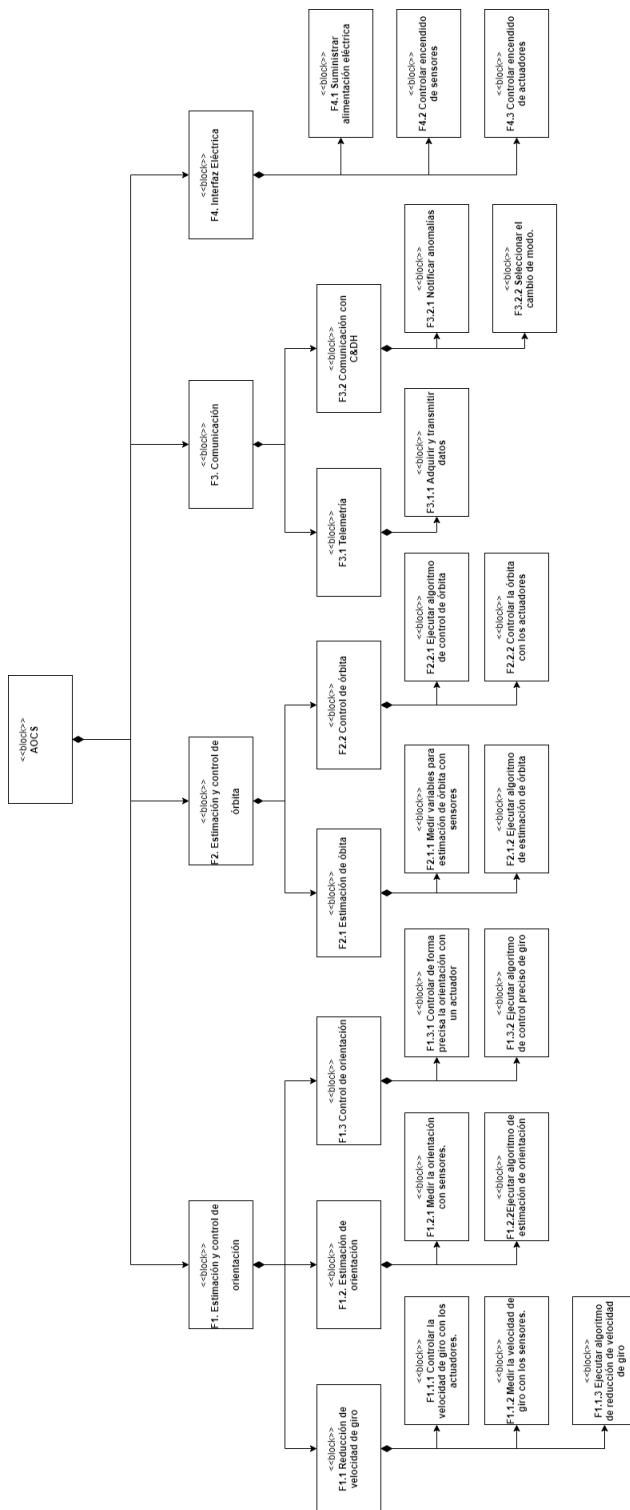


Figura 28: Diagrama Funcional de Definición de Bloques.

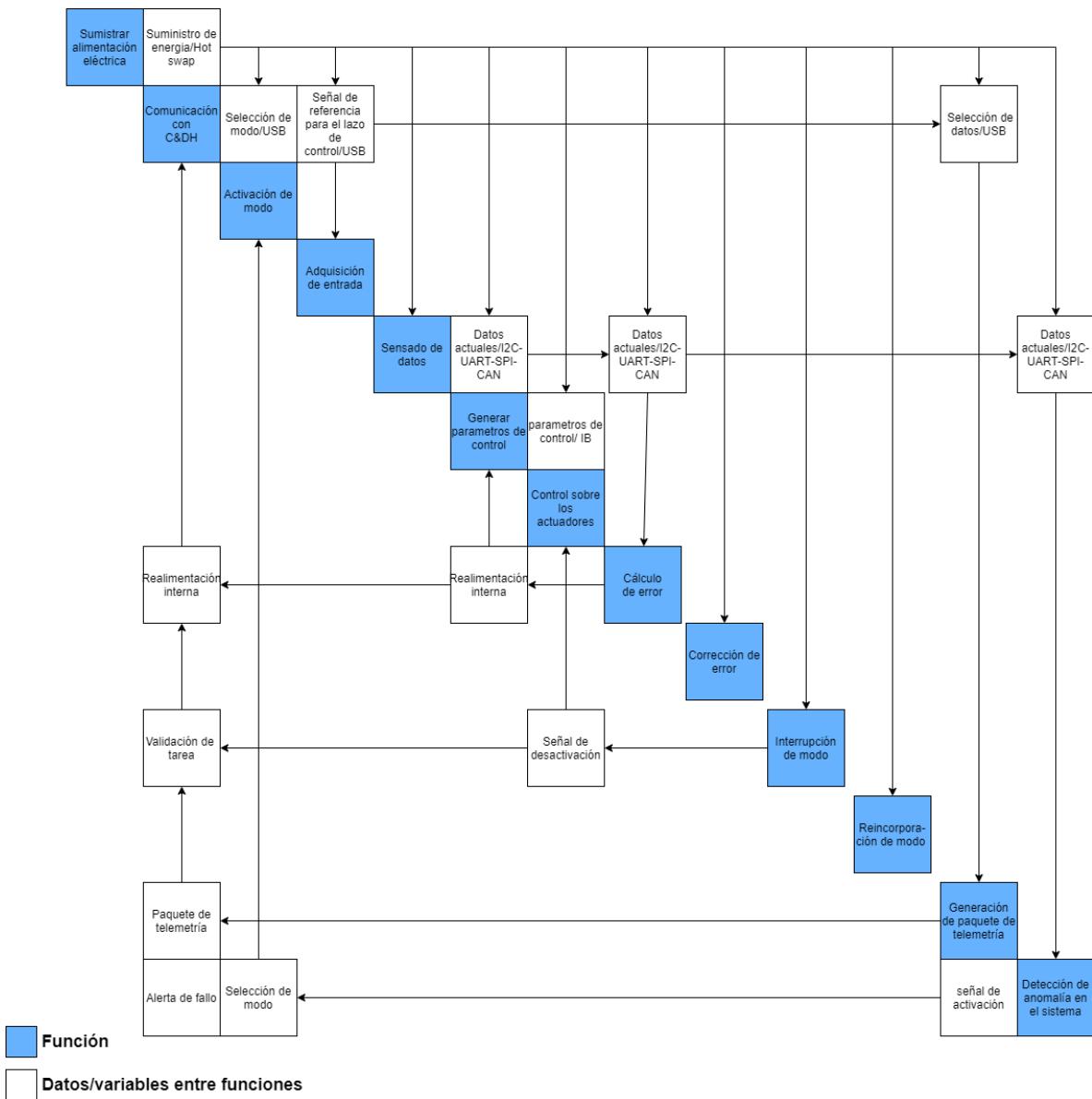
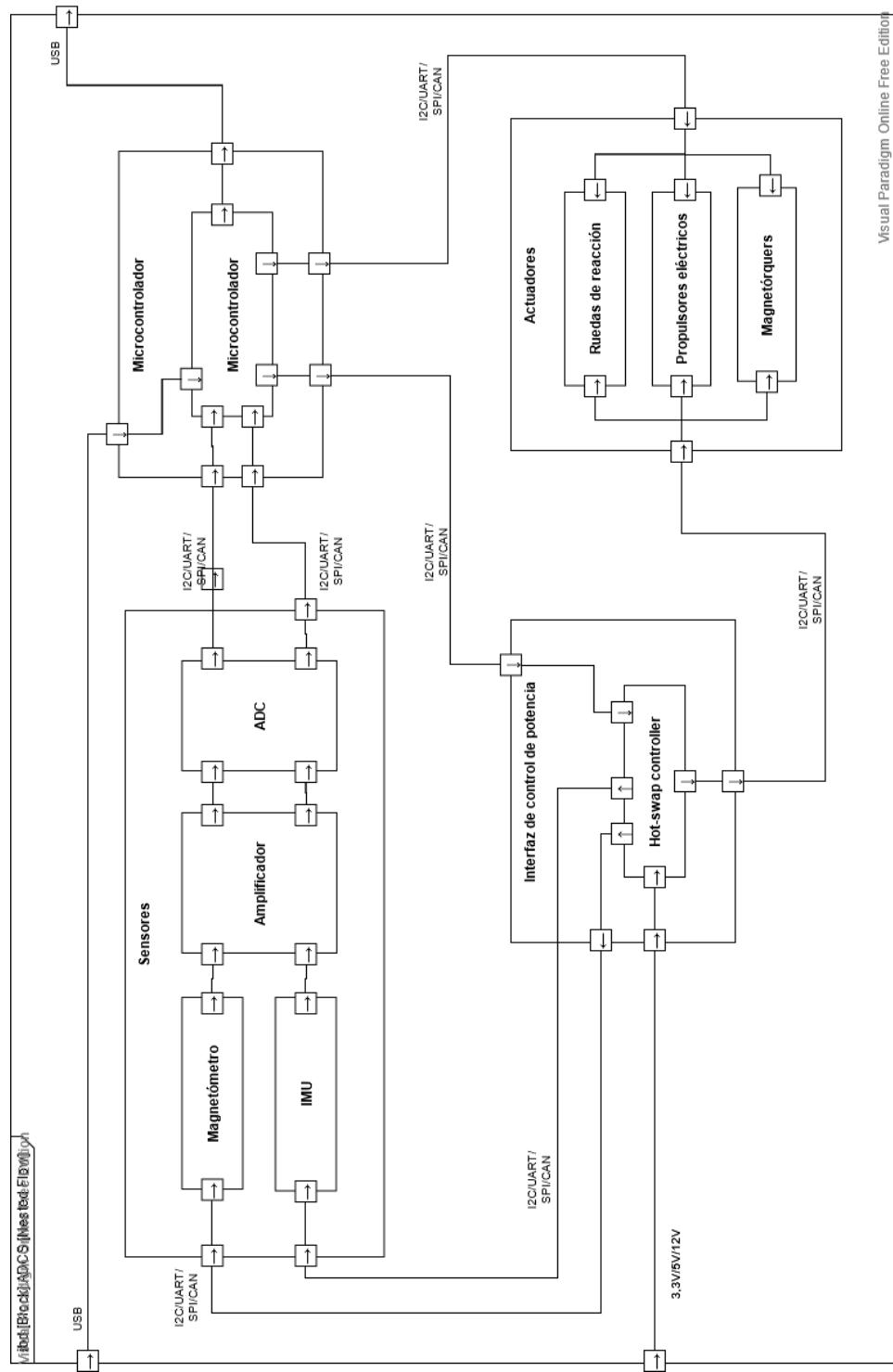


Figura 29: Diagrama N2 Chart del sistema.



Visual Paradigm Online Free Edition

Figura 30: Diagrama de bloques de la arquitectura física del sistema.

2.5.3. Arquitectura de software

En la figura 31, 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 muestran los componentes tanto físicos como del software del sistema, según lo menciona [45]. Dicho diagrama se muestra en la figura 32.

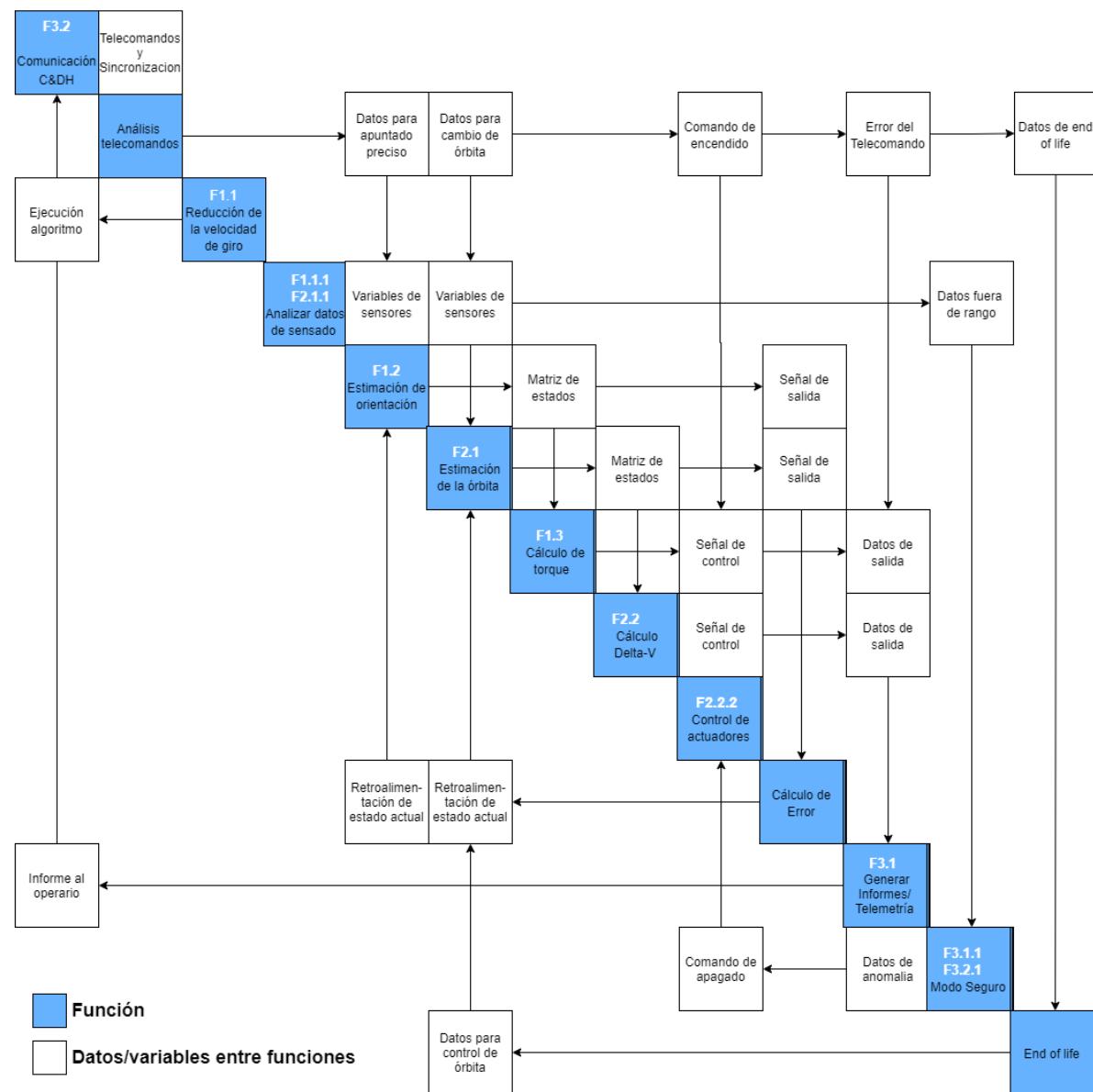


Figura 31: Diagrama N2 Chart del software.

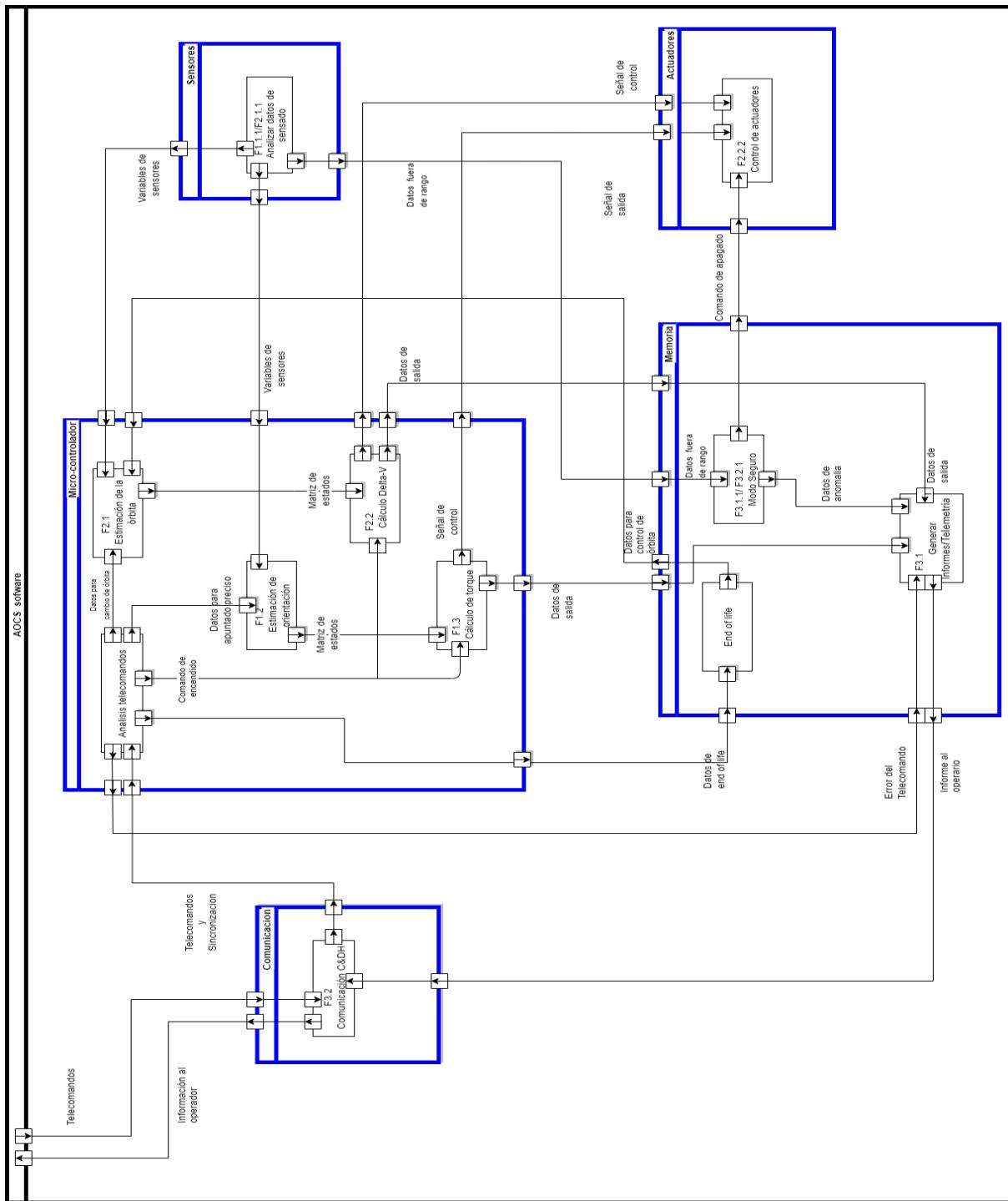


Figura 32: Diagrama IBD del software.

3. Diseño detallado

3.1. Diseño de hardware

Para realizar el diseño de hardware es importante tomar en cuenta la arquitectura física del sistema mostrada en la fig 30, además, los componentes seleccionados deben satisfacer los requerimientos del sistema, que a su vez se encuentran ligados directamente a las diferentes funcionalidades del mismo.

En el cuadro 33 se muestran los diferentes componentes a utilizar y sus requerimientos asociados, así como la función que estos cumplen y sus parámetros de desempeño.

Dispositivo	Marca	Requerimiento Sistema	Función Arquitectura Física	Características	Parámetro de desempeño
IMUs - Inertial Measurement Units	Adafruit	SyRs - 49	F1.2.1 F2.1.1	Reporta - Velocidad angular (Giroscopio) - Aceleración (Acelerómetro) - Campos magnéticos (Magnetómetro) - Interfaz : I2C - Compatibilidad con el algoritmo F. Kalman.	Resolución y comportamiento con sus grados de libertad
ESP32-S2-Saola-1R	Espressif Systems	SyRs - 48	F1.2.2 F1.3.2 F2.1.2 F2.2.1 F3.1.1 F3.2.1 F3.2.2	- SO: FreeRTOS - Programado en C - Contiene Punto Flotante - Facilidad para integración de Software a Hardware	Velocidad de procesamiento
Ruedas de reacción Cube Wheel Small	CubeSpace	SyRs - 40 y SyRs - 41	F1.3.1	- Control de orientación - Motor eléctrico sin escobillas - Circuito microcontrolador - Interfaz : I2C, UART, CAN	Torque
Hot Swap Controller	Texas Instruments	SyRs - 38	F4.1 F4.2 F4.3	- Brinda detección y Protección. - Indicación de casos de fallas del sistema	Potencia
Propulsor Orbital Thruster	Aurora Propulsion Technologies	SyRs - 133	F2.2.2	- Propulsor a base de agua - Fácil Integración	Delta -V
Convertidor RS485 a TTL	Maxim Integrated	SyRs - 152	----	- Robusto - Empleando par trenzado para la reducción de EMI recibida y transmitida	NA

Figura 33: Mapeo de componentes a funciones y requerimientos.

3.1.1. Microcontrolador

3.1.1.1 ESP-32

El microcontrolador a utilizar es el ESP32-S2-Saola-1R del fabricante Espressif, el mismo se muestra en la fig.34, esta placa de desarrollo cuenta con un microprocesador uniciclo Xtensa LX7 de 32 bits a una frecuencia de reloj de 240 MHz.

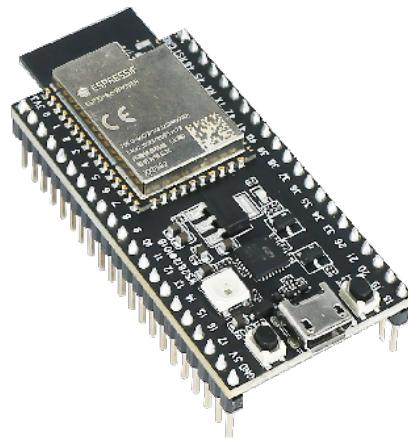


Figura 34: Microcontrolador ESP32-S2-Saola-1R.

Este dispositivo es el encargado de establecer la comunicación con C&DH, obtener los datos medidos por la sensórica, calcular errores, ejecutar los diferentes algoritmos y realizar el control de los actuadores, entre otros.

Este ESP-32 cuenta con diversas interfaces para establecer comunicación con periféricos tales como: 43 puertos GPIO, SPI, LCD, UART, I2C, I2S, interfaz de cámara, USB, entre otras. Además cuenta con aceleradores de hardware para algoritmos de criptografía como AES, SHA y RSA, conversores analógico-digital y digital-analógico, unidad de punto flotante, extensión de instrucciones configurable, entre otros.

Todas estas características permiten la ejecución de aplicaciones en tiempo real, así como la ejecución de algoritmos complejos como el filtro extendido de Kalman, además el consumo de potencia nominal de este dispositivo ronda los 300 mW y posee una masa de aproximadamente 26 gramos.

3.1.2. Sensores

3.1.2.1 IMU

La unidad de medición inercial utilizada es el LSM6DSOX de la compañía Adafruit, este dispositivo implementa un giroscopio y un acelerómetro en una sola placa ofreciendo hasta 6 grados de libertad.

El acelerómetro ofrece 3 grados de libertad de aceleración lineal con rangos que varían desde +2 g hasta +16 g en tasas de adquisición desde los 1.6Hz hasta los 6.7kHz, de manera similar, el giroscopio incorporado ofrece 3 grados de libertad de velocidad angular con rangos que varían desde los +-125 hasta los +-2000 grados por segundo a tasas de adquisición desde los 12.5Hz hasta los 6.7kHz.

Este dispositivo cuenta con algunas características adicionales tales como detección de toques incorporado, detección de actividad, contador de pasos y un núcleo para machine learning el cual puede realizar la detección de gestos básicos por medio del uso de una máquina finita de estados programable.

Esta unidad de medición inercial es compatible con los protocolos de comunicación SPI y I2C, su alimentación de entrada puede soportar rangos de 1.7V a 3.6V, este dispositivo al ser considerado como uno baja potencia su consumo nominal es aproximadamente 1.8 mW, sus dimensiones son de 25.6mm x 17.8mm x 4.6mm y su peso es de tan solo 1.7 g.

3.1.2.2 Magnetómetro

El magnetómetro a utilizar es el LIS3MDL de la compañía Adafruit, el mismo cuenta con medición de campos magnéticos en 3 ejes. Este dispositivo utiliza los protocolos I2C y SPI para transmitir los datos medidos y provee mediciones en formato de 16 bits. Además, es capaz de realizar el sensado en rangos de +4 gauss hasta +16 gauss, con precisiones desde los 0.25 gauss hasta 1 gauss, esto según la tasa de adquisición de datos establecida por el usuario. Este dispositivo puede ser alimentado en un rango de 1.9-3.6V, su consumo de potencia nominal en su modo de alta resolución es ligeramente menor a 1 mW, sus dimensiones son de 25.7mm x 17.8mm x 4.6mm y su masa es de 1.5 g.

La empresa Adafruit ofrece un componente que combina este magnetómetro con el IMU mencionado en la sección anterior, el nombre de este componente es LSM6DSOX + LIS3MDL y se comercializa como un dispositivo IMU con 9 grados de libertad, capaz de medir aceleraciones, velocidades angulares y campos magnéticos. El mismo se comunica con el microcontrolador por medio del protocolo I2C y se muestra en la fig.35.



Figura 35: IMU LSM6DSOX + LIS3MDL.

3.1.3. Actuadores

3.1.3.1 Ruedas de reacción

Las ruedas de reacción escogidas son comercializadas bajo el nombre CubeWheel Small y son distribuidas por la empresa CubeSpace, las mismas tienen la función de modificar la orientación del sistema según los modos de uso establecidos por medio de la oposición al campo magnético terrestre. Estas ruedas de reacción tienen la capacidad de

comunicarse con el microcontrolador por medio de los protocolos I2C, UART y CAN, en nuestro caso se hace uso del protocolo I2C.

Este componente posee una masa de 60 gramos, su consumo de potencia nominal es aproximadamente 150 mW y cuenta con unas dimensiones de 28mm x 28mm x 26.2mm. Su voltaje de alimentación es de 3.3V o se puede establecer en el rango de 6.4-16V, tiene una velocidad de rotación máxima de 8000rpm y es capaz de entregar un torque máximo de 0.23mNm.

En la fig.36 se muestra la rueda de reacción CubeWheel Small, vale recalcar que en nuestro diseño se hace uso de 4 de estas ruedas.

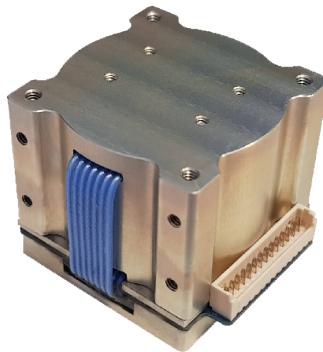


Figura 36: Rueda de reacción CubeWheel Small.

3.1.3.2 Propulsor

El propulsor a utilizar es el Aurora Resistojet One Nano, comercializado por la empresa Aurora Propulsion Technologies, este propulsor funciona a base de agua, el mismo se muestra en la fig.37 y se comunica por medio del protocolo RS485.



Figura 37: Propulsor Orbital Thruster.

La función de este propulsor es realizar el cambio de órbita por medio del impulso adquirido al realizar una descarga de propelente en dirección orthogonal a la Tierra,

el mismo cuenta con una capacidad de empuje de aproximadamente 0.2 mN y una capacidad de impulso de 1 Ns, tiene una dimensiones de 20mm x 20mm x 20mm, además de una tubería para la descarga del propelente de aproximadamente 10mm x 10mm x 50 mm, este componente posee un masa de 15 gramos.

3.1.4. Interfaz de control de potencia

3.1.4.1 Controlador Hot-Swap

El controlador Hot-Swap TPS259803ONRGER distribuido por la compañía Texas Instruments, es un dispositivo que puede ser configurado para administrar la potencia de otros componentes. Este dispositivo nos permite administrar la alimentación energética de los diferentes sensores y actuadores, siendo su principal uso el apagado de componentes cuando se detectan anomalías en el funcionamiento del sistema a manera de prevención, en la fig.38 se muestra el mismo.



Figura 38: Controlador Hot-Swap TPS259803ONRGER.

Este dispositivo puede proveer voltajes de alimentación en un rango de 2.7-24V con corrientes de 2-8A, el mismo tiene unas dimensiones de 4mm × 4 mm. El controlador Hot-Swap se encarga de proveer los voltajes adecuados y administrar el apagado y encendido de cada uno de los sensores y actuadores a partir de señales de control provenientes del microcontrolador.

3.1.5. Otros componentes

Además de los dispositivos mencionados anteriormente existen otros componentes los cuales son necesarios para el correcto funcionamiento y ensamblaje del sistema. Se utilizaron componentes como resistencias y capacitores para configurar correctamente los controladores Hot-Swap, además debido a que el propulsor utilizado se comunica por medio del protocolo RS485 y el microcontrolador no soporta este estándar de manera nativa, fue necesaria la incorporación de un conversor TTL a RS485 MAX485CUA+T el cual se muestra en la fig.39, este componente recibe las señales de comunicación serial provenientes del microcontrolador por medio del protocolo UART, el cual puede ser interpretado como TTL y realiza la conversión al estándar RS485 el cual es compatible con el propulsor utilizado.

Además de esto, fue necesaria la utilización de 19 tornillos M2, 3 tuercas hexagonales M2, una placa de aluminio para realizar la sujeción del propulsor a la estructura, 4 conectores TFM-107-02-L-D-DS para las ruedas de reacción, un conector vertical USB tipo B y 3 conectores de hilera de 4 pines cada uno. Estos componentes fueron necesarios para la interconexión de los mismos que conforman el sistema en la placa PCB, de la cual se detallará más adelante.

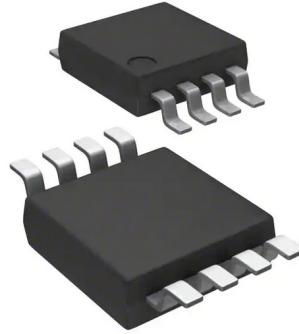


Figura 39: Conversor TTL a RS485 MAX485CUA+T.

Posterior a la selección de los componentes y al observar sus prestaciones se obtiene el diagrama eléctrico del sistema el cuál está asociado directamente con el PCB diseñado, dicho diagrama se puede observar en el Anexo G en la figura 15, el cuál integra todos los componentes que cumple con los requerimientos propuestos y las funciones según la arquitectura física propuesta.

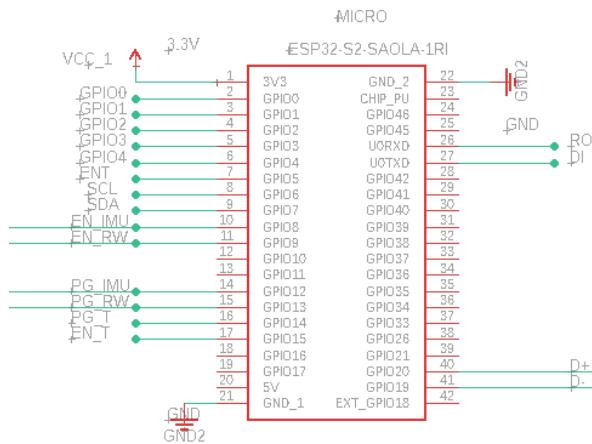


Figura 40: Esquemático ESP32 Saola 1R

En la figura 40 se puede observar las conexiones a los pines del microcontrolador, es importante mencionar que al puerto GPIO19 Y GPIO20 se realiza la conexión de un

puerto USB de tipo C.

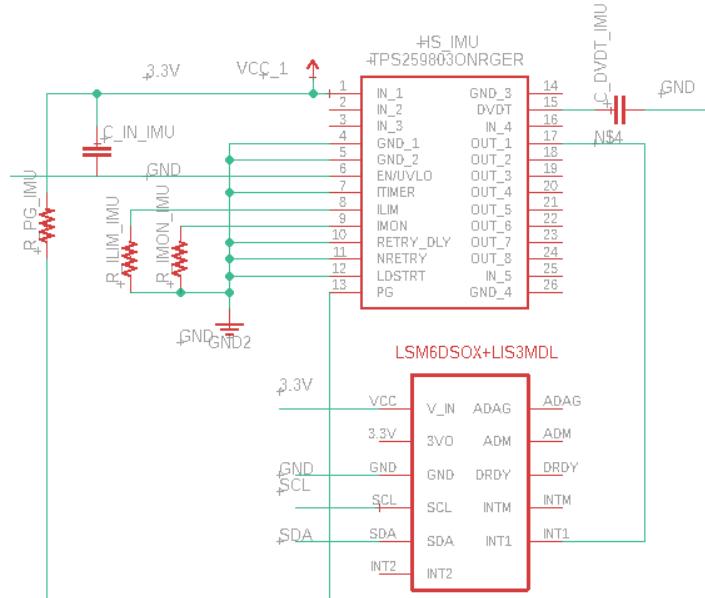


Figura 41: Esquemático IMU

En la figura 41 se puede observar el esquemático del IMU el cuál es de suma importancia para la recolección de información mediante los sensores para lograr la estimación de orientación y órbita del sistema.

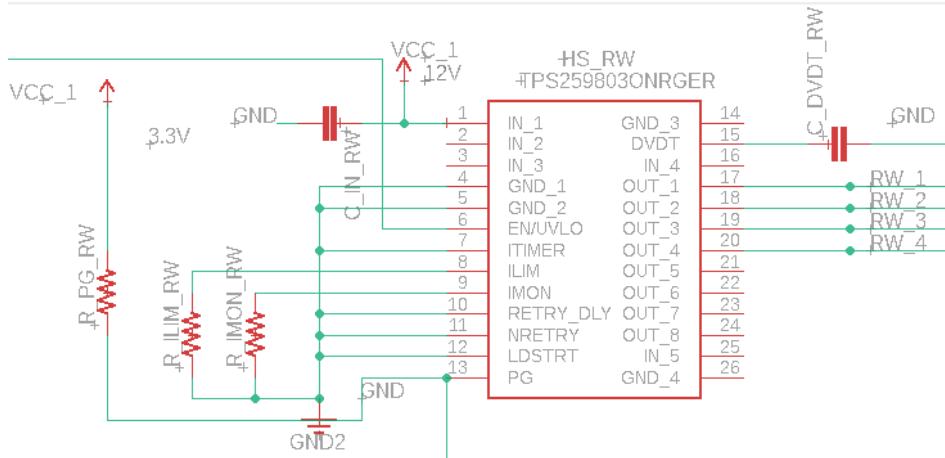


Figura 42: Hot Swap Controller a Ruedas de reacción

En la figura 42 se puede observar el esquemático del dispositivo hot swap controller el cual se encuentra conectado a las ruedas de reacción.

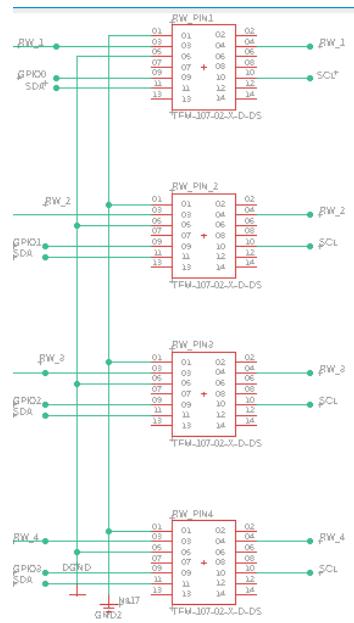


Figura 43: Conexión a ruedas de reacción

En la figura 43 se puede observar las conexiones que facilitan el control de recepción de información que se logra a través de las ruedas de reacción mediante los conectores TFM de samtec.

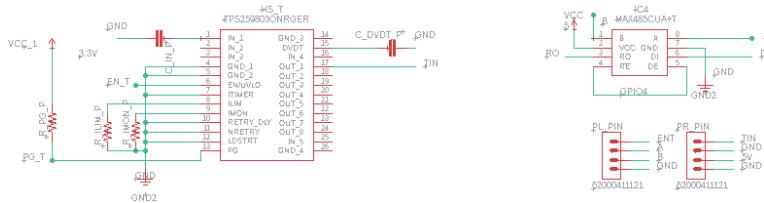


Figura 44: Esquemático de conexión a propelso

En la figura 44 se puede observar otro de los elementos de suma importancia del sistema los cuales corresponden a la conexión del propulsor o thruster, el cuál se realiza a través de un hot swap controller, además de tener un dispositivo max485 el cuál permite la conexión de la interfaz del propulsor en TTL a la interfaz propuesta para el sistema.

3.2. Diseño de software

El software será implementado en el sistema operativo FreeRTOS, este utiliza C como lenguaje de programación. A continuación se mostrarán y explicarán los distintos diagramas para el software que se planea implementar.

Basado en los requerimientos y arquitectura del software se crearon los siguientes diagramas de estado y de flujo representados en las figura 45 y 46 respectivamente.

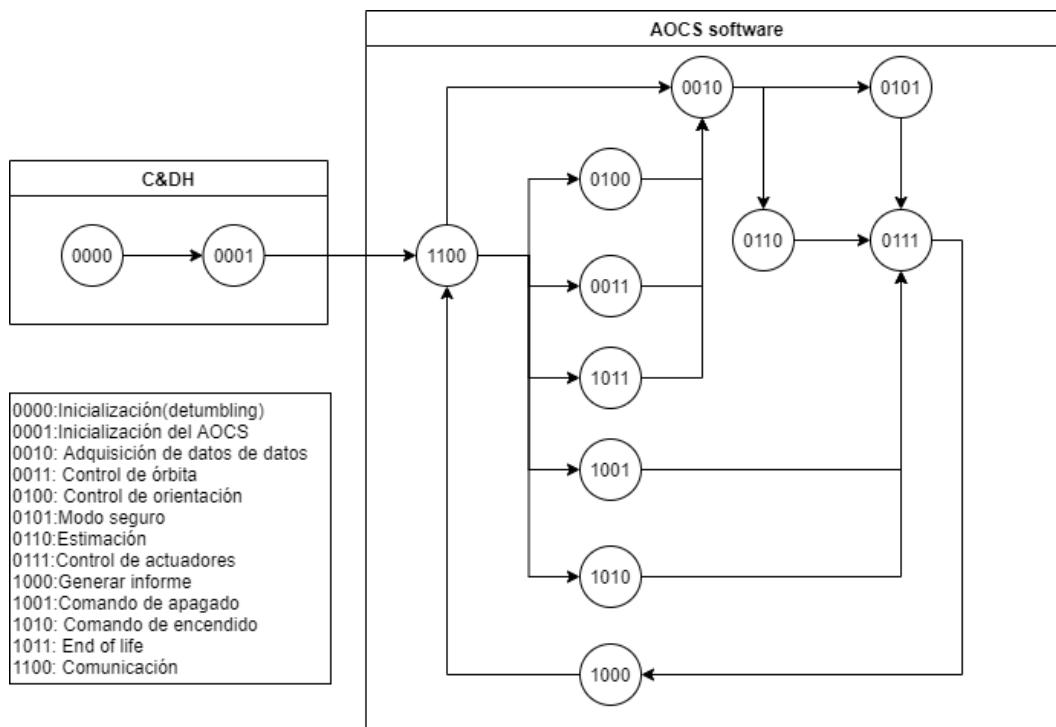


Figura 45: Diagrama general del software.

Los dos primeros estados 0000 y 0001 son importantes mencionarlos porque son los responsables de los primeros pasos para que nuestro sistema pueda funcionar.

3.2.1. Software General

Inicialmente la figura 46 contiene las características generales del software, se incluyeron conexiones con partes ajenas al software como lo son los actuadores y sensores, cabe recalcar que este es un sistema digital así que es necesario trasladar la información del dominio analógico al digital o viceversa mediante componentes ADC y DAC que se refieren a convertidores digital a analógico.

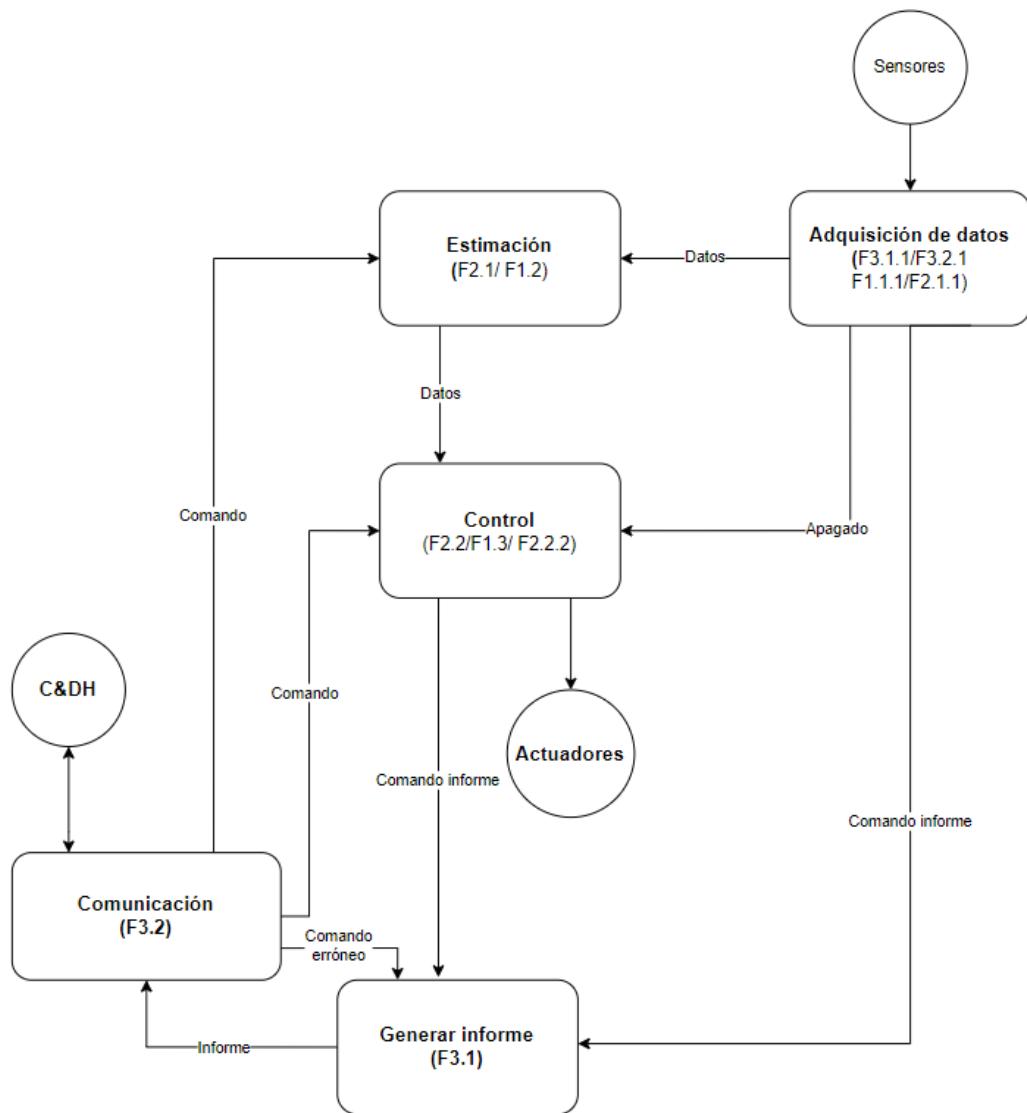


Figura 46: Diagrama general del software.

3.2.2. Comunicación

La figura 48 es sobre la comunicación, la función principal de este algoritmo va hacer el trabajo de puente entre el C&DH y nuestro sistema, esta sección debe ser capaz de interpretar comandos, identificar que clase de orden quiere realizar el operador e indicar si existe un error en alguna sección de dicha orden.

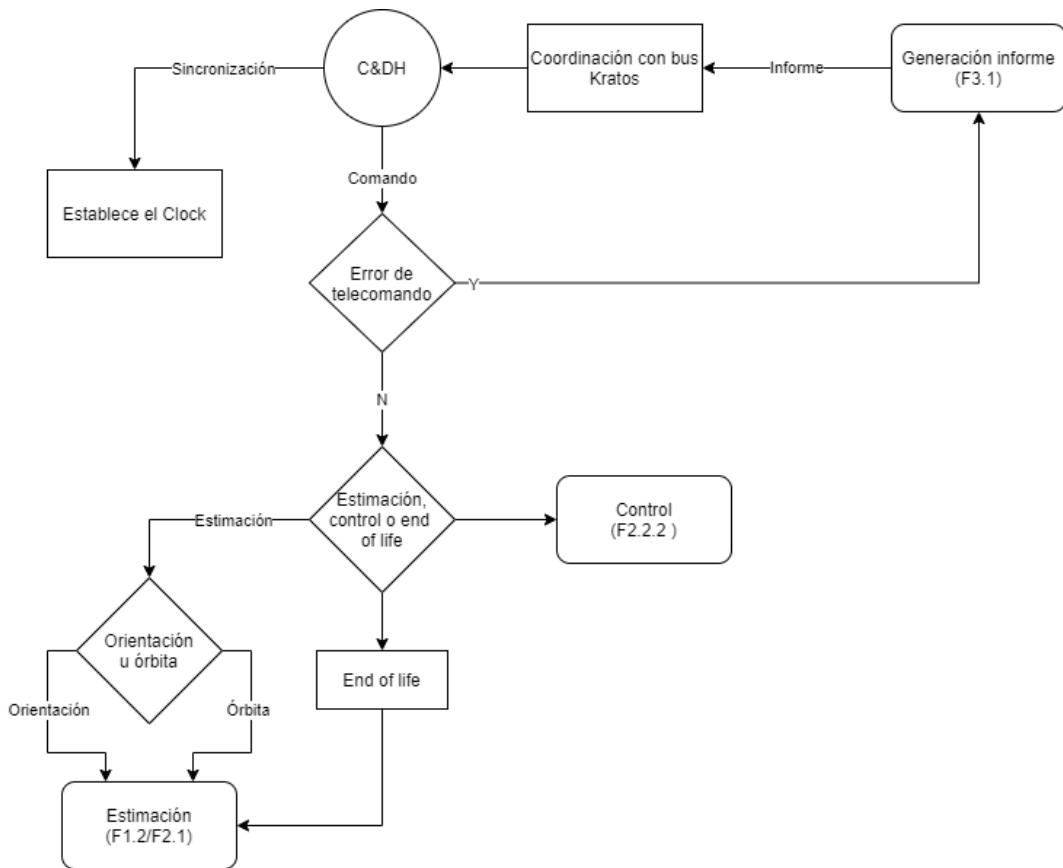


Figura 47: Diagrama de función Comunicación.

3.2.3. Estimación

En la figura 48 se define el flujo del proceso de estimación, en esta sección se obtienen datos mediante los sensores para poder realizar el predicciones por medio del filtro extendido de Kalman, además de poder identificar cuando hay comandos nuevos para poder realizar cambios en la fase de control.

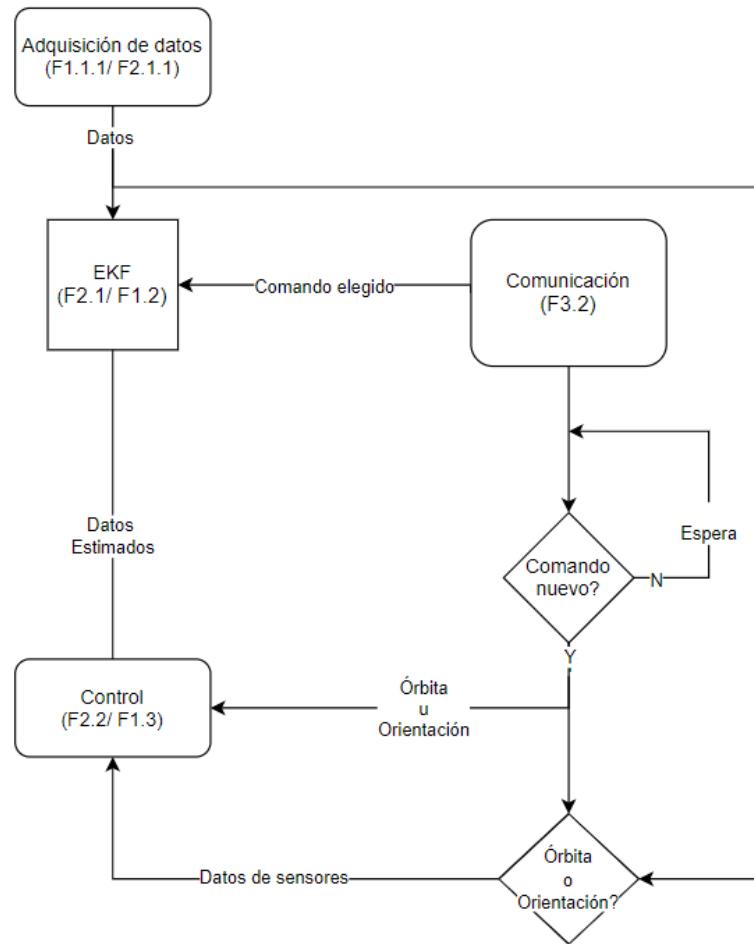


Figura 48: Diagrama de función Estimación.

3.2.3.1 EKF

La presentación de este algoritmo se obtuvo de [46] y [47]. EKF o filtro extendido de Kalman consiste en una etapa de predicción y otra de actualización o de corrección, primero estima cuál será el valor futuro y luego compara con el valor medido y toma decisiones en base al resultado.

n: Dimensiones del vector de estado.

l: Dimensiones del control.

m: Dimensiones de observación.

A_t : Matriz ($n \times n$) que describe el estado sin ningún control ni ruido.

G_t : Jacobiano de una matriz A_t .

B_t : Matriz ($n \times l$) que describe un mapeo de como mi control cambia el estado de mi sistema.

R_t :Matriz (n x n). Ruido gaussiano.

C_t :Matriz (l x n). Relaciona el estado actual con observaciones del entorno.

H_t :Matriz (l x n). Jacobiano de una matriz C_t .

Q_t :Matriz (n x n). Covarianza de ruido de la observación.

K_t :Matriz (n x n), la ganancia de kalman y nos indica que tanta confianza se tiene para el uso de los valores observados.

P_t : Covarianza.

$g()$: Función no lineal que utiliza el estado actual, el estado pasado y la matriz de control B.

$h()$: Función para que mapea el estado futuro a lo que se espera observar.

z_t : Lo que se está observando en los sensores.

Etapa de predicción

$$\dot{u}_t = g(u_t, u_{t-1}) \quad (1)$$

$$\dot{P}_t = G_t * P_{t-1} * G_t^T + R_t \quad (2)$$

Etapa de Corrección

$$K_t = P_t * H_t^T * (H_t * \dot{P}_t * H_t^T + Q_t)^{-1} \quad (3)$$

$$u_t = \dot{u}_t + K_t * (z_t - h(\dot{X}_t)) \quad (4)$$

$$P_t = (I - K_t * H_t) * \dot{P}_t \quad (5)$$

Para finalizar el proceso se devuelve x_t y P_t para realizar el ciclo.

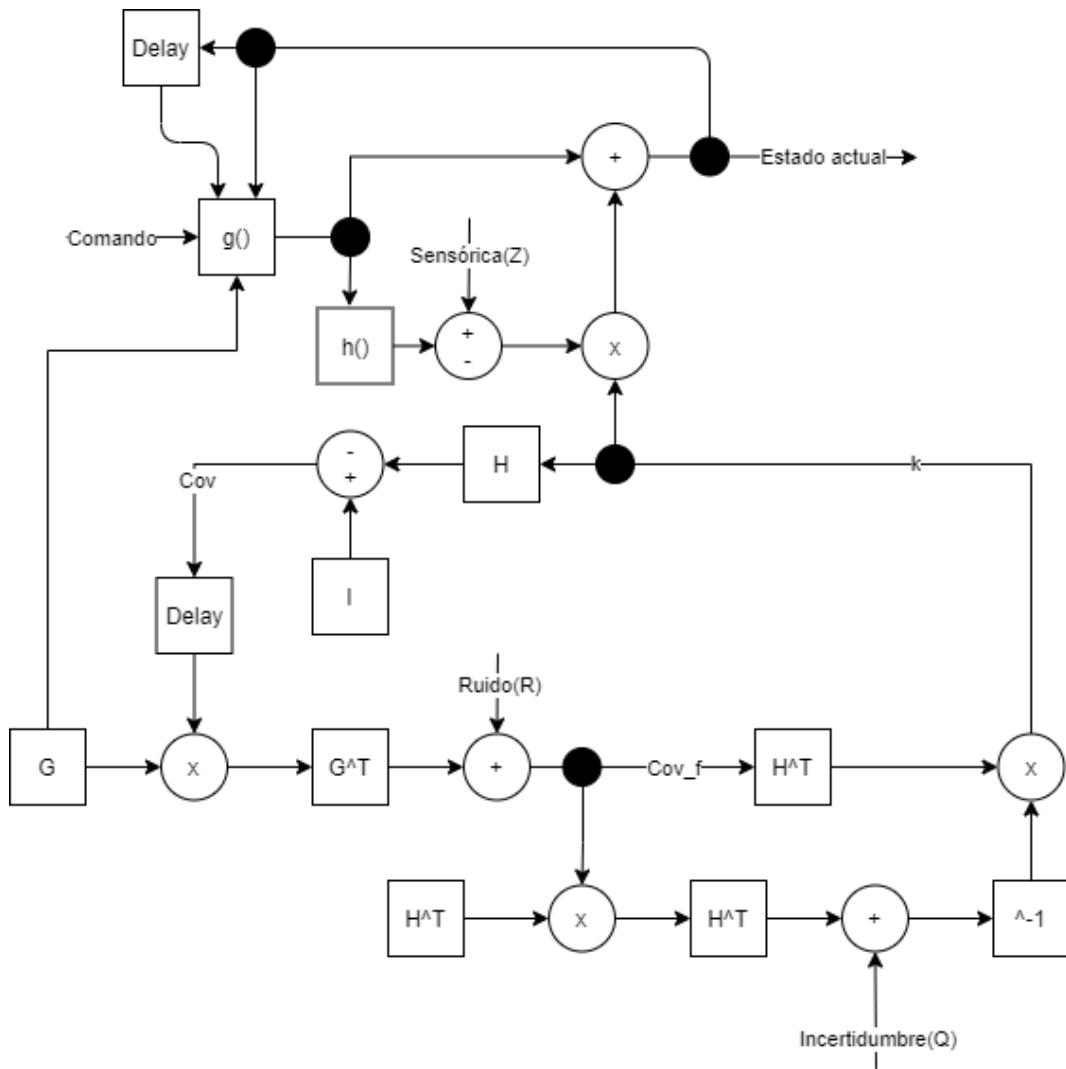


Figura 49: Diagrama del Filtro Extendido de Kalman.

3.2.4. Control

En la figura 50 vemos aspectos importantes como los algoritmos de control de actuadores AMM y PID, además aquí es una de las secciones donde se efectúa el modo seguro ya que el software es capaz de apagar los controladores para que los actuadores no tengan señal en el caso de emergencia, también hay que ver la subfunción de prioridad, esta nos permite establecer un tiempo para que los comandos del operador no entren en conflicto con los del modo seguro además de darle prioridad al modo seguro.

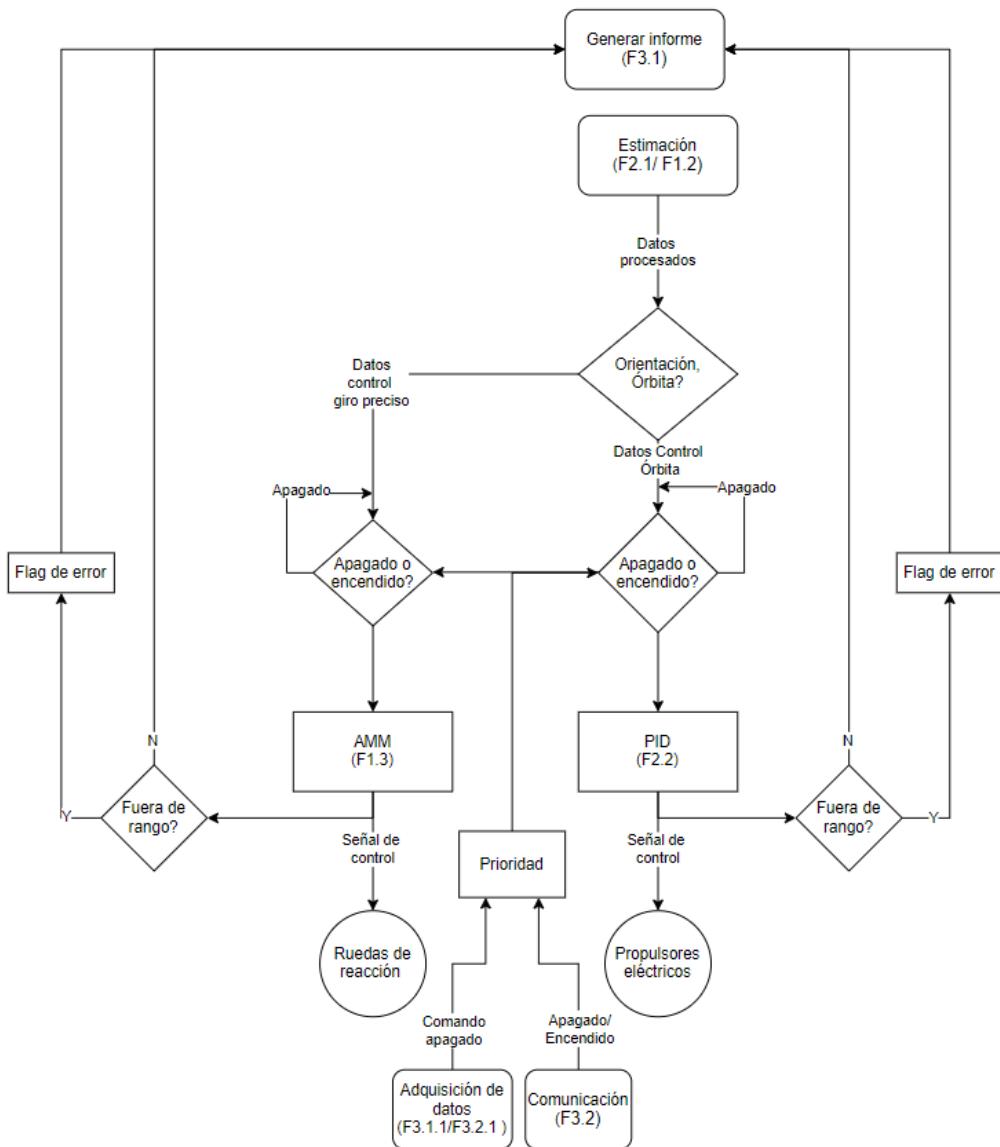


Figura 50: Diagrama de función Control.

3.2.4.1 PID

Este algoritmo fue obtenido de [48]. El PID consiste en 3 partes, primero la parte proporcional(P) nos dice el presente, luego una parte integral(I) que predice el pasado y la derivación(D) que intenta predecir el futuro, junto a una retroalimentación que nos permite corregir el error. Para nuestro caso se planea usar la constante integral igual a cero ya que poseemos una limitada cantidad de disparos para el control de órbita, así que una implementación donde se utiliza continuamente el actuador no es conveniente.

e: Error.

K_p : Constante proporcional.

K_i : Constante integral.

K_d : Constante derivativa.

$$u_t = K_p * e(t) + K_i * \int e(t)dt + K_d * \frac{de(t)}{dt} \quad (6)$$

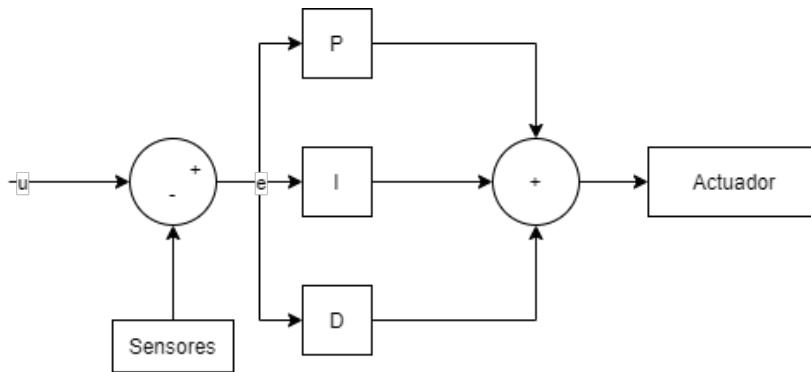


Figura 51: Diagrama del PID.

3.2.4.2 AMM

Este algoritmo fue obtenido de [49]. Este algoritmo Angular Momentum Management es un término general para el control angular, para nuestro caso el que utilizaremos se controlará 4 ruedas de reacción.

Definición de parámetros:

RW: Ruedas de reacción.

B: La RW que se quiera mover.

n: Número de ruedas de reacción.

C_{BRW} : Matriz $3xn$, son vectores unitarios del eje de giro de cada rueda de reacción.

N: Null-space tal que $C_{BRW} * N = 0_{3*m}$ donde $m = n - r$ y r en es rango de C_{BRW} .

Esta matriz es la que nos permite controlar varias RW a la vez.

t: Vector que contiene m parámetros de escala.

T_B : Torque que se comanda de la RW B.

w: Vector de mediciones de velocidad de las RW.

T_{nom} : Valor de torque que comanda el algoritmo de control de actitud.

T_{null} : Torque en el null space.

T_{tot} : Torque total.

w_{null} : Es un valor objetivo en el null-space para que $N^T * w = 0$.

La intención es encontrar el t para hacer el $T_{null} = 0$, se puede de dos formas con un control PID o haciendo $w_{null} = N^T * w$ ver ecuación 10. Tenemos que:

$$T_{tot} = T_{nom} + T_{null} \quad (7)$$

$$T_{nom} = C_{BRW} * T_B \quad (8)$$

$$T_{null} = N * t \quad (9)$$

$$t = w_{null} - N^T * w \quad (10)$$

A la fórmula 10 se le utiliza de forma tal como si fuera un PID.

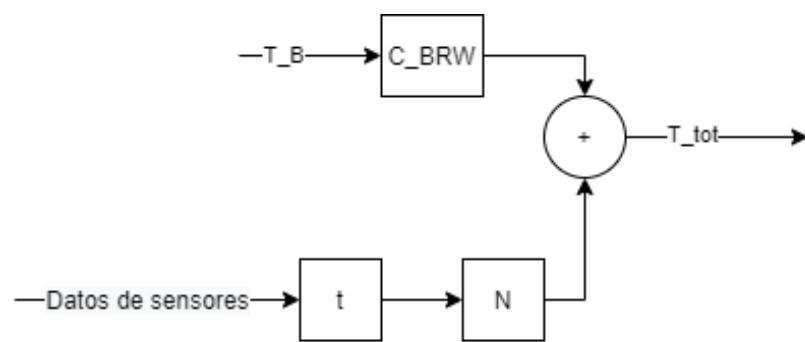


Figura 52: Diagrama del AMM.

3.2.5. Adquisición de datos

En la figura 53 es la interfaz entre los sensores y el sistema de software además del sensado continuo y envió de información, aquí se identifica si existe algún problema y se genera un comando para el apagado de los actuadores.

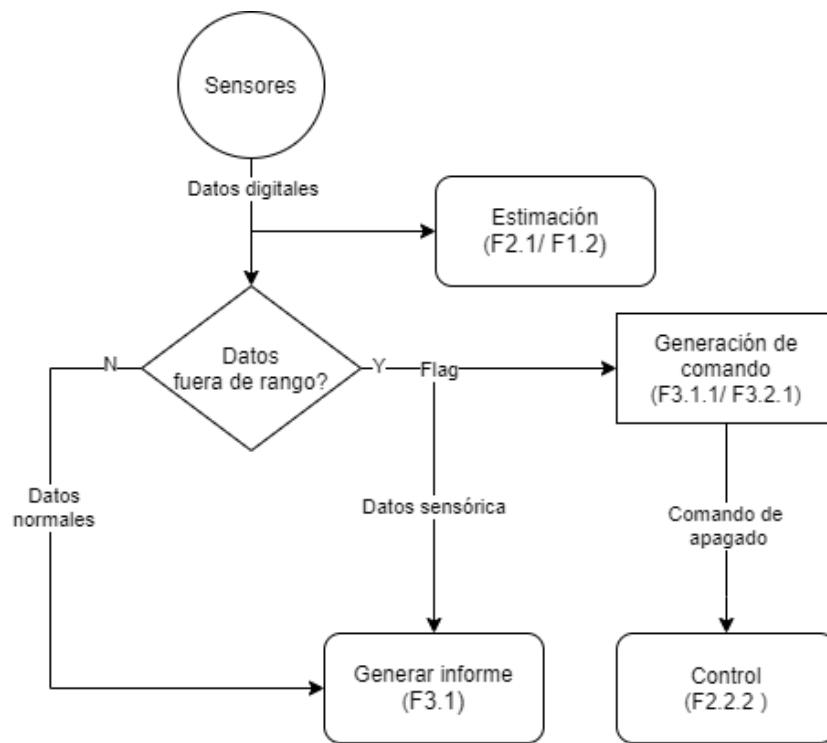


Figura 53: Diagrama de la función Adquisición de datos.

3.2.6. Generar informes

En la figura 54 tenemos la generación de informes, esta se encarga de crear los mensajes que posteriormente se van a trasmisir a comunicación y después al operador, además de indicar si hay un error para que sea visible para el operador.

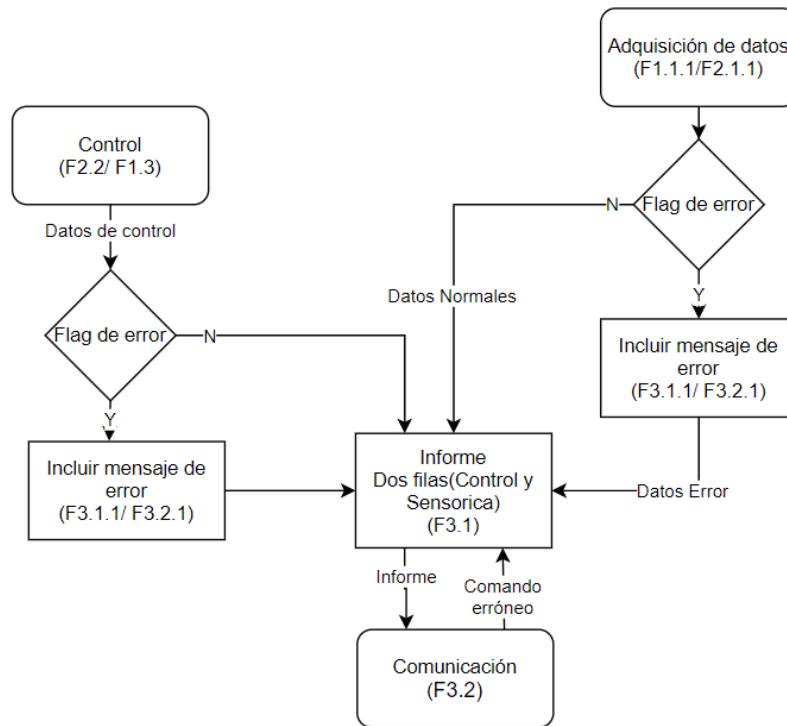


Figura 54: Diagrama de la función Generar informe.

3.3. Integración del diseño

El desarrollo de la integración eléctrica y mecánica se llevó a cabo utilizando los software de Autodesk EAGLE PCB DESIGN para el diseño del PCB y FUSION 360 para la parte mecánica de los componentes del sistema. Una de las ventajas de utilizar estas herramientas de integración es la facilidad con la que se puede combinar y mapear componentes entre plataformas, pasando desde los diseños de los diagramas eléctricos fácilmente a la elaboración del PCB, esto gracias a la cantidad de herramientas disponibles para la manipulación de los componentes y las características de las placas. El uso de librerías permite el crear paquetes los cuales contienen los símbolos, las huellas y los modelos 3D.

Algo importante a mencionar es que la elaboración del diseño de un PCB no es simplemente colocar los componentes de manera que simplemente estos ocupen un área específica, algunas de las consideraciones que se tomaron en cuenta mas que nada fue en el diseño de las pistas dando prioridad a la minimización de la longitud, un adecuado espesor y el utilizar pistas que viajan en un mismo sentido con la misma separación [50].

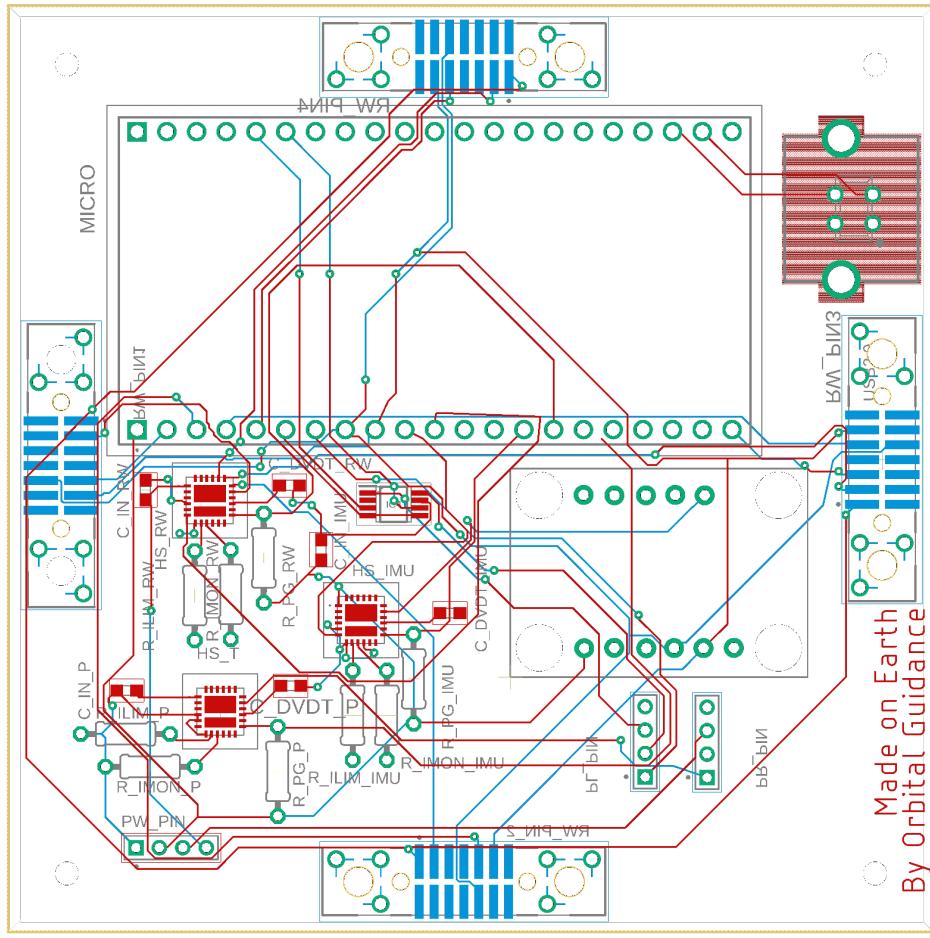


Figura 55: Diseño del PCB.

El PCB propuesto se muestra en la figura 55. Algunos aspectos importantes a mencionar es que las líneas cuentan con un espesor de 5 mm, las cuales soportan las corrientes máximas emitidas desde el EPS ya que esta no superará los 5 A. Las dimensiones de la placa son de 79x79 milímetros, esto teniendo en consideración las de la unidad CubeSat por lo que se aprovechó el realizar el diseño en dos capas en el mismo PCB una capa superior y otra inferior.

Los componentes y las líneas ubicadas en la capa inferior se denominan con el color azul claro. Se colocaron los conectores de las ruedas de reacción en la parte inferior de la placa, así como los pines de conexión para la comunicación con el propulsor. Por otro lado, en la capa superior se colocan los demás componentes tales como los pines de conexión con el sistema de potencia, la interfaz de potencia, el controlador ESP32, el puerto USB tipo B, el IMU utilizado así como dos interfaces de datos extra utilizadas por el sistema. Dichos componentes se pueden apreciar de una forma más clara en las imágenes 56 y 57, las cuales contienen una vista superior e inferior respectivamente del modelo en 3D.

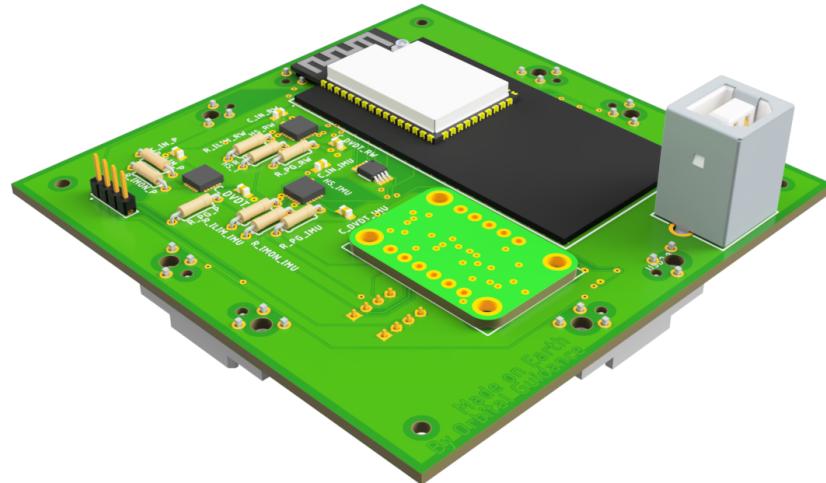


Figura 56: Vista inferior del PCB en 3D.

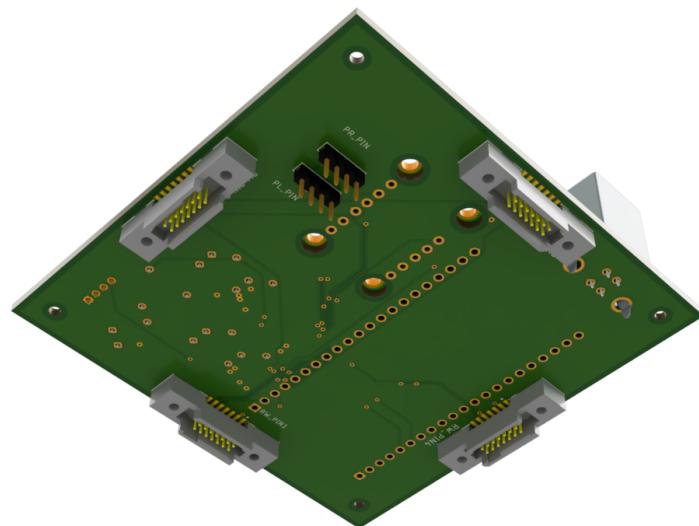


Figura 57: Vista inferior del PCB en 3D.

3.3.1. Integración eléctrica

Una vez diseñado el PCB a partir del diagrama eléctrico, se muestra en la figura 58 un resumen de las conexiones establecidas, indicando el tipo de interfaz que estas

representan. Se describen como líneas rojas las conexiones necesarias para la distribución de potencia del sistema, mientras que las demás líneas son para la transmisión y recepción de datos: en líneas azules interfaces del protocolo UART, en líneas amarillas se observan conexiones que siguen el protocolo I^2C , la línea verde corresponde a la interfaz de USB, la morada corresponde a datos de tipo TTL y por último las grises son valores lógicos.

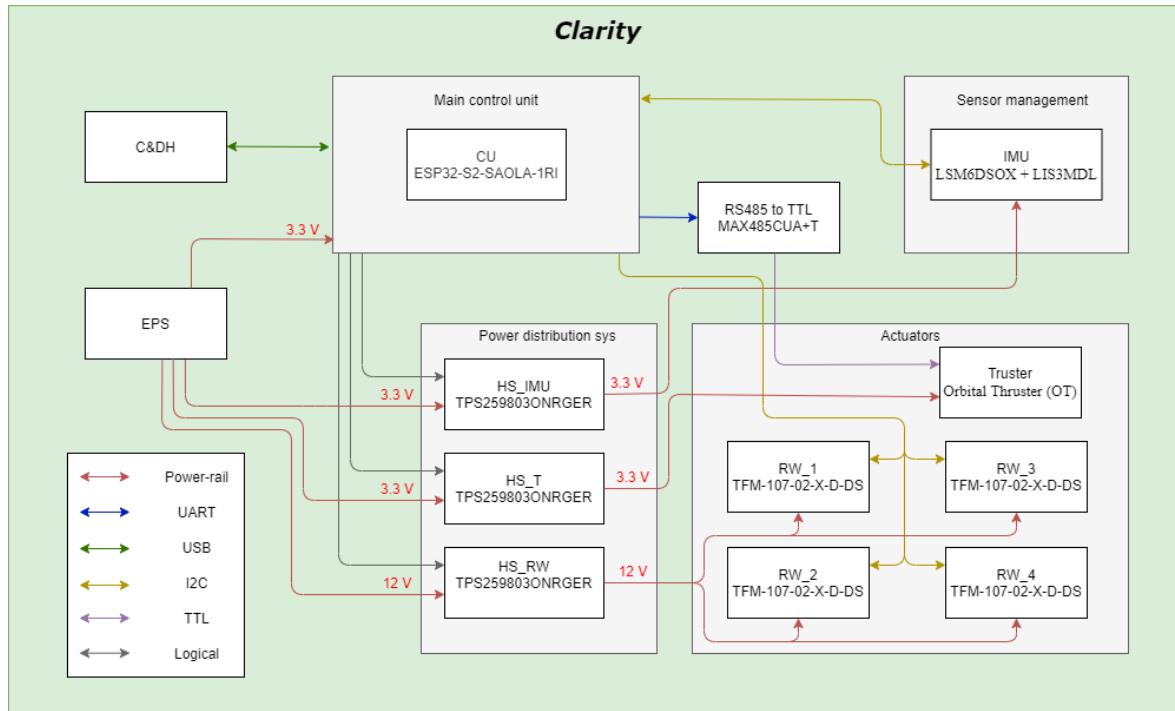


Figura 58: Esquema de integración y verificación de interfaces eléctricas.

■ Interfaz de potencia

Para la alimentación con el EPS se utiliza una cabecera de pines para la conexión directa con las terminales de voltaje necesarias, de esta cabecera la potencia es distribuida a la interfaz de control de potencia, la cual se encarga de distribuir la potencia a cada componente y de cortarla en caso de ser necesario. Esta interfaz de potencia se encuentra compuesta de tres unidades de *hot swap controllers*, las cuales son controladas mediante la unidad de procesamiento del sistema. La corriente máxima se encuentra limitada por algunas resistencias presentadas en el diagrama eléctrico, así como una regulación en cuanto al cambio de voltaje con respecto al tiempo, esto basado en la hoja de datos de dicho componente. Un *hot swap controller* se encarga de suministrar energía a las ruedas de reacción supliendo con 12 V a cada una de estas, otro al propulsor y el último se encarga de entregar potencia a la unidad de medición inercial con 3.3 V.

■ Interfaz con C&DH

Se implementó una interfaz USB 2.0 en el sistema Clarity, esto dadas las capacidades de comunicación del bus KRATOS de EXA. USB 2.0 maneja datos de forma sencilla en comparación con versiones posteriores de este mismo protocolo ya que utiliza dos pines para el manejo de datos. El controlador ESP32 cuenta con dos pines para el manejo de estos datos tal como se establece en el protocolo, por lo que sólo se requiere el conector de USB 2.0 tipo B de entrada para el manejo de estos datos.

Nótese que tanto la interfaz de potencia como la interfaz con el C&DH se encuentran en la capa superior del PCB (ver figura 56) esto con el fin de facilitar la integración con otros componentes del satélite.

■ Interfaz con los actuadores

En cuanto a los actuadores, si bien estos pueden ser añadidos directamente al PCB, se consideró que debido a las fuerzas que estos son capaces de ejercer pueden causar daños al PCB de forma periódica por lo que se decidió el disponer de conectores para cablear estos componentes sin la necesidad de usar la placa eléctrica como soporte, sino más bien anclar los actuadores a la estructura.

Por un lado se cuenta con las ruedas de reacción, para las cuales se hace uso de un arnés de la serie TFM-107-02-L-D-DS, mientras que el propulsor utiliza otro tipo de cabecera pero de igual forma estos se encuentran en el PCB y en el propulsor, por lo que posteriormente solo se realiza el cableado. No obstante, para la comunicación del propulsor con la unidad de procesamiento, esta no se puede realizar de forma directa, es acá donde se hace uso del componente μ MAX485, este dispositivo funciona como interfaz entre ambos dominios de comunicación, convirtiendo los datos de TTL a RS-485 o viceversa, dependiendo del sentido de la comunicación.

Nótese que en este caso según la imagen 57, estos conectores para los actuadores son dispuestos en la parte inferior del PCB, esto se implementó de esta manera con el fin de minimizar el cableado trazando una ruta directa del mismo hacia las ruedas de reacción y la placa, y uno no tan directo con el propulsor, esto con el fin de disponer de dicho componentes un poco alejados del PCB y facilitar la integración mecánica, cuya disposición final se realizó tomando en consideración la manera en la que se hacen uso los algoritmos de software al hardware propuesto.

3.3.2. Integración mecánica

Para la visualización de la integración mecánica se determinó que la estrategia a seguir sería la de integrar el sistema dentro de una estructura de 1U de CubeSat genérica, con el fin de mostrar la distribución de componentes una vez instalado el sistema Clarity dentro del mismo. La estructura seleccionada para este fin se obtuvo de GrabCAD [51] y se muestra en la figura 59.

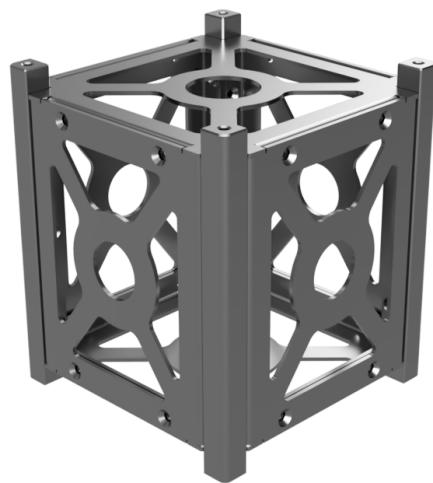


Figura 59: Estructura de 1U de CubeSat.

Los componentes se ensamblaron dentro de dicha estructura con los propósitos de verificar el cumplimiento con las restricciones volumétricas así como mostrar el producto final ya integrado. En la figura 60 se muestra dicho producto final.

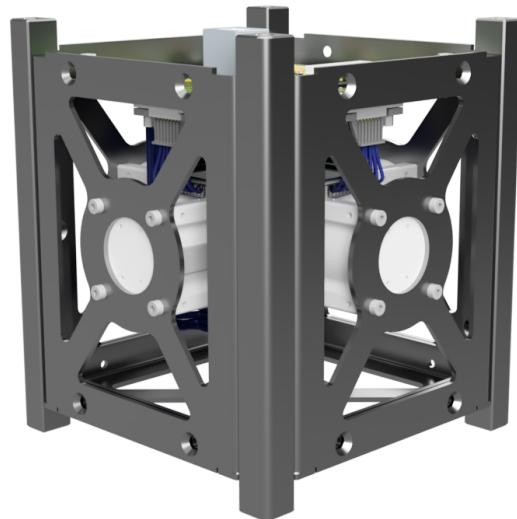


Figura 60: AOCS Clarity integrado en una estructura de 1U de CubeSat.

En la figura 61 se muestra el sistema integrado sin la estructura de CubeSat, con el

propósito de mostrar las diferentes interfaces tanto eléctricas como mecánicas. Dentro de las interfaces mecánicas se destaca el uso de espaciadores (posicionados en las esquinas del circuito impreso) como mecanismo de sujeción del circuito impreso, este se ancla con el stack de PCBs del satélite una vez sea integrado el sistema completo por parte de los operadores/integradores. Otro elemento que forma parte de la integración mecánica es el uso de 4 tornillos M2 por cada rueda de reacción (se utilizan 4 de estas) para la sujeción en la estructura y el uso de un bracket de sujeción para el propulsor, el cual se muestra en la figura 62. El plano del diseño de este componente se presenta en el anexo de la sección 14.



Figura 61: AOCS Clarity.



Figura 62: Bracket diseñado para la sujeción del propulsor.

Cabe destacar que el propulsor que se seleccionó y que es el dispositivo al que sostiene el bracket anteriormente presentado, no cuenta con un modelo CAD provisto por el fabricante, por lo que se procedió a generar un modelo aproximado de este. Las dimensiones fueron obtenidas de [52, 53] y el circuito impreso fue generado con componentes representativos y rutas generadas por la herramienta *autoroute* de Autodesk Eagle. Dicha aproximación no pretende ser utilizada más que para efectos académicos. El render generado para el propulsor se presenta en la figura 63.

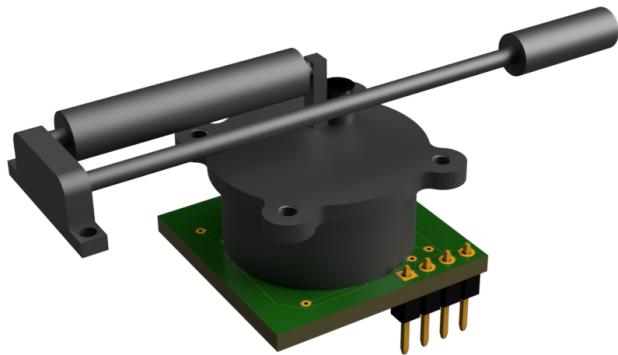


Figura 63: Modelo CAD aproximado del propulsor. El sistema le pertenece a Aurora Propulsion Technologies OY y el modelo realizado no pretende ser utilizado para otros fines más que los académicos acotados a este proyecto.

Con respecto a las interfaces eléctricas, en el modelo CAD que se presentó en la figura 61 se muestran los arneses de conexión eléctrica entre el circuito impreso y los actuadores (ruedas de reacción y propulsor), estos se ven como cables azules conectados entre los arneses correspondientes. Una vista lateral que muestra más claramente estas conexiones se presenta en la figura 64 y una vista isométrica del sistema sin dos paneles y un pilar de la estructura se presenta en la figura 65.



Figura 64: Vista lateral del sistema sin una de las paredes de la estructura.

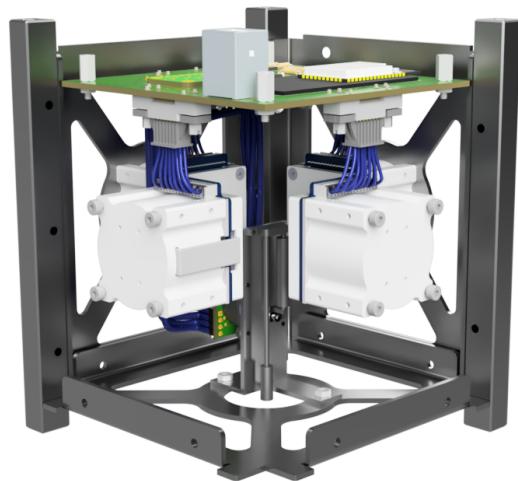


Figura 65: Vista isométrica del sistema.

3.3.3. Integración de software

Si bien el desarrollo de los archivos de código para software no se realizó en las etapas ejecutadas, es importante el conocer como se pretende incluir los algoritmos de software e integrarlos al hardware del ESP32.

La empresa Espressif systems cuenta con una serie de documentación exhaustiva en cuanto a los componentes que ofrece y el ESP32 no es una excepción, en la referencia [54] se especifican aspectos acerca de la creación de software para el ESP32.

Es necesario la utilización de una herramienta de construcción para esto se propone CMake la cual integra las librerías básicas que comunican con el hardware, el toolchain de preferencia y el desarrollo del proyecto para construir la API e insertarla a la memoria del controlador. El desarrollo de API's en este caso se puede utilizar Windows, Linux o MAC OS.

Espressif cuenta con un repositorio en git de donde se pueden extraer diversas cosas, dicho repositorio cuenta con ESP-IDF el cual tiene varias API's (tanto librerías de software como código fuente), realizando las configuraciones específicas del dispositivo objetivo estas se pueden utilizar de manera efectiva. No obstante es posible que la implementación de todos los algoritmos no se puedan realizar en la versión existente de este repositorio por lo que para el desarrollo de la misma se especifica el uso de ambientes de desarrollo integrado como lo es VS Code Extension.

Una vez se cuenta con el código fuente y las librerías requeridas se procede a realizar la conexión del hardware con el computador, se conecta el dispositivo, se establecen las configuraciones y se procede a construir la imagen, la imagen es construida de forma automática si no se cuentan con errores tanto de código o de configuración, en caso contrario es posible que se muestren fallos en el intento y no se pueda completar la construcción. La imagen creada cuenta con los archivos binarios del gestor de arranque, de la tabla de particiones y de la aplicación necesarios para empezar con la instalación en el dispositivo.

4. Análisis del diseño

4.1. 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. Es importante definir un método apropiado para cada acción de verificación. Una buena definición del método de verificación toma en cuenta las siguientes preguntas:

4.1.1. ¿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 [55]. 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.

4.1.2. ¿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.

4.1.3. ¿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.

4.1.4. ¿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.

En la figura 66 se puede ver la cantidad de requerimientos por método de verificación.

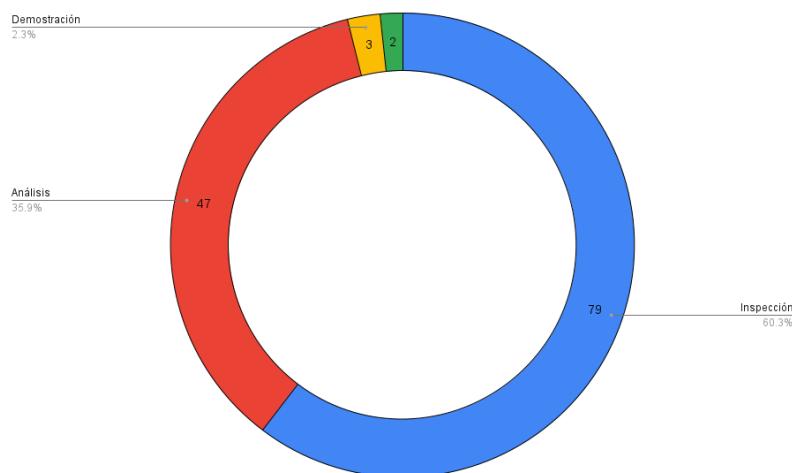


Figura 66: Métodos de verificación.

Una vez identificado el método a utilizar por requerimiento, se procedió a determinar áreas de verificación, esto con el fin de optimizar el procedimiento de verificación. Al tener esta división se puede organizar de manera más eficiente el periodo de verificación ya que algunos de los métodos a aplicar son similares o iguales entre requerimientos de la misma área. Se tiene 2 áreas generales: operativos y subsistemas, cada una de ellas cuenta con sub-áreas más específicas en las que se clasificaron los requerimientos. En la figura 67 se puede ver las áreas de verificación y la cantidad de requerimientos por cada una.

Áreas de verificación	
Operativo	
Rendimiento	14
Condiciones ambientales	5
Políticas y regulación	13
Planos y documentación	2
Empaquetado, manejo, envío y transporte	2
Subsistemas	
Software	33
Estructura	9
Comunicación	20
Sensores	5
Control	25
Potencia	3
Total	131

Figura 67: Áreas de verificación.

En la figura 68 y 69 se muestran gráficos que representan el porcentaje de las 2 áreas generales y el porcentaje de cada sub-área específica respectivamente, ambos de los 131 requerimientos en total.

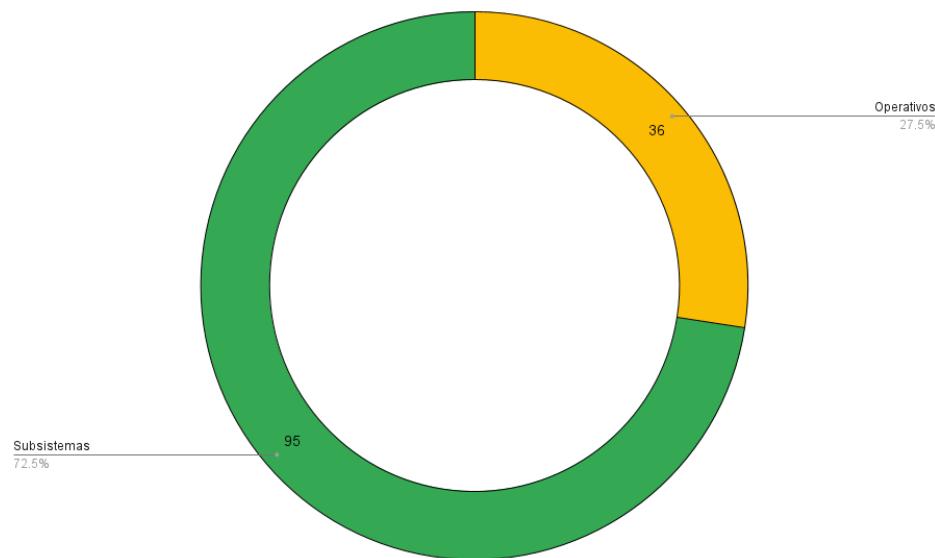


Figura 68: Áreas de verificación generales.

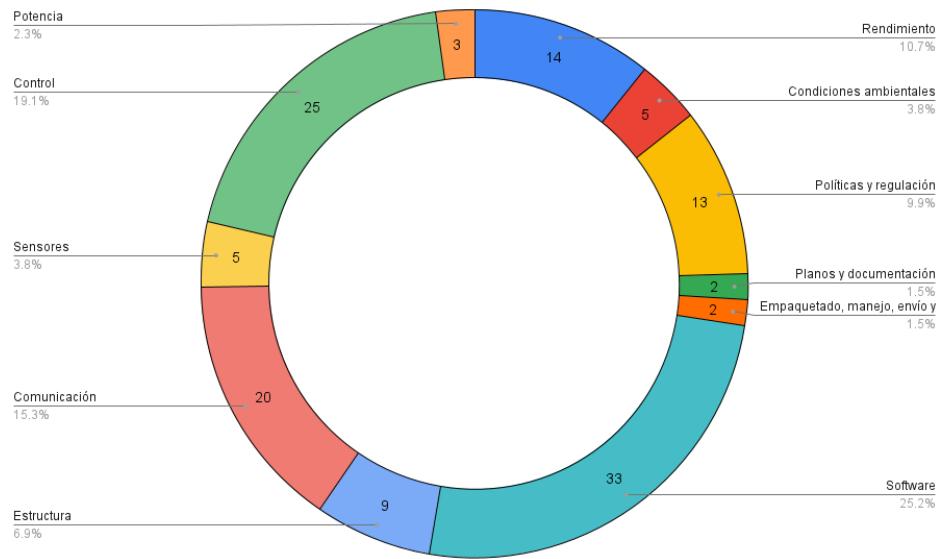


Figura 69: Áreas de verificación específicas.

Por cada área se realizó una matriz de verificación con las siguientes secciones:

- ID: En la que se muestra el ID asignado al requerimiento.
- Requerimiento: En la que se muestra el nombre del requerimiento.
- Método: En la que se muestra el método utilizado para verificar el requerimiento. Entre las opciones se encuentra: inspección, análisis, demostración y prueba. Para esta sección se utilizó abreviaturas, estas se pueden ver en la figura 70.
- Estado: En la que se muestra el estado de la verificación del requerimiento. Entre las opciones se encuentra: cumple, no cumple y por cumplir. Para esta sección se utilizó abreviaturas, estas se pueden ver en la figura 71.
- Observaciones: En la que se muestra la descripción de las acciones a realizar para poder verificar el requerimiento.
- Fuente: En la que se muestra la fuente en la que se puede consultar la veracidad del estado del requerimiento.

Método	
I	Inspección
A	Análisis
D	Demostración
P	Prueba

Figura 70: Abreviaturas utilizadas para los métodos de verificación.

Estado	
C	Cumple
NC	No cumple
PC	Por cumplir

Figura 71: Abreviaturas utilizadas para los estados de la verificación.

En la figura 72 se puede ver el acomodo de las secciones en las matrices.

ID	Requerimiento	Método	Estado	Observaciones	Fuente

Figura 72: Encabezado para las matrices de verificación.

A continuación, en la figura 73 se presenta la matriz de verificación de estructura como un ejemplo; sin embargo, todas las matrices serán ubicadas en el anexo E de la sección 13.

Matriz de Estructura					
ID	Requerimiento	Método	Estado	Observaciones	Fuente
SyRS-81	Interfaz con C&DH	I	C	Comprobar que la comunicación con el C&DH se realice mediante USB	Renders en 3D
SyRS-82	Interfaz con EPS	A	C	Comprobar que la alimentación de cada componente utilice el bus de potencia que cada uno requiere específicamente	PCB
SyRS-99	Compatibilidad con el Bus KRATOS	A	C	Comprobar la compatibilidad con el bus de KRATOS mediante el uso del protocolo USB	PCB
SyRS-105	Compatibilidad Estructural	A	C	Comprobar la compatibilidad del sistema con la estructura de una plataforma CubeSat	Renders en 3D
SyRS-100	Volumen	I	C	Verificar que las dimensiones físicas no excedan una unidad de CubeSat	Renders en 3D
SyRS-101	Masa	A	C	Verificar que el peso del sistema no excede los 1.3kg	BOM
SyRS-102	Integración Estructural	A	C	Verificar la integración física del sistema con la estructura de una plataforma CubeSat	Renders en 3D
SyRS-108	Interferencia de Partes Móviles	I	C	Verificar que las partes móviles del sistema no interfieran con los demás subsistemas del satélite	Renders en 3D
SRS-127	USB 2.0	I	C	Comprobar que la comunicación con el C&DH se realice mediante USB	Renders en 3D

Figura 73: Matriz de verificación de estructura.

Los resultados de la estrategia de verificación son satisfactorios ya que un 89.3 % de los requerimientos fueron cumplidos. Los requerimientos con estado por cumplir que representan un 9.2 % deberán ser desarrollados en una etapa posterior. Estos porcentajes se muestran en el gráfico de la figura 74.

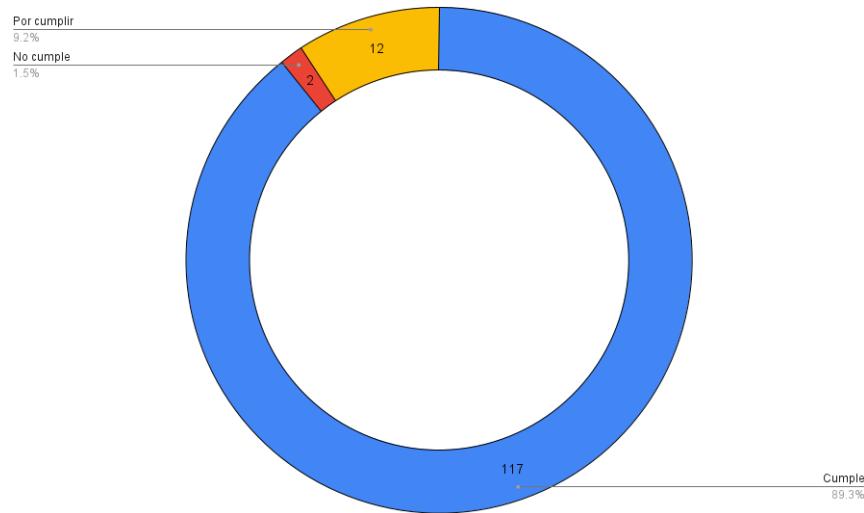


Figura 74: Resultados de estrategia de verificación.

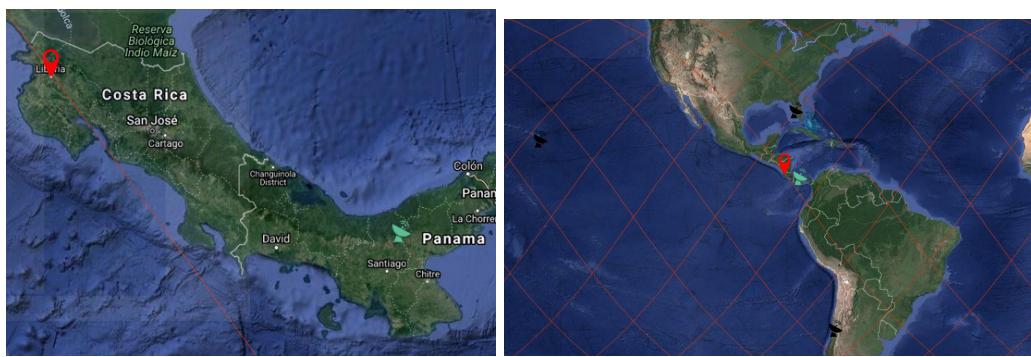
4.2. Desempeño del Diseño

En esta sección se busca analizar el desempeño del diseño, con el objetivo de tener como evidencia que el sistema o algún elemento que lo conforme cumple con los requerimientos y los presupuestos indicados. Además, identificar potenciales limitaciones del diseño propuesto.

4.3. Trayectoria del satélite

Mediante el uso del software Open Cosmos, el cual es una plataforma en línea que simula el desarrollo de misiones, disponible en [56], se simuló la trayectoria de un satélite, con características orbitales tales como altitud de 400Km, inclinación de 51,6, excentricidad de 0.0017, la cual se muestra en la figura 75. En donde la imagen *a* muestra un punto de interés que se eligió, en este caso en Costa Rica, para ejemplificar alguna función que el satélite debe realizar sobre esta región. Luego, en la imagen *b*, se muestra también el Ground Station o la Estación Terrestre, además de las posibles trayectorias del satélite. Cabe resaltar que la Estación Terrestre, en este caso en Panamá, es una estación real, desde donde se podrá por ejemplo establecer la comunicación con el satélite.

Según la simulación anterior, en la Figura 76, se muestran los principales resultados. Entre ellos, está la duración del pase en minutos que se tendría para establecer la



(a) Simulación de un punto de interés

(b) Ground Station

Figura 75: Simulación de la trayectoria del satélite

comunicación, es cual da como promedio 6,37 minutos, así como el número de pases, el cual es de 4, que se puede tener en un rango de 24 horas.

Parameter	Minimum	Maximum	Average
GS Pass duration [min]	3.20	8.36	6.37
PL download time [min]	0.00	0.00	0.00
PF download time [min]	2.86	5.50	3.93
Remaining contact time [min]	3.20	8.36	6.37
Total GS visibility time [min]			25.47
Visibility time per orbit [min]			1.64
Total number of GS passes:			4
Number of GS passes per orbit:			0.26

Figura 76: Datos Relevantes de la Trayectoria del satélite.

4.4. Dinámica del Satélite

Para simular la dinámica de un satélite en el espacio, es necesario aplicar conocimientos matemáticos y físicos que ayuden a describir el comportamiento del sistema. Por ejemplo, las leyes de Newton del movimiento y la Ley de la gravitación universal, son las leyes que gobiernan la astro-dinámica. Por otro lado, entendiendo el comportamiento de un cuerpo en el espacio, y las leyes que lo rigen, mediante modelos matemáticos se pueden simular y controlar dichos sistemas.

Las siguientes simulaciones, tienen como objetivo mostrar el comportamiento del satélite, así como el resultado de implementar modelos para el control o la estabilización del mismo según se requiera.

La figura 77 ejemplifica el comportamiento de un satélite en el espacio, sin aplicar ningún tipo de control. El satélite simplemente estaría girando sin ningún sentido.

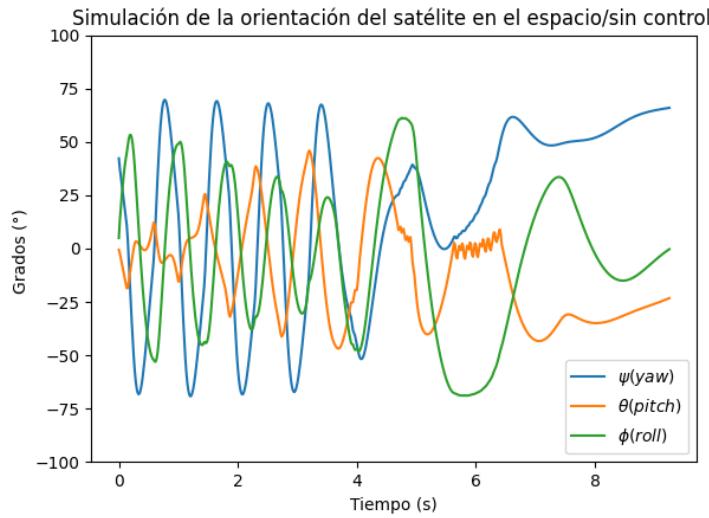


Figura 77: Comportamiento del Sistema en el Espacio.

En las figuras 78, 79, 80, se muestra el control de la posición angular del satélite en los diferentes ejes. En esta simulación se utilizó un controlador PID, en el cual se toman en cuenta variables como radio de la Tierra, altitud del satélite, momentos de inercia, torques máximos dados por las ruedas de reacción, entre otros.

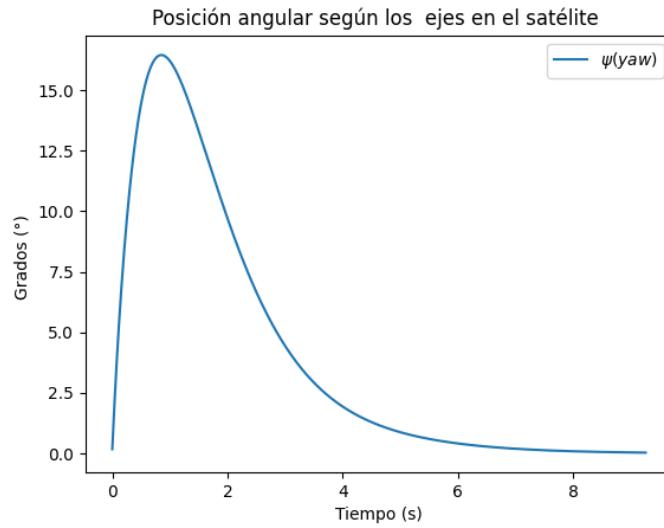


Figura 78: Posición angular (Yaw).

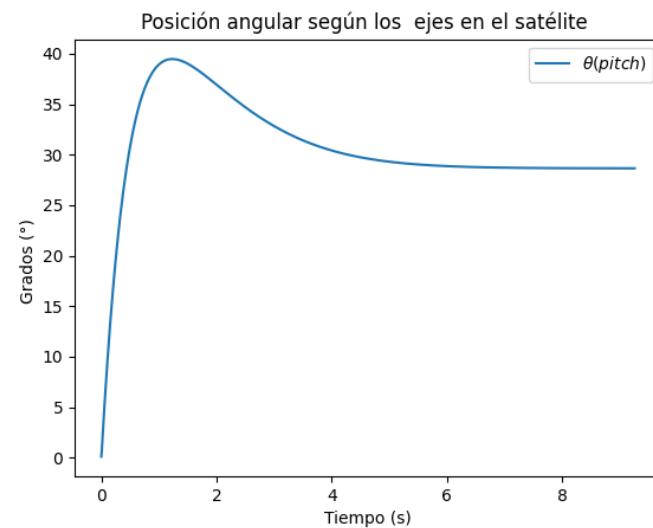


Figura 79: Posición angular (Pitch).

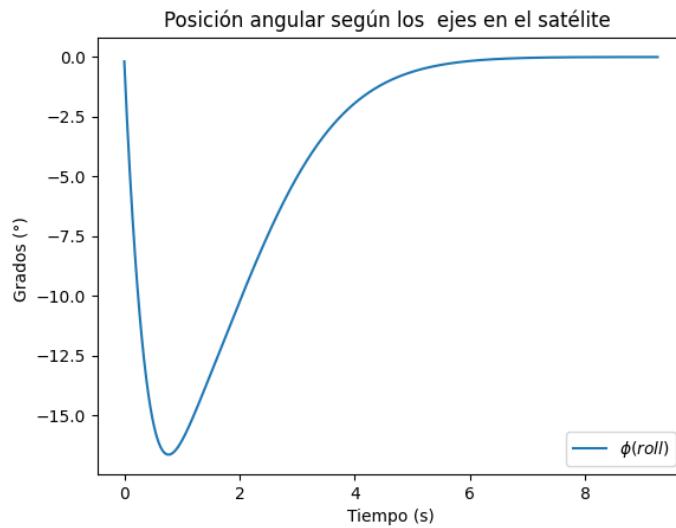


Figura 80: Posición angular (Roll).

Haciendo la combinación de las posiciones angulares en los 3 ejes, es posible estabilizar el sistema, en una orientación deseada, como lo exemplifica la figuras 81, en donde las condiciones iniciales y finales son las mismas para los tres ejes, y 82 donde se expone un escenario más realista, asumiendo que las condiciones iniciales no son iguales y además, cada eje converge a una posición angular diferente.

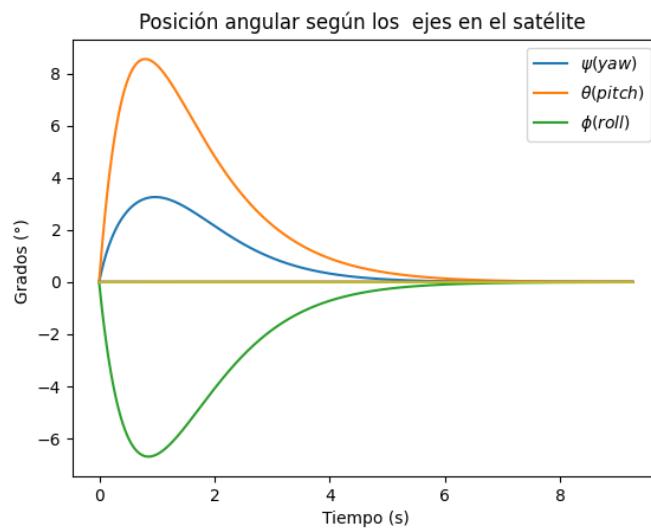


Figura 81: Estabilización en la Orientación del Sistema(caso ideal).

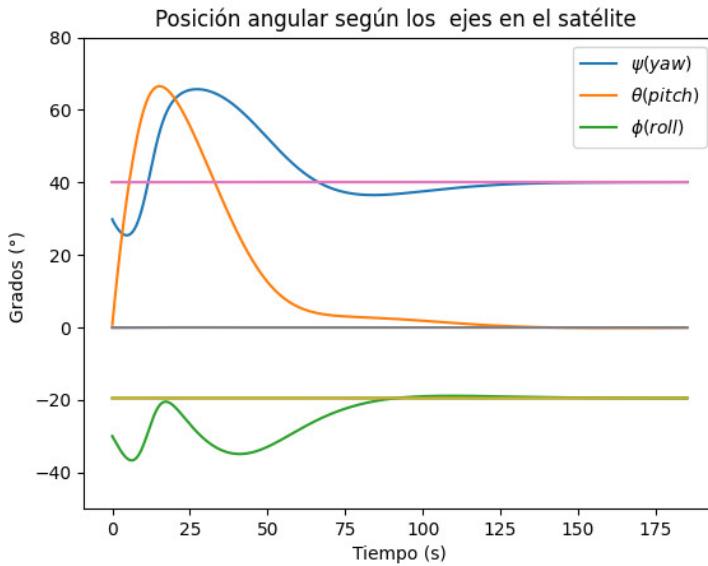


Figura 82: Estabilización en la Orientación del Sistema(caso más realista).

Ahora bien, para poder llegar a estabilizar la orientación del sistema, es necesario ejercer fuerzas externas para poder cumplir con el objetivo. En este caso, la figura 83 muestra los torques ejercidos por las ruedas de reacción para la estabilización del sistema.

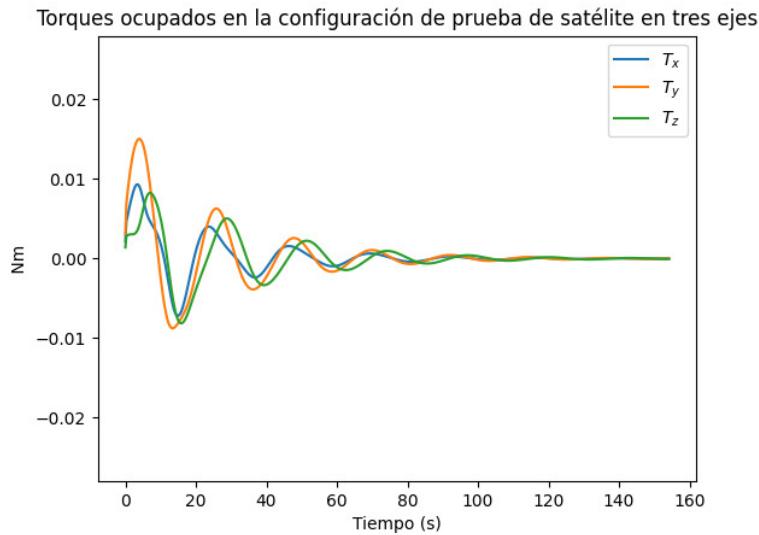


Figura 83: Torques Requeridos.

Por otro lado, el sistema deberá ser capaz de reducir la velocidad giro, para ello se implementó el siguiente modelo en Matlab, el cual se muestra en la figura 84. Se basa en un algoritmo de control de Euler, el cual regularmente sirve como base para construir métodos más complejos. Este modelo se está fundamentado en un modelo mucho más complejo en el repositorio disponible en [57]. Según lo anterior, basándonos en la solución escogida para el algoritmo de control preciso de giro, el cual fue el AMM Algorithm, que por razones de complejidad no se logró implementar en esta etapa del proyecto, se buscó aproximar el algoritmo de control de Euler al AMM. Para esto se tomaron en consideración las cuatro ruedas de reacción, así como el torque máximo que se puede suministrar al sistema. Esto con el fin de obtener resultados más confiables.

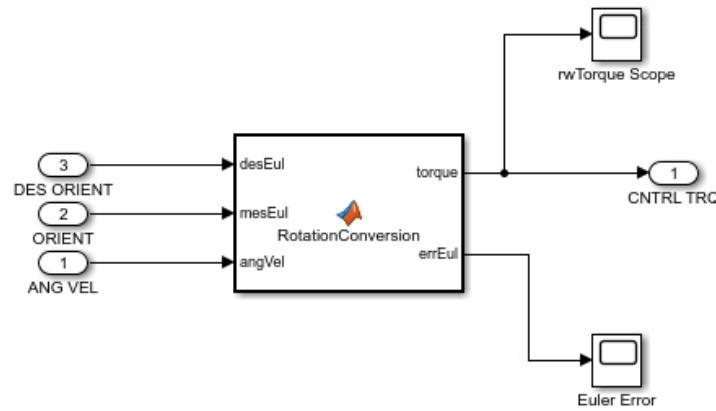


Figura 84: Diagrama de Bloques para el control de la velocidad de giro.

En la figura 85, se muestra el diagrama de bloques del algoritmo de control de Euler implementado.

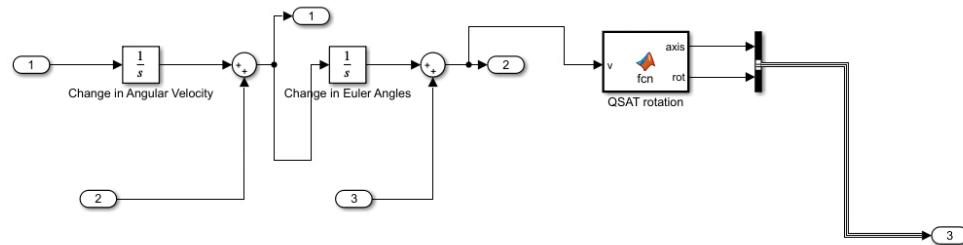


Figura 85: Diagrama de Bloques del algoritmo de control de Euler.

Según el modelo presentado, se obtuvieron los resultados mostrados en las figuras 86 y 87, en donde se observa que el tiempo de asentamiento del satélite es de aproximadamente 150 segundos, con un % de error de -2,12 % en el caso del eje Z, el cual para este caso, es el más significativo.

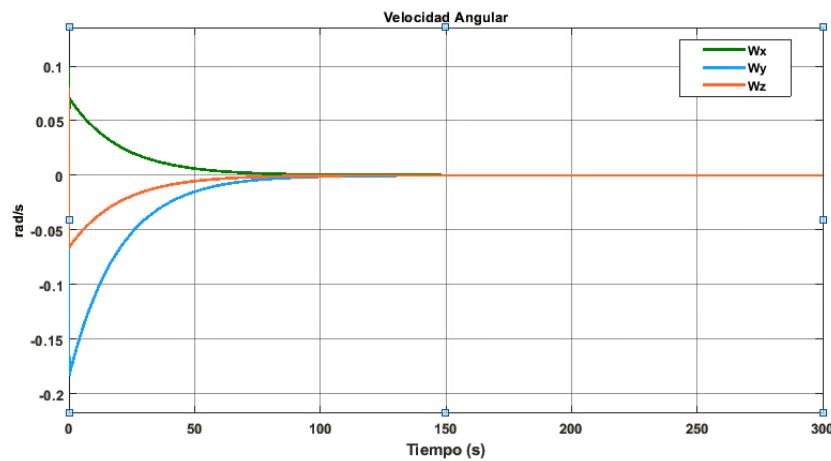


Figura 86: Diagrama de Bloques del algoritmo de control de Euler.

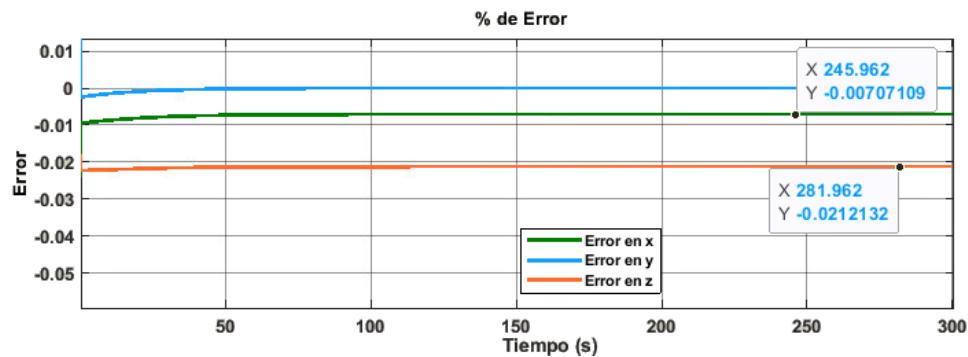


Figura 87: Diagrama de Bloques del algoritmo de control de Euler.

En el caso de que se detecten anomalías, la figura 88, ejemplifica el escenario en el que por alguna errónea lectura en los sensores, se tuviera que suministrar un torque mayor a $23mNm$, el cual es el torque máximo proporcionado por las ruedas de reacción.

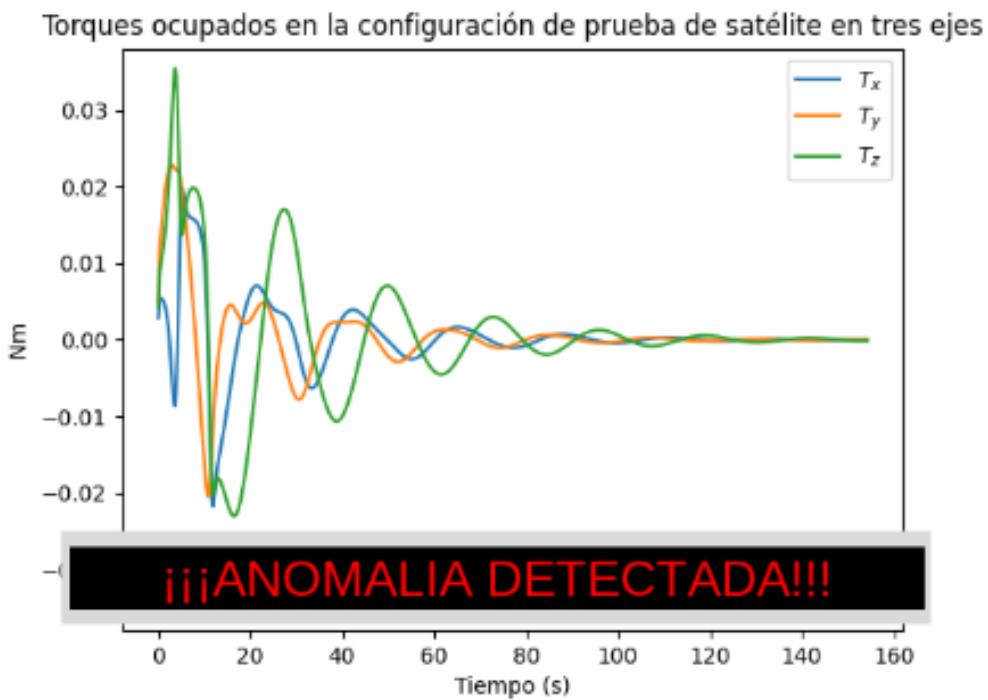


Figura 88: Detección de Anomalías.

A continuación, se presenta un resumen del desempeño de diferentes subsistemas.

- La estabilización de la orientación del satélite según las simulaciones expuestas es aceptable.
- El sistema presenta un buen desempeño con el objetivo de reducción de la velocidad angular del satélite.
- El consumo de potencia nominal del sistema considerando el Esp32, las cuatro ruedas de reacción y el IMU es de aproximadamente 903mW.

Según el diseño propuesto en este trabajo, nuestro sistema posee limitaciones, los cuales se listan a continuación

- Variables como las incertidumbres de la sensórica y de los actuadores, así como perturbaciones en los datos por el ruido no fueron consideradas en las simulaciones.
- El margen de error de -2% indica movimientos no deseados en el sistema. Además, el control implementado es una aproximación al AMM Algorithm.
- Se depende de un módulo de conversión de UART TTL a RS485, no es nativa la comunicación del ESP32.

5. Estrategia de sostenibilidad y regulaciones

5.1. Estrategia de sostenibilidad

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 [22]) 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 [58] 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:

5.1.1. 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 adquisidores 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/adquisidores 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 Kressler junto con sus consecuencias en las órbitas terrestres es importante para mostrar a la sociedad la importancia de la conservación de este recurso.

5.1.2. 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.

5.1.3. 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.

5.1.4. Gestión de residuos eléctricos y electrónicos

Si bien este punto no está presente en la estructura propuesta en [58], 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 [59]. Este documento nace como un instrumento que permite a diferentes actores dar o recibir el servicio de recolección de desechos electrónicos de manera que se cumpla con la legislación vigente en Costa Rica, dentro de la que residen decretos ejecutivos en el ámbito de gestión integral de residuos (*Decreto Ejecutivo N° 37567-S-MINAET-H Reglamento General a la Ley para la Gestión Integral de Residuos, Decreto Ejecutivo N° 38272-S Reglamento para la declaratoria de residuos de manejo especial, Decreto Ejecutivo N° 35933 Reglamento para la Gestión Integral de Residuos Electrónicos, Decreto Ejecutivo N° 35906-S Reglamento de Centros de Recuperación de Residuos Valorizables, Decreto Ejecutivo N° 38928-S Reglamento sobre rellenos sanitarios*) y otros en el ámbito del manejo de residuos peligrosos (*Decreto Ejecutivo N° 37788-S-MINAE: Reglamento General para la Clasificación y Manejo de Residuos Peligrosos, reforma Reglamento sobre las características y listado de los desechos peligrosos industriales y Reglamento para el Manejo de los Desechos Peligrosos Industriales, Decreto Ejecutivo*

N° 24715-MOPT-MEIC-S Reglamento para el Transporte Terrestre de Productos Peligrosos, Decreto Ejecutivo N° 27000 Reglamento sobre las características y listado de los desechos peligrosos industriales, Decreto Ejecutivo N° 27001-MINAE Reglamento para el manejo de los desechos peligrosos industriales, Decreto Ejecutivo N° 27002 Reglamento sobre el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar constituyentes que hacen un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente).

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.

Bajo estas consideraciones, 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 89, 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.

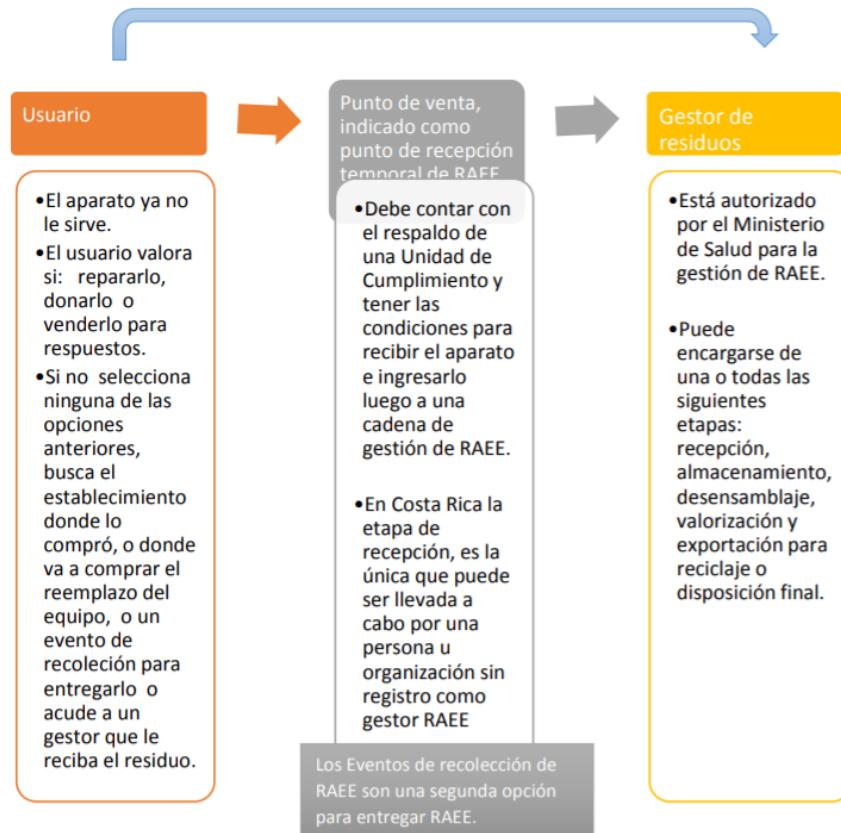


Figura 89: Ciclo de vida/Ruta de un residuo electrónico en Costa Rica.
 Obtenido de [59].

Una de las consideraciones que se tomarán será la de la debida clasificación e identificación de los desechos, ya que, bajo la guía seleccionada, se debe procurar la trazabilidad de todos los componentes que sean almacenados y desensamblados por parte de los entes que reciben los componentes desecharados. Para esto, se deberá etiquetar el desecho según su naturaleza tal que se evidencie si el componente es o no peligroso, debe ser confinado en un recipiente (y detallar sus especificaciones) e identificar el riesgo que este podría implicar, junto con las precauciones que deben tomarse en cuenta a la hora de manipularlo.

Mantener la integridad de los desechos es fundamental y es uno de los lineamientos estipulados en la RAEE, donde se especifica que estos deberán ser manipulados como objetos frágiles.

En el caso de el daño de un componente de oficina o laboratorio, este deberá ser manipulado únicamente en un centro de reparación, no intentar abrirlo y repararlo. Importante tomar en cuenta que la guía especifica que si se hará un cambio en un componente de oficina o laboratorio, se deberá procurar que el proveedor reciba el componente saliente y si no se pretende hacer un cambio, identificar un centro de

recepción autorizado.

La selección del centro de recolección al que se enviarán los desechos también tiene un impacto en el ambiente y debe ser considerado, ya que estos actores deberán estar debidamente identificados y certificados para poder realizar sus tareas, caso contrario la selección podría implicar el trasiego de componentes desechados de manera irregular.

5.2. Regulaciones.

5.2.1. Normas y estándares aplicables.

De acuerdo con [60], 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.

5.2.1.1 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 [55] 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.

5.2.1.2 Leyes.

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 incluyen 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 [59].

5.2.1.3 Diseño de Sistema.

Selección de Materiales y Procesos. El propósito del estándar *ECSS-Q-70-71A: Space product assurance-Data for selection of space materials and processes* 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 [61]:

- 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.

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: Graphic Symbols for Electrical and Electronics Diagrams*. 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)* [62].

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* [63].

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 [50].

5.2.1.4 Diseño de Software.

Lenguaje de Modelado. El propósito de *ISO/IEC 19514:2017:Information technology - Object Management Group Systems Modeling Language (OMG SysML)* 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 [64].

Calidad de Software. La norma *ISO/IEC 9126: Software engineering-Product quality* 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 detalladas tomando como referencia 6 características principales: funcionalidad, confiabilidad, usabilidad, eficiencia, mantenibilidad y portabilidad [65]. El cuadro 3 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.

Característica	Pregunta Central
Funcionalidad	¿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 3: Características de ISO-9126 y aspecto que atiende cada una [65].

Evaluación de Software. Para la evaluación de software, se puede aplicar el estándar *ISO/IEC 14598: Information technology-Software product evaluation*, el cual está muy relacionado con el estándar de calidad *ISO/IEC 9126: Software engineering-Product quality*. *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 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 [66].

Procesos de Medición. La norma *ISO/IEC/IEEE 15939:2017:Systems and software engineering-Measurement process* 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 [67].

Calidad de Datos. *ISO/IEC 25012:2008:Software engineering-Software product Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE)-Data quality model* 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 [68]:

- 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.

Diagramas de flujo. *ISO 9001: Flowchart Basics* 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 [69].

Ciclo de vida del software El estándar *ISO/IEC/IEEE 12207:2017: Systems and software engineering-Software life cycle processes* 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 en los que el software es el interés primordial a aquellos en los que se usa un poco o nada de software. 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 [70].

5.2.2. Implementación de las normas y estándares.

En este apartado se presentan los resultados a los que se llegaron al aplicar las normas mencionadas anteriormente en las diferentes actividades y avances del proyecto Clarity. El cuadro 4 presenta los resultados de la implementación de cada una de las

normas durante la realización de las tareas que formaron parte del desarrollo del proyecto Clarity.

Norma	Resultado de Implementación
ISO/IEC/IEEE 29148-2018: Requerimientos del Proyecto	Se plantearon los requerimientos del sistema y del software del AOCS, así como la metodología de verificación de estos requerimientos.
Guía Técnica para la Gestión Integral de los Residuos Electrónicos y Eléctricos	Se desarrolló un plan de gestión social y ambiental, que contiene acciones e iniciativas que promueven las buenas prácticas y lineamientos generales para la gestión de residuos eléctricos y electrónicos una vez el ciclo de vida del proyecto Clarity llega a su fin.
ECSS-Q-70-71A: Selección de Materiales y Procesos	Se confeccionó una lista de materiales seleccionados (Bill of materials) necesarios para el AOCS, tomando en cuenta las restricciones y limitaciones de estos para sistemas espaciales.
IEEE 315-1975: Simbología Eléctrica	Se utilizó la simbología de los componentes en los esquemáticos que se construyeron para representar las conexiones que componen el PCB.
ASME Y14.100-2017: Planos y Diagramas	Se generó un plano que presenta las dimensiones del bracket de sujeción del propulsor del AOCS, con el apoyo del software Fusion 360.
IPC: Diseño de Circuitos Impresos	Se llevó a cabo el diseño de los esquemáticos y el layout correspondientes a los PCB's.
ISO/IEC 19514:2017: Lenguaje de Modelado SysML	Se construyeron diagramas IBD, BDD, N2 Chart, basados en el lenguaje de modelado SysML, para describir las funciones del sistema en los ámbitos del hardware y software del AOCS.
ISO 9001: Diagramas de Flujo	Se diseñaron diagramas de flujo que describen los procesos que lleva a cabo el software para cada uno de los módulos que conforman el subsistema AOCS, en la realización de sus funciones y tareas.

Cuadro 4: Implementación de las normas y estándares

Las normas *ISO/IEC 9126: Calidad de Software*, *ISO/IEC 14598: Evaluación de Software*, *ISO/IEC/IEEE 12207:2017: Ciclo de vida del software*; no se utilizan para los aspectos de diseño que se llevan a cabo en este proyecto, pero contienen estándares relevantes para el desarrollo del software del sistema AOCS.

De igual forma, las normas *ISO/IEC/IEEE 15939:2017: Procesos de Medición* en conjunto con *ISO/IEC 25012:2008: Calidad de Datos*, tampoco se requieren para el diseño que se plantea en este proyecto. Sin embargo, sus estándares son de suma importancia para los procesos de mediciones una vez se ha desarrollado el subsistema AOCS, así como también para evaluar la calidad de los datos recopilados por este.

6. Gestión de riesgos

Los riesgos pueden aparecer en cualquier situación o momento, es imposible poder tener total control sobre todos los aspectos que componen un proyecto, desde las piezas para contribuir un producto hasta el factor humano todo posee una posible incertidumbre que puede arruinar un emprendimiento, por esto lo mejor es tener planes de contingencia en caso de emergencias para poder esquivar o mitigar los riesgos.

6.1. Identificación

Siguiendo la metodología propuesta por el PMBoK se comienzo con la identificación de posibles riesgos ver tabla 5.

Tabla de Identificación

Código	Riesgo	Descripción	Puesto(s)	Puesto(s) interesados
R01	Falta de conocimiento técnico.	Los nuevos trabajadores tienen deficiencia o necesitan aprender nuevos conocimientos para el proyecto.	Software Hardware Sistemas Simulación y Calculo Diseño Estructural Integrador Líder Técnico	Financiero
R02	Falta de conocimiento de herramientas.	Los trabajadores poseen conocimiento limitado o ningún conocimiento de la forma correcta de utilizar herramientas.	Software Hardware Sistemas Simulación y Calculo Diseño Estructural Integrador Líder Técnico	Financiero
R03	Fallo de herramienta digital.	La herramienta utilizada tuvo un fallo inesperado.	Software Hardware Sistemas Simulación y Cálculo Diseño Estructural Integrador	Líder Técnico
R04	Cliente insatisfecho.	El cliente considera que cierta sección del producto no cumple con sus expectativas	Software Hardware Sistemas Integrador	Líder Técnico
R05	Emergencia médica.	Alguien del equipo presenta alguna urgencia médica sin previo aviso.	General	
R06	Emergencia médica extendida	Alguien del equipo presente una emergencia médica durante un gran periodo de tiempo y sea incapaz de trabajar.	General	
R07	Fallo de componente de alta gama.	Los componentes físicos de mayor precio no funcionan o poseen algún error.	Hardware Sistema Diseño Estructural Integrador	Financiero Líder Técnico
R08	Mal respuesta de algoritmos	Los algoritmos implementados no funcionan como deberían.	Software Integrador Simulación y Calculo	Líder Técnico Sistemas
R09	Desorden en documentos.	Los documentos no poseen un orden o organización que ayuda a su búsqueda.	Documentador	Administrador del proyecto
R10	Materiales de oficina.	Falta de materiales básicos de oficina para uso diario.	Financiero	

R11	Comunicación con cliente.	Hubo una pérdida parcial o completa con el cliente.	Project Manager	Administrador del proyecto Líder Técnico
R12	Mala organización del equipo trabajo.	Cuando se hacen reuniones y se dan choques de horario por falta de organización.	Secretaria	Administrador de proyecto Líder Técnico
R13	Cambio de proveedor.	Por motivos de terceros o comunicación ya no se puede adquirir materia prima o herramientas del proveedor.	Financiero Business Intelligence	Administrador de proyecto Líder Técnico
R14	No se cumplen las normas.	Cuando no se cumplen las normas pero se puede seguir trabajando.	Software Hardware Sistemas Simulación y Calculo Diseño Estructural Integrador Documentador	Normas y estándares Líder técnico Administrador del proyecto
R15	Incumplimiento legal.	Cuando hay un incumplimiento legal y se peligra a demandas.	Normas y estándares	General
R16	Terminación temprana	El proyecto se acelera y termina antes de lo esperado	General	
R17	Soldadura defectuosa	Desprende punto(s) de la soldadura del PCB	Diseño Estructural Integrador	Líder Técnico
R18	Falta stock	El proveedor que actualmente se encuentra en un estado de deficiencia de materiales.	Financiero Business Intelligence	Administrador de proyecto Líder Técnico
R19	Atrasos de envíos	El envío de materiales es atrasado por motivos de terceros.	Financiero Business Intelligence	Administrador de proyecto Líder Técnico
R20	Límite presupuesto	Se pasa el límite del presupuesto	Financiero Business Intelligence	Administrador de proyecto Líder Técnico
R21	Fallo de componente de gama media	Los componentes físicos de precio medio no funcionan o poseen algún error.	Hardware Sistema Diseño Estructural Integrador	Financiero Líder Técnico
R22	Fallo de componente de gama pequeña	Los componentes físicos de menor precio no funcionan o poseen algún error.	Hardware Sistema Diseño Estructural Integrador	Financiero Líder Técnico

Cuadro 5: Tabla de identificación de riesgo

En tabla 5 se planteó un Código que va a servir para identificar los riesgos, un título (Riesgo) para cada riesgo que resume su descripción, la Descripción que nos explica

más en detalle el riesgo, el Puesto que nos indica las áreas que van a ver directamente el riesgo y Puesto(S) interesado(s) que nos asocia distintas áreas que se pueden ver afectadas indirectamente.

6.2. Análisis

Para el análisis del riesgo se planteó las tablas 6 y 7, estas se utilizan para darle un valor a los distintos riesgos y así poder evaluarlos y ver cuales necesitan mayor tratamiento o si hay algún riesgo crítico que pueda poner en peligro el emparedamiento.

a) Impacto: Se Clasificación la importancia, duración y costo para cada riesgo, se le dará un nivel según sus características.

Nivel Bajo: Se identifica con 1. Se otorga a la característica cuándo se cumpla alguno de los siguientes criterios :

Que sea poca importancia para la creación del producto.

Que sea rápidamente solucionado(días).

Que la inversión económica para solucionarlo sea pequeña.(menor a 1000 dólares)

Nivel Medio: Se identifica con 2. Se otorga a la característica cuándo se cumpla alguno de los siguientes criterios :

Que no se pueda continuar con una parte del producto sin resolver el problema.

Que su solución necesite más tiempo(semanas).

Que el se requiera hacer cambio de presupuesto para resolver el problema (Entre 1000 a 10000 dólares).

Nivel Alto: Se identifica con 3. Se otorga a la característica cuándo se cumpla alguno de los siguientes criterios :

Que el proyecto no pueda avanzar en nada sin resolver el riesgo.

Que su solución tome un tiempo extra considerable(meses).

Que su costo para resolverlo pueda llevar a cancelación del proyecto (Entre 10000 a 19000 dólares).

b) Probabilidad: La estimación de la probabilidad que el riesgo suceda.

Nivel Bajo:Se asigna 1. Probabilidad de riesgo menor a 25 %.

Nivel Medio: Se asigna 2. Probabilidad de riesgo entre 25 % y 50 %.

Nivel moderado: Se asigna 4. Probabilidad de riesgo entre 50 % a 75 %.

Nivel Alto: Se asigna 4. Probabilidad riesgo de 75 % a 100 %.

Tabla de calor de riesgos						
Probabilidad						
4.0	4.0	8.0	12		Crítico	10-12
3.0	3.0	6.0	9.0		Alto	7-9
2.0	2.0	4.0	6.0		Medio	4-6
1.0	1.0	2.0	3.0		bajo	1-3
	1.0	2.0	3.0			
Impacto						

Cuadro 6: Tabla de calor de riesgos

Primero en la tabla 6 se crea una tabla para darle un valor a cada riesgo según cada impacto(habrá tres tabla una por cada impacto) estos valores se utilizaran más adelante con 7 para crear un valor para la evaluación general de cada riesgo. Ver tabla 8.

Tabla de Prioridad										
Número de áreas de impacto										Prioridad
3.0	3	6	9	12	18	24	27	36		1.0 26-36
2.0	2	4	6	8	12	16	18	24		2.0 18-25
1.0	1	2	3	4	6	8	9	12		3.0 10-17
	1.0	2.0	3.0	4.0	6.0	8.0	9.0	12.0		4.0 1-9
Valores de Tabla de calor										

Cuadro 7: Tabla de prioridad

En la tabla 7 utilizando los valores de la tabla de valor y los tres impactos obtenemos valores de la prioridad, de esta forma podemos encontrar cuales riesgos son los más peligrosos y, la intención con esta tabla es tomar el valor de cada tabla de calor y combinar los tres impactos para obtener un valor total, luego le damos una Prioridad: la prioridad 1 es crítica y si los riesgos de este nivel pueden poner en peligro el proyecto, el nivel 2 son riesgos posiblemente hay que enfrentar entonces se planea un plan para cuando sucedan y van a tener un impacto considerable en el proyecto además que hay que estar vigilándolos, el nivel 3 nos habla de riesgos que podrían o no suceder pero que igual van a tener un impacto en la empresa entonces se debe estar preparado, por último el nivel 4 nos habla de riesgos muy poco probable, entonces estos se aceptan se planea un plan en caso que sucedan pero no se siguen por su probabilidad mínima.

Tabla de valor de riesgo					
Código	Importancia	Duración	Costo	Probabilidad	Peso
R01	3.0	2.0	1.0	4.0	24
R02	2.0	2.0	1.0	4.0	20
R03	2.0	1.0	1.0	1.0	4
R04	2.0	2.0	2.0	1.0	6
R05	3.0	1.0	2.0	1.0	6
R06	3.0	3.0	3.0	1.0	9
R07	2.0	2.0	3.0	1.0	7
R08	2.0	1.0	1.0	2.0	8
R09	1.0	1.0	1.0	1.0	3
R10	1.0	1.0	1.0	3.0	9
R11	3.0	2.0	1.0	1.0	6
R12	1.0	1.0	1.0	1.0	3
R13	2.0	2.0	1.0	2.0	10
R14	1.0	2.0	1.0	2.0	8
R15	3.0	3.0	3.0	1.0	9
R16	1.0	1.0	1.0	1.0	3
R17	2.0	2.0	2.0	1.0	6
R18	3.0	3.0	1.0	3.0	21
R19	3.0	3.0	1.0	3.0	21
R20	3.0	3.0	2.0	4.0	32
R21	2.0	2.0	2.0	1.0	6
R22	2.0	2.0	1.0	1.0	5

Cuadro 8: Tabla de valor de riesgo

La tabla 8 es donde obtenemos la prioridad de cada riesgo podemos verlo como: $(niveldeimportancia + niveldeduración + niveldecosto) * niveldeprobabilidad$, podemos que ver la probabilidad juega un gran papel en parte, aunque hayan riesgos que pueden ser críticos en un impacto si son muy poco probables el intentar seguirles el paso puede verse en un gasto innecesario de recursos por un suceso que posiblemente no suceda.

6.3. Mitigación

Para la mitigación se creó una tabla donde se ordenan los riesgos según su prioridad comenzando por los de nivel 1 y se les proporciona una posible solución o mitigación, para los niveles 1,2 y 3 se planearon el impacto que se espera tener al implantar la solución para llevar un control de lo a donde se quiere llegar con la mitigación, por último con los de nivel 4 solo se planea una mitigación por su baja probabilidad.

Tabla mitigación por prioridad

Código	Prioridad	Mitigación	Impacto esperado
R20	1.0	-Se buscará expandir el presupuesto buscando nuevos inversionistas. -Buscar nuevas soluciones con menor precio.-Se negocia un aumento del monto inicial con los inversionistas. -Creación de un plan de negocios mejorado.	Continuación del proyecto. Descontento de inversionistas iniciales.
R01	2.0	-Se procede a llevar cursos presenciales o virtuales en páginas como coursera.	Mejorar la productividad. Se puede reutilizar en el futuro.
R18	2.0	-Se tendrán información de proveedores extra preparada de antemano.	Disminuye el tiempo de atrasos. Rápida reacción.
R19	2.0	-Pedir piezas con suficiente tiempo de anticipación. -Contactar a la compañía de transporte. -Tener contactos de otras transportistas para posible cambio de compañía principal.	Disminuye el tiempo de atrasos. Rápida reacción.
R02	2.0	-Se procede a llevar cursos presenciales o virtuales en páginas como coursera. -Si el sistema es suficientemente simple se puede llevar un curso de introducción sencillo en la misma empresa.	Mejorar la productividad. Se puede reutilizar en el futuro.
R13	3.0	-Se tendrán información de proveedores extra preparada de antemano. -Varios modos de comunicación con el proveedor. -En caso de una energía y si es posible se irá al local.	Disminuye el tiempo de atrasos. Rápida reacción.
R06	4.0	-Contactar con el involucrado para averiguar los detalles del tiempo que no estará. -Si es una condición médica se le asignará teletrabajo. -En el caso que sea necesario se preparan empleados que trabajan por contrato por el tiempo de indisposición.	
R15	4.0	Todo trabajo será procesado por un sistema legal antes de su venta o publicación. En el caso que se de una emergencia se seguirá trabajando hasta el punto que la ley lo permita. Se tendrá registrados contactos para asesores legales.	
R08	4.0	Se tendrán respaldos de actualizaciones anteriores. Se pedirá ayuda al líder técnico.	
R14	4.0	El trabajo será vigilado para el cumplimiento de las normas con los reportes que se harán. Se corregirán los trabajos según las normas establecidas.	
R07	4.0	Revisar la garantía y contactar con el proveedor. Se llevará un registro para poder saber los usos anteriores del componente. Última medida se reemplaza el componente.	

R04	4.0	Se hará un estudio intensivo para intentar encontrar lo que el cliente desea desde el inicio del proyecto. Se planea una reunión con el cliente y se establecerán los puntos principales con los que está insatisfecho. Se hará una reunión con el equipo y se plantea una nueva orientación para satisfacer al cliente reutilizando lo máximo posible lo que se posee.	
R05	4.0	Contactar a primeros auxilios. 911	
R11	4.0	Se tendrán varios modos para contactar al cliente. En caso de emergencia se procederá a ir hasta algún lugar previamente definido por el cliente como su lugar de trabajo.	
R17	4.0	Se contactará con el proveedor de este servicio para reparación o un nuevo modelo. Se llevará un registro del uso del sistema. Se tendrán contactos para nuevos proveedores de este servicio.	
R21	4.0	Revisar la garantía y contactar con el proveedor. Se llevará un registro para poder saber los usos anteriores del componente. Se reemplazará el componente.	
R22	4.0	Revisar la garantía y contactar con el proveedor. Se llevará un registro para poder saber los usos anteriores del componente. Se reemplazará el componente. Se revisará si hay en stock más de esos componentes.	
R03	4.0	Pedir ayuda al líder técnico. Re Instalar la herramienta. Tener backups de información y de versiones anteriores.	
R09	4.0	Se tendrá un sistema predefinido para poder mantener el orden, Se hará una reunión para establecer y explicar el sistema que se usará de hoy en adelante. Se hará una revisión de todos los documentos para poder ordenarlos según lo que establece del sistema.	
R12	4.0	Se usará alguna aplicación para poder organizar mejor al equipo de trabajo. Se explicará el uso de la aplicación.	
R16	4.0	Se buscará nueva clientela desde antes de la terminación del proyecto, haciendo una predicción para poder comenzar con el nuevo proyecto al terminar el anterior.	
R10	4.0	-Se procede a comunicarse con el departamento de financiero y se asigna a un encargado para traer los materiales.	

Cuadro 9: Tabla de mitigación

En la tabla 9 el único riesgo de grado 1, se analizó con el equipo de trabajo y el encargado de financiero y hardware crearon un plan para poder demostrar como bajo que circunstancias el proyecto es viable incluso propasando la inversión inicial, este plan nos puede ayudar a convencer a los inversionistas y poder continuar con el proyecto.

Existe una última parte de la gestión de riesgos, esta es la de vigilancia y retroalimentación, los riesgos pueden ir cambiando o evolucionando o incluso se pueden encontrar nuevos conforme el desarrollo del proyecto por esto es de crucial importancia siempre realizar una actualización para poder estar preparados.

7. Plan de negocios

7.1. Modelo de negocios

7.1.1. Análisis de Mercado

A lo largo de los últimos años ha existido una creciente demanda en el área de pequeños satélites y se prevé un crecimiento significativo durante la próxima década. Según SpaceWorks [71] en su pronóstico de nano y micro satélites del 2019, se estima que aproximadamente entre 2000 y 2800 pequeños satélites requerirán ser lanzados en los próximos 5 años a partir del 2019.

Aplicaciones científicas y tecnológicas tales como observación terrestre y telecomunicaciones hacen que el mercado de pequeños satélites se vuelva una tendencia entre las compañías interesadas en este sector. Además, en los últimos años se ha dado un incremento en la integración vertical de pequeños satélites, esto debido a que el costo promedio por cada unidad fabricada disminuye en constelaciones a partir de aproximadamente las 80 unidades.

Ya que nuestra empresa se dedica al desarrollo de subsistemas para pequeños satélites, se adoptaría la metodología de integración vertical, además, ya que se cuenta con Costa Rica Aerospace Cluster como un socio clave, esta metodología puede ser aplicada con empresas en el sector nacional.

7.1.2. Modelo de negocios de Orbital Guidance

A continuación, se presenta el modelo de negocios a seguir para un correcto desarrollo del proyecto, el mismo se alinea con la misión y visión de nuestra empresa y además establece la forma en la que la empresa generará ingresos, los posibles clientes y el mercado clave al cual se pretende alcanzar, todo esto acorde a las propuestas de valor que se establecen.

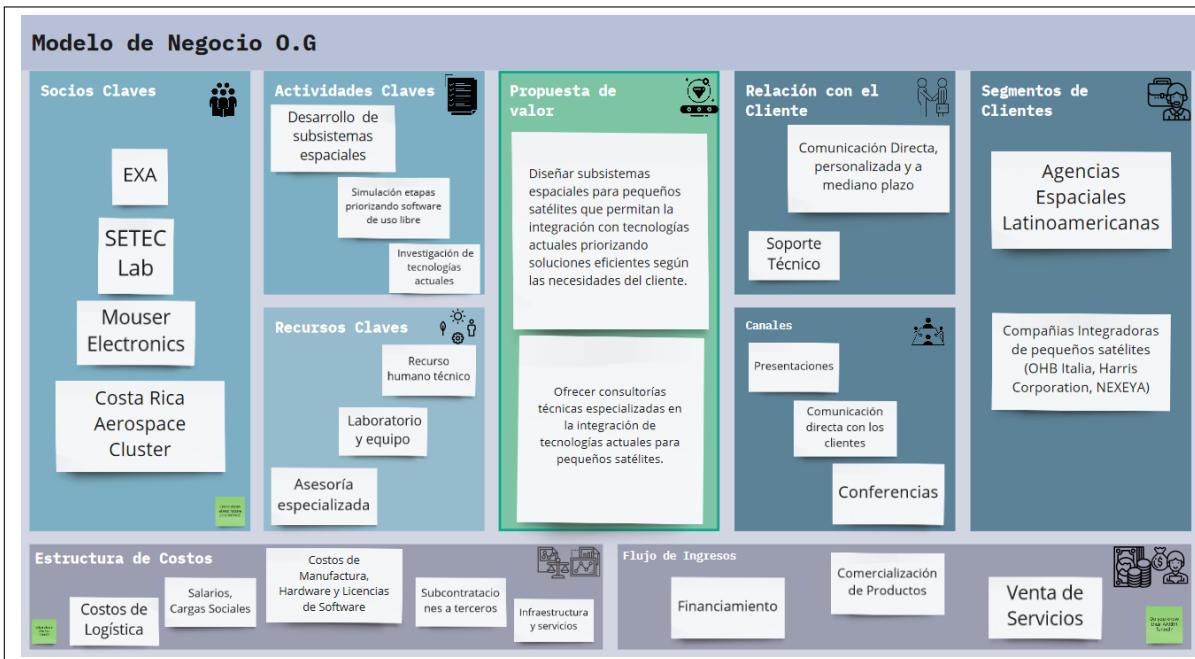


Figura 90: Modelo de negocios

7.2. Estrategia financiera

La estrategia financiera de acuerdo a [72] 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 mediano 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 [73] 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 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 es importante establecer los recursos con los que se cuenta o con los que posiblemente se buscará conseguir es por ello que se debe realizar un pequeño estudio de las formas en cómo una empresa puede lograr financiamiento, lo cual se muestra a continuación en el siguiente apartado.

7.3. 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 aportado por los 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 y como pagar los intereses del mismo.
- **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 sería posible a través de la **Agencia Espacial Costarricense**, dado a que dentro de sus objetivos, como indica [74], en el artículo 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 podría obtener 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 apoyo económico, 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 debe:
 - 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 se sugiere que O.G podría tener gran apoyo a largo plazo por parte de la agencia.

7.4. 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 [75], el 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 el lograr llevar a cabo el proceso de incubación con TEC Emprende Lab, máxime que actualmente este ente se ha convertido en agencia operadora de capital semilla, tal como ha indicado [76]. Esto implica que es posible lograr obtener fondos del SBD al realizar el proceso de incubación que comprende 3 etapas a como ha sugerido [76], 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 Emprende Lab realizar la validación del mismo y en caso de ser necesario, también para hacer los ajustes necesarios.
- **Incubación Beta:** OG 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 [77] 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 financiamiento no garantiza que se obtendrán, 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, por lo que de acuerdo al resultado, podría ser o no una opción viable.

7.5. 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 lograr el acceso a un capital 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 [77] indica que muchas solicitudes son rechazadas debido a diversos incumplimientos que se pueden observar en la figura 97,

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 91: Tabla de causa de rechazos más comunes.

Obtenido de [77].

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

7.6. Fuentes de ingreso

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

- Comercialización de productos especializados 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.

7.7. Estructura de Costos

Como indica [78], 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.

7.8. 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

7.9. Análisis financiero

De acuerdo con [78] esta es la etapa final de la estrategia financiera de negocios. Dentro las actividades de esta última etapa se buscará obtener herramientas que permitan 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 esto permita realizar un adecuado análisis de costos, para así lograr estimar las proyecciones financieras necesarias de acuerdo a como sugiere [78], mediante el balance general que se obtenga.

En la figura 92, se puede observar la estimación de costos para los dispositivos necesarios para llevar a cabo el proyecto.

De la figura 93 y 94 se pueden observar los cuadros para la estimación de ingresos para la empresa en periodos anuales, esto es de suma importancia ya que justifica las unidades necesarios que se deben vender para lograr tener una factibilidad, además esto debe estar asociado directamente con el estudio de mercado ya que no es correcto sobreestimar valores para lograr un balance justo en el flujo de caja, más bien todo ha de ser congruente con los valores del mercado.

Producto	Marca	Cantidad	Precio (\$)	Total (\$)
IMUs - Inertial Measurement Units	Adafruit	1	16,34	\$ 16,34
ESP32-S2-Saola-1R	Espressif Systems	1	8,75	\$ 8,75
Ruedas de reacción CubeWheel Small	CubeSpace	3	4516,67	\$ 13.550,00
		1	4700	\$ 4.700,00
Hot Swap Controller	Texas Instruments	3	2,4	\$ 7,20
Propulsor Orbital Thruster	Aurora Propulsion Technologies	1	14654	\$ 14.654,00
Convertidor RS485 a TTL	Maxim Integrated	1	3,1	\$ 3,10
Tornillos M2x0.4 de 4.5 mm de largo	Harwin	2	4,7	\$ 9,40
Tuercas hexagonales M2	Harwin	1	2,62	\$ 2,62
Placa de aluminio de 36,4mm x 17,5mm x 2mm	N/A	1	5	\$ 5,00
Conectores TFM-107-02-L-D-DS	Samtec	4	5,45	\$ 21,80
Coneector USB hembra	Amphenol Commercial Products	1	0,7	\$ 0,70
Resistencias	N/A	9	0,12	\$ 1,08
Capacitores	N/A	6	0,32	\$ 1,92
Pin headers de 4 pines	Wurth Elektronik	3	0,994	\$ 2,98
Impresion PCB	N/A	1	10	\$ 10,00
			TOTAL	\$ 32.994,89

Figura 92: Tabla Costo de Materiales

Cálculo de cantidad a vender anualmente	
Unidades mensuales de ADCS	1
Promedio de ventas	3
Ventas anuales	12
Precio Unitario	\$ 55.000,00
*Promedio de precio de venta colocado al punto de venta	

Figura 93: Estimación de ingreso basado en ventas

Año	1	2	3	4	5
Precio	\$ 55.000,00	\$ 55.000,00	\$ 55.000,00	\$ 55.000,00	\$ 55.000,00
Cantidad	12	12	12	12	12
Venta	\$ 660.000,00	\$ 660.000,00	\$ 660.000,00	\$ 660.000,00	\$ 660.000,00

Figura 94: Estimación de ingreso anual

Como se indicó inicialmente, el flujo de caja conlleva los cálculos de gastos de inversión y esto se puede observar en la figura 95.

Otro calculo de suma importancia es el de costos de operativos o de operación, ya que en conjunto con los costos de inversión dan un margen necesario de inversión necesario

Concepto	Monto
Tramitología de los permisos de funcionamiento	\$ 30,00
Costo de adecuación de la planta	\$ 30,00

Decreto No. 39472-S

Producto	Total (\$)
IMUs - Inertial Measurement Units	\$ 16,34
ESP32-S2-Solo-IR	\$ 8,75
Ruedas de resorción CubeWheel Small	\$ 18.250,00
Hot Swap Controller	\$ 7,20
Propulsor Orbital Thruster	\$ 14.654,00
Convertidor RS485 a TTL	\$ 3,10
Tornillos M2x0,4 de 4,5 mm de largo	\$ 9,40
Tuerca hexagonal M2	\$ 2,62
Placa de aluminio de 36,4mm x 17,5mm x 2mm	\$ 5,00
Conectores TFM-107-02-L-D-DS	\$ 21,80
Conector USB hembra	\$ 0,70
Resistencias	\$ 1,08
Capacitores	\$ 1,92
Pin headers de 4 pines	\$ 2,98
Impresión PCB	\$ 10,00
Envío Mouser Electronics	\$ 34,98
Total	\$ 33.029,87

Costos de Inversión inicial

Insumos	Unidades	Costo Unitario	Costo total
Computadora	1	\$ 1.200,00	\$ 1.200,00
Costo total			\$ 1.200,00

Costo de Logística	
Envío Mouser Electronics	N/A
Transporte	N/A
Total Costo Inv.	\$ 34.344,85

Figura 95: Costo de inversión inicial

Descripción	Costo total
Alquiler de local	\$ 450,00
Electricidad	\$ 80,00
Agua	\$ 16,00
Costo total	\$ 546,00

" Apegado Salario mínimo según Decreto Ley No.832 en CR

Puesto	Colaboradores	Costo mensual
Ingenieros Electronicos	10	\$ 9.783,70 **
Costo total		\$ 9.783,70

Costos de operación

Insumo	Unidad de medida	Costo un	Costo trimestral
Guantes	Cajas	2 \$ 57,25	\$ 114,50
Computadoras	Unidades	1 \$1.200,00	\$ 1.200,00
Multímetro	Unidades	2 \$ 475,24	\$ 950,48
Costo total			\$ 2.264,98

Total Costo Oper. **\$ 12.594,68**

Figura 96: Costo de Operación

para llevar a cabo el proyecto en su totalidad, este se puede observar en la tabla 96. A continuación se muestra los resultados del flujo de caja estimados, además para lograr validar los resultados obtenidos, se podrá observar un breve análisis de sensibilidad, que muestra 3 casos de aplicación de flujo de caja los cuales son los casos pesimista, optimista y real de ventas.

Como se puede observar finalmente en la figura 98, para el caso pesimista (donde anualmente se vende 6 dispositivos) se puede observar que el proyecto no es rentable bajo este escenario, puesto que el VAN y TIR se presentan en valores negativos, sin embargo, para un caso realista donde mínimo se vendiera una unidad mensualmente,

Flujo neto de efectivo	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Ingresos		660.000	660.000	660.000	660.000	660.000
- Costos variables		396.486	396.486	396.486	396.486	396.486
- Costos fijos		11.067	11.067	11.067	11.067	11.067
= Utilidad bruta		252.447	252.447	252.447	252.447	252.447
- Gastos		117.404	117.404	117.404	117.404	117.404
- Gastos no desembolsables (Depreciación)		1.609	1.609	1.609	1.609	1.609
- Gastos por intereses						
= Utilidad antes de Impuestos		133.433	133.433	133.433	133.433	133.433
- Impuesto de renta (20%)		26.687	26.687	26.687	26.687	26.687
Utilidad neta después de impuestos		106.747	106.747	106.747	106.747	106.747
+ Gastos no desembolsables (Depreciación)		1.609	1.609	1.609	1.609	1.609
- Incrementos adicionales en capital de trabajo	0					
+ Recuperación del capital de trabajo						
-Nueva inversión requerida	50.158					
+ Recuperación de la inversión						
- Amortización						
Flujos netos de Efectivo	-50.158	108.356	108.356	108.356	108.356	108.356

Figura 97: Flujo de Caja a mediano plazo

Información	Análisis de Sensibilidad		
	Pesimista	Optimista	Real
VAN	\$ (42.361,00)	\$ 1.375.651,00	\$ 241.241
TIR	-30,89%	1057,03%	215,34%
Ventas	6 ventas anuales	36 ventas anuales	12 ventas anuales

Figura 98: Análisis de Sensibilidad

este llega a ser apenas rentable, por lo que efectivamente es posible seguir con el proyecto pero se debería buscar una manera para obtener un mejor margen de ganancia para seguir con las actividades de la empresa. También se presenta un caso optimista, donde se puede observar que bajo dichas expectativas el proyecto es altamente rentable.

8. Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro

8.1. Conclusiones

A lo largo del desarrollo del proyecto Clarity, el equipo ha trabajado en diferentes tareas de diferentes naturalezas. La mera distribución de las etapas de conformación del equipo, exploración del espacio de diseño y diseño detallado muestra la variedad de los esfuerzos que el equipo ha realizado.

El objetivo de la primera etapa del proyecto fue la conformación de un equipo, su definición en términos de misión, visión, objetivos y metas, así como la definición de los roles y responsabilidades de los integrantes, sin dejar de tomar en cuenta la definición del problema que atañe al proyecto. Orbital Guidance es el producto de las actividades de definición del equipo que se desarrollaron al inicio del proyecto, siendo expuestas la conformación técnica y administrativa, la guía filosófica (en términos de misión, visión, objetivos y metas) del equipo y el planeamiento del trabajo a realizar. En esta etapa, presentada en el primer capítulo de este documento, se exploró y definió el problema que existe en el ámbito del control de orientación y órbita de nanosatélites, determinando la existencia de un nicho de mercado creciente que apunta a la tercerización del desarrollo de subsistemas, lo cual terminó de definir el lugar donde Orbital Guidance se ubicaría: En el desarrollo de subsistemas especializados para nanosatélites de misiones espaciales avanzadas. Un aspecto importante en el desarrollo de la primera etapa fue la identificación de los involucrados en el proyecto, lo cual determinó los ejes de integración, desarrollo de software, financiamiento, regulaciones y operación de misiones, los cuales fueron la base en el desarrollo de la segunda y tercera etapa del proyecto.

La visión general del proyecto, presentada en el segundo capítulo de este documento, expone las tareas realizadas en la etapa de exploración del espacio de diseño, cuyo objetivo es la definición de los alcances del proyecto y la definición funcional y física del sistema a diseñar. En esta sección se definieron los alcances del proyecto mediante la realización de un *scoping exercise*, el cual se utilizó para exponer la necesidad existente en el ámbito del control de orientación y órbita de nanosatélites, las metas de OG con respecto a dicho ámbito, los objetivos planteados para el desarrollo del proyecto, las restricciones planteadas para este y los supuestos que se tomaron.

Una vez que se definió lo anterior, se procedió a diseñar el concepto de operaciones del sistema Clarity, el cual permitió la definición y determinación de la correspondencia entre los modos de operación del sistema y de los satélites en los cuales se integrará. Para mejorar la definición de dichos modos se realizaron diagramas de casos de uso y diagramas de secuencias mediante SysML, los cuales exponen las funciones que se deben ejecutar según cada caso de uso que el operador especifique, exponiendo así la definición funcional de Clarity.

Para la definición de las arquitecturas del sistema se procedió a realizar un árbol de problemas y subproblemas, con el que se definieron las áreas en las que se debían tomar decisiones de diseño. El proceso de selección de soluciones se realizó mediante matrices de Pugh, las cuales permitieron converger a resultados óptimos de manera objetiva. Las soluciones seleccionadas fueron mapeadas a funciones, lo cual se expone mediante el uso

de diagramas de arquitectura física de hardware y de software en el lenguaje SysML, definiendo así la composición física de Clarity.

Dentro del marco de la definición de alcances y objetivos del proyecto, cabe destacar que se cumplieron tres de cuatro de los objetivos presentados en el *scoping exercise* de la figura 11: El establecimiento de arquitecturas funcionales a nivel de sistema y hardware, el diseño de la arquitectura física del sistema de tal manera que esta permita a los actores la implementación del sistema en satélites basados en KRATOS y el diseño de una la arquitectura de software que provea a los desarrolladores de software a bordo de los satélites de las capacidades de integración de las funciones de Clarity en su sistema. El objetivo que no se cumplió fue el de especificar una estrategia de negocios que permitiera la venta del sistema por 30 mil dólares americanos.

La tercera etapa del proyecto constituye el eje central de este documento y es en el cual se determina el diseño de hardware (planos eléctricos, diseño de PCB e integración mecánica) y el diseño de software (diagramas de flujo y de secuencias), haciendo énfasis en uno de los objetivos de alto nivel del proyecto, el cual es el uso de componentes OTS (off the shelf). La selección de los componentes que comprenden al sistema Clarity se realizó en la segunda etapa, por lo que en el tercer capítulo de este documento se expone la relación de estos componentes a las funciones definidas en la arquitectura con el fin de dar trazabilidad a los requerimientos y funciones planteadas. Dicha selección es la base de la exposición de los componentes comerciales realizada en el tercer capítulo, la cual converge finalmente en el diagrama eléctrico diseñado para el sistema, en el cual se integran componentes de potencia, procesamiento, sensado y actuación, con lo cual se expone el diseño de hardware realizado.

El diseño de software es presentado mediante el uso de diferentes diagramas, con los cuales se expone el funcionamiento de algoritmos de estimación, control, comunicación y procesamiento general de datos y comandos. El comportamiento general del software se resume mediante un diagrama de estados, en el cual se detallan aspectos provenientes del C&DH y aspectos ejecutados dentro de Clarity. El diseño e implementación de estos algoritmos mediante los diagramas mencionados constituye la definición del diseño de software de Clarity.

Para realizar la integración del sistema, esto es, la conexión ciberfísica de Clarity, se ejecutaron tareas en dos ejes: Integración eléctrica/lógica e integración eléctrica/física. La integración eléctrica/lógica se implementó mediante un circuito impreso, el cual contempla el esquema de integración planteado en la figura 58 e incluye orificios pensados para el anclaje con la pila de PCBs del satélite en el que vaya a ser utilizado. La integración eléctrica/física se expuso mediante renders 3D, en los cuales se presentan los cableados y anclajes necesarios para la sujeción del sistema. Con estos dos productos se expone la integración del sistema Clarity.

En el cuarto capítulo del documento se expone el análisis del diseño, en el cual se presentan los resultados de la estrategia de la verificación de requerimientos y simulaciones realizadas para presentar la dinámica y el desempeño del sistema. Con respecto a la verificación del cumplimiento de los requerimientos, se realizó un desglose de la estrategia de verificación, detallando aspectos operativos de las tareas a realizar y los ámbitos a cubrir. De este proceso se determinó que el nivel de cumplimiento de los

requerimientos es satisfactorio, con un 89.3 % de requerimientos cumplidos, 9.2 % de requerimientos por cumplir (esto es, que las pruebas se pueden realizar hasta un nivel posterior de desarrollo del sistema) y únicamente un 1.5 % de requerimientos que no se cumplen, los cuales corresponden a dos requerimientos relacionados al desempeño del subsistema de control de órbita.

El ámbito del análisis del diseño también se presentaron simulaciones con el fin de exponer la dinámica del sistema con y sin el control implementado mediante el sistema Clarity. De estas simulaciones se obtuvieron resultados importantes, como la determinación de la necesidad de la definición de un límite del nivel de torque necesario, el cual, si es superado, constituiría una anomalía de las contempladas en el diseño de software del sistema. Un detalle importante es destacar que el algoritmo seleccionado para el control de orientación fue implementado satisfactoriamente debido al tiempo con el que se contó y a la complejidad del mismo. La solución para la simulación de la dinámica del control preciso de giro fue implementar un algoritmo de control de Euler modificado para que asemejara la configuración y acción del algoritmo AMM seleccionado. Con estas acciones se analizó el diseño del sistema Clarity.

En el quinto capítulo del presente documento se expone la estrategia de sostenibilidad y de implementación de regulaciones. Los objetivos de esta sección son el dar a conocer la manera en la que Orbital Guidance atenderá aspectos en materia social y ambiental, así como el estado de implementación de regulaciones y normas. Primeramente, en el ámbito social, se estableció (tomando en cuenta la estrategia de negocios del equipo) que se realizará un programa de información y comunicación que incluirá actividades de divulgación técnica y de concientización, con el fin de apoyar al crecimiento de América Latina en el ámbito espacial. Segundo, en el ámbito ambiental se tomaron dos ejes de trabajo: El sistema en órbita y el sistema en Tierra, para lo que se determinaron acciones a seguir para concientizar a los operadores de misiones en el ciclo de vida de las misiones espaciales y también acciones para el manejo de residuos electrónicos dentro del marco de las regulaciones costarricenses.

Con respecto al cumplimiento de las regulaciones, se expone en el quinto capítulo la manera en la que se implementó cada una de las normas seleccionadas para el desarrollo de las etapas de diseño del proyecto. Esto y el párrafo anterior muestran el cumplimiento de los objetivos del quinto capítulo del documento.

La gestión de riesgos se presenta en el sexto capítulo, en el cual se pretenden exponer los riesgos identificados para el proyecto, el planteamiento de soluciones y el estado actual de dicho riesgo dentro del marco de la implementación del PMBoK. Los objetivos anteriormente descritos son desarrollados en el capítulo mencionado, en el cual se determinó que el riesgo más alto fue el de sobrepasar el precio de venta estipulado en los requerimientos de alto nivel del proyecto.

En el séptimo capítulo se expone lo referente al plan de negocios de Orbital Guidance, exponiendo el análisis de mercado, el modelo de negocios de la empresa OG, la estrategia financiera y el análisis financiero, con el objetivo principal de determinar la viabilidad económica del proyecto. Los aspectos mencionados anteriormente fueron desarrollados de manera satisfactoria y se concluyó que el proyecto sería viable bajo un escenario optimista y que bajo un escenario más realista sería mejor implementar una estrategia

que permita subir la cantidad de ventas.

8.2. Recomendaciones y trabajo futuro

A manera de recomendación para trabajo futuro con respecto a la primera etapa del proyecto, se deben mantener actualizados los diagramas de Gantt una vez se definan plazos de entregas de avances por parte de los interesados en el proyecto, esto para dar aún mejor trazabilidad al trabajo de cada uno de los roles. Otro aspecto importante es que en esta etapa no se deben enfocar esfuerzos en investigación técnica acerca de componentes específicos a modo de tener definidas posibles opciones comerciales, el equipo tomó este rumbo y fue trabajo extra que debió ser enfocado en aspectos administrativos.

Con el fin de obtener un diseño menos costoso y más hermético en términos de integración, se recomienda diseñar e implementar actuadores propios que logren cumplir con los requerimientos establecidos sin comprometer el precio final de venta. Si bien esto no calificaría como un diseño integrado 100 % OTS, permitiría cumplir más requerimientos en una segunda iteración del diseño. En la integración del sistema bajo el diseño actual, se recomienda utilizar varias estructuras de CubeSat para verificar las capacidades y necesidades de integración con el fin de establecer estrategias que aumenten la compatibilidad.

Para el diseño de software se recomienda diseñar una estrategia que permita el aprovechamiento de las capacidades de hardware y software que provee el ESP32, en los ámbitos de paralelización y ejecución en tiempo real (calendarización) de tareas.

Para las acciones en el ámbito de simulación, se recomienda implementar el algoritmo de control AMM para simular de manera correcta la dinámica bajo el modo de operación de apuntado preciso, para así determinar correctamente el rendimiento en términos de precisión de apuntado. Otra acción que se recomienda realizar es el diseño de experimentos que validen el rendimiento del sistema, ya sea mediante simulación o pruebas.

Un aspecto importante en todas las acciones futuras a esta etapa del proyecto es utilizar las normas seleccionadas. Algunas de las normas no fueron utilizadas dado que las tareas a realizar en las etapas en las que se trabajaron no les atañían.

Finalmente, es importante darle énfasis al escenario realista planteado en la sección de análisis financiero, ya que este es el más probable. Bajo esta óptica, es necesario que en una etapa posterior se diseñe una estrategia de marketing competitivo que permita penetrar en el mercado de los sistemas de control de orientación y órbita para nanosatélites. Otra acción que se puede realizar para mejorar el margen que se obtiene en dicho escenario es el establecimiento de alianzas con otros entes que puedan proveer de facilidades para la implementación y comercialización de Clarity.

9. Anexo A: Tablas de casos de uso

Caso de uso #1	Modo de espera
Actores	C&DH, Comms, Operador
Descripción	El C&DH 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 C&DH 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	<ol style="list-style-type: none"> 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 C&DH le indica al AOCS cuando salir de este modo

Caso de uso #2	Modo de reducción de velocidad de giro
Actores	C&DH
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 C&DH 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	C&DH
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 órbita * 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 órbita, 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	C&DH, 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	C&DH, 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 C&DH 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	C&DH, 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 C&DH 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	C&DH, 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	C&DH, 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	<ul style="list-style-type: none"> * Generar reporte * Control para fin de vida
Extiende	No tiene
Generalización	no tiene
Flujo de evento	<ol style="list-style-type: none"> 1. El C&DH 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.

10. Anexo B: Matrices de Pugh

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

Criterio	Peso	Ref: EKF	SVD	FOAM	TRIAD	ESOQ-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 11: Matriz de Pugh para la selección del algoritmo para la estimación de la orientación.

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

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

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 14: Matriz de Pugh para la selección del sensor para la determinación 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 15: Matriz de Pugh para la selección del algoritmo para la reducción de 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 16: Matriz de Pugh para la selección del actuador para control de velocidad de giro.

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

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 18: Matriz de Pugh para la selección del sensor para la estimación de 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 19: Matriz de Pugh para la selección del algoritmo para la estimación de órbita.

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

Cuadro 20: Matriz de Pugh para la selección del algoritmo para el control de órbita.

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

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

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
Commutación	3	1	-1	-1	1
Total	16	8	-1	5	0

Cuadro 23: Matriz de Pugh para la selección de la interfaz eléctrica.

11. Anexo C: 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 AOCS mediante el protocolo USB. El AOCS 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 C&DH ICEPS de EXA para implementar correctamente la comunicación entre el mismo y el AOCS 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

- AOCS: Attitude and Orbital Determination and Control Subsystem (Subsistema de control y determinación de orientación y órbita).
- C&DH: Command and Data Handling(Computadora a bordo de ICEPS).
- 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 C&DH

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

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 enviar 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 enviar 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 subprocesso 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 C&DH 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 C&DH

[SyRS-81] La interfaz con C&DH 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 C&DH.

2.5.1.2 Envío de telemetría

[SyRS-116] El sistema deberá poder enviar paquetes de telemetría al C&DH.

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 telemando.

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 [3].

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 AOCS 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.

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 C&DH.

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 C&DH.

2.10.3 Anomalías

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

2.11 Policy and regulation requirements

Type: Section

2.11.1 Dimensiones 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 con 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

12. Anexo D: 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 C&DH 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 C&DH, 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 C&DH por protocolo USB.
- Alimentación eléctrica con EPS (*Electrical Power Subsystem*).

Type: Section

1.3.4 Software interfaces

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

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 telemandos

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

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 AOCS 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 AOCS 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 enviará 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 C&DH

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 C&DH 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 C&DH 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 telemundos 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 C&DH.
- 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 C&DH.
- 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]

- AOCS: Attitude and orbital determination and control subsystem.
- ADC: Analog to Digital Converter.
- C&DH: 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 C&DH.

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 telecomandos por medio del Bus KRATOS C&DH.

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 retroalimentacion 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 C&DH.

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 C&DH 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 C&DH 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 órdenes 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-C&DH-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_AOCS + SOA.pdf
- Pieter Johannes Botma. The Design and Development of an AOCS C&DH 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 ShehabBA 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

13. Anexo E: Matrices de verificación

Matriz de Verificación de Rendimiento					
ID	Requerimiento	Método	Estado	Observaciones	Fuente
SyRS-76	Precisión en el Control de Orientación	A	PC	Simular que el sistema logra una precisión de apuntado menor a 1°	Simulaciones
SyRS-89	Periodo de Estabilización	A	C	Simular la reducción de la rotación inicial en un tiempo máximo de dos órbitas de un valor de 35 [°/s] hasta 0 [°/s].	Simulaciones
SyRS-90	Delta-V	I	NC	Verificar que el propulsor seleccionado pueda proveer un delta-V máximo de 250 m/s	BOM
SyRS-91	Vida Útil Mínima	D	PC	Someter al sistema a una prueba de estrés para comprobar la vida útil operacional mínima de 2 años	Prueba sobre sistema implementado
SyRS-92	Tasa de Utilización	A	NC	Verificar que los componentes seleccionados logren realizar dos maniobras de mantenimiento de órbita y una maniobra de deorbitaje	BOM
SyRS-114	Vida Útil del Sistema	D	PC	Someter al sistema a una prueba de estrés para comprobar la vida útil del sistema de 6 años	Prueba sobre sistema implementado
SRS-105	Autónomo	A	C	Verificar que el sistema puede operar correctamente sin recibir telecomandos	Diagramas de flujo
SRS-129	Calidad del Software	A	PC	Verificar que los diagramas de flujo tengan una estructura eficiente y funcional	Diagramas de flujo
SRS-130	Evaluación de Software	A	PC	Verificar que cada etapa de los diagramas de flujo tengan una estructura eficiente y funcional	Diagramas de flujo
SRS-131	Procesos de Medición	A	PC	Verificar que las mediciones de los sensores sean procesadas en los diagramas de flujo	Diagramas de flujo
SRS-132	Calidad de Datos	A	PC	Verificar que los datos utilizados por el software sean congruentes con los rangos esperados por medio de una rutina de verificación en los diagramas de flujo	Diagramas de flujo
SRS-156	Ciclo de Vida del Software	A	PC	Verificar que los diagramas de flujo tengan una estructura eficiente y funcional	Diagramas de flujo
SRS-141	Optimización	A	C	Verificar que los algoritmos seleccionados sean los más óptimos para el sistema	Matriz de Pugh
SRS-142	Uso en Vida Útil	D	PC	Verificar que después de las pruebas de estrés el sistema aún pueda ejecutar las funciones definidas en su diseño	Prueba sobre sistema implementado

Figura 99: Matriz de verificación de rendimiento.

Matriz de Condiciones Ambientales					
ID	Requerimiento	Método	Estado	Observaciones	Fuentes
SyRS-115	Altitud	A	C	Verificar que se haya definido el rango de altitud a la que opera el sistema	Casos de uso
SyRS-70	Densidad Atmosférica	A	C	Verificar que se haya definido el rango de densidad atmosférica a la que opera el sistema	Casos de uso
SyRS-71	Radiación	I	C	Verificar que el sistema podrá operar en el entorno de partículas alfa y beta, rayos gamma y X, y neutrones-L atenuados por el escudo de KRATOS	Brochure de KRATOS
SyRS-72	Temperatura	I	C	Verificar que el sistema podrá operar a temperaturas entre 10 y 20 grados Celsius	Brochure de KRATOS
SyRS-74	Reentrada a la Atmósfera	A	C	Verificar que los componentes seleccionados sean de materiales que se quemen completamente una vez reentren a la atmósfera	BOM

Figura 100: Matriz de verificación de condiciones ambientales.

Matriz de Políticas y Regulación					
ID	Requerimiento	Método	Estado	Observaciones	Fuentes
SyRS-106	Pirotécnicos	I	C	Verificar que los componentes seleccionados no contengan elementos pirotécnicos	BOM
SyRS-109	Mitigación de Generación de Basura Espacial	A	C	Verificar que al menos un actuador de los seleccionados pueda ejecutar la maniobra de reentrada a la atmósfera	BOM
SyRS-117	Dimensiones de CubeSat	I	C	Verificar que las dimensiones de subsistema sean de una unidad de CubeSat	Render en 3D
SyRS-118	Restricciones de Importación	A	C	Verificar que el servicio de transporte seleccionado no tenga restricciones a la hora de importar los productos	Servicio de transporte
SyRS-119	Materiales y Procesos	A	C	Verificar el cumplimiento del estándar ECSS-Q-70-71A	BOM
SyRS-120	Mitigación de Desechos Espaciales	A	C	Verificar que el sistema cuente con un plan de gestión ambiental que cumpla con las directrices para la reducción de desechos espaciales de la UNOOSA	Gestión ambiental
SyRS-121	Requerimientos y Verificación	A	C	Verificar que la estructura de los requerimientos y el método para la matriz de verificación cumplen con el estándar ISO/IEC/IEEE 29148-2018	Requerimientos y Matriz de verificación
SyRS-122	Planos y Diagramas	A	C	Corroborar que se cuente con la documentación necesaria para su integración	Render en 3D, IBD y PCB
SyRS-123	Simbología Eléctrica	A	C	Verificar que la simbología utilizada en los planos eléctricos cumplan con la norma IEEE 315-1975	Esquemáticos y diagramas eléctricos
SyRS-154	Diseño de Circuitos Impresos	A	C	Verificar que el diseño del PCB cumplen con las normas IPC	PCB
SRS-128	Open Source	A	C	Verificar que solo se utilice software de acceso libre	Diagramas de flujo de software
SRS-144	Licencias	A	C	Verificar que el software se pueda licenciar para que los clientes puedan hacer modificaciones	Diagramas de flujo de software
SRS-155	Lenguaje de Modelado	I	C	Verificar que los diagramas cumplan con el estándar ISO/IEC 19514:2017	IBD, BDD, N2 Chart

Figura 101: Matriz de verificación de políticas y regulaciones.

Matriz de Verificación de Planos y Documentación					
ID	Requerimiento	Método	Estado	Observaciones	Fuente
SyRS-113	Provisión de Planos y Documentación	A	C	Verificar que se hayan elaborado los planos y documentación necesarios para la correcta implementación del sistema	IBD, Renders en 3D, PCB
SyRS-66	Integración con el Sistema Satélite	A	C	Verificar que se hayan elaborado la documentación para la correcta integración del sistema en un CubeSat que utilice el bus KRATOS	Reporte final

Figura 102: Matriz de verificación de planos y documentación.

Matriz de Empaqueado, Manejo, Envío y Transporte					
ID	Requerimiento	Método	Estado	Observaciones	Fuentes
SyRS-112	Logística	A	C	Verificar que el servicio de transporte tenga la capacidad de exportar el sistema a personería física y jurídica	Servicio de transporte
SyRS-30	Empaqueado, Manejo, Envío y Transporte	I	C	Verificar que a la hora de hacer envíos no se sobrepase de las 500 unidades por paquete	Servicio de transporte

Figura 103: Matriz de verificación de empaquetado, manejo, envío y transporte.

Matriz de Verificación de Software					
ID	Requerimiento	Método	Estado	Observaciones	Fuente
SyRS-58	Reinicio de Software	I	C	Corroborar que el reinicio de software esté contemplado en el diagrama de flujo	Diagramas de flujo
SyRS-44	Standby	I	C	Corroborar que el modo standby esté contemplado en el diagrama de flujo	Diagramas de flujo
SyRS-43	Reducción de Velocidad de Giro	I	C	Corroborar que la plataforma KRATOS cuente con un modo de reducción de velocidad de giro al que se pueda acceder	Brochure de KRATOS
SyRS-42	Adquisición de Orientación Inicial	I	C	Verificar que en los diagramas de flujo se establece una posición inicial del satélite	Diagramas de flujo
SyRS-41	Modo de Apuntado Preciso	I	C	Corroborar que el modo de apuntado preciso esté contemplado en el diagrama de flujo	Diagramas de flujo
SyRS-40	Modo de Giro por Comando	I	C	Corroborar que el modo de giro por comando esté contemplado en el diagrama de flujo	Diagramas de flujo
SyRS-38	Modo de Control de Órbita	I	C	Corroborar que el modo de control de órbita esté contemplado en el diagrama de flujo	Diagramas de flujo
SyRS-37	Modo Seguro	I	C	Corroborar que el modo seguro esté contemplado en el diagrama de flujo	Diagramas de flujo
SyRS-98	Detección de Anomalías (Actuadores)	I	C	Verificar que en los diagramas de flujo se identifiquen anomalías en los actuadores	Diagramas de flujo
SRS-125	Formato Entrada	I	C	Verificar que el formato de entrada sea digital	IBD
SRS-126	Formato Salida	I	C	Verificar que el formato de salida sea digital	IBD
SRS-81	Reportes de Estado	I	C	Verificar que los diagramas de flujo cuenten con un comando para enviar informes de errores y estados al C&DH	Diagramas de flujo
SRS-92	Apuntado Preciso	I	C	Verificar que los diagramas de flujo cuenten con un algoritmo para el control de apuntado preciso	Diagramas de flujo
SRS-93	Control de Órbita	I	C	Verificar que los diagramas de flujo cuenten con un algoritmo para el control de órbita	Diagramas de flujo
SRS-91	Control de Giro por Comando	I	C	Verificar que los diagramas de flujo cuenten con un algoritmo para el control de giro por comando	Diagramas de flujo
SRS-94	End of Life	I	C	Verificar que los diagramas de flujo cuenten con un algoritmo para el end of life del sistema	Diagramas de flujo
SRS-95	Selección de Datos	I	C	Verificar que los diagramas de flujo cuenten con un algoritmo para la selección de datos de los sensores	Diagramas de flujo
SRS-96	Velocidad Angular	I	C	Verificar que los diagramas de flujo cuenten con un algoritmo para reducir la velocidad angular	Diagramas de flujo
SRS-97	Modo Seguro	I	C	Verificar que los diagramas de flujo cuenten con un algoritmo de modo seguro	Diagramas de flujo
SRS-136	Detección de Errores	I	C	Verificar que los diagramas de flujo cuenten con un algoritmo para la detección de errores	Diagramas de flujo
SRS-137	Detección de Anomalías	I	C	Verificar que los diagramas de flujo cuenten con un algoritmo para la detección de anomalías en los datos de entrada	Diagramas de flujo
SRS-122	Relación-Telecomandos	I	C	Verificar que en los diagramas de flujo se reflejan los diferentes modos de uso a los que puede referirse un telemando	Diagramas de flujo
SRS-123	Relación-Anomalías	I	C	Verificar que en los diagramas de flujo se identifiquen anomalías	Diagramas de flujo
SRS-124	Relación-Control de Giro	I	C	Verificar que en los diagramas de flujo se adquieran los datos a partir de los sensores para posteriormente estabilizar la velocidad de giro según estos valores	Diagramas de flujo
SRS-106	Anomalías	I	C	Verificar que en los diagramas de flujo se identifiquen anomalías	Diagramas de flujo
SRS-154	No Linealidad	I	C	Verificar que los algoritmos sean capaces de trabajar con sistemas no lineales	Matriz de Pugh
SRS-110	Telemetría	P	PC	Correr el software para verificar que la recopilación de la telemetría se de en menos de 60 segundos para su posterior procesamiento, con un margen de error no mayor al 5% del total de los datos medidos	Software
SRS-111	Ejecución de Maniobras	A	C	Simular la ejecución de las maniobras de estabilización y control de órbita para poder verificar que se realicen estas acciones en un rango de 2000 a 4000 segundos	Simulaciones
SRS-112	Detección y Recuperación	I	C	Verificar que en los diagramas de flujo se active un protocolo de verificación y recuperación cada vez que se detecte una anomalía	Diagramas de flujo
SRS-115	Linux IIOS	I	C	Verificar que las soluciones seleccionadas sean compatibles con Linux IIOS y sus librerías	Matrices de Pugh
SRS-117	Control de Errores	I	C	Verificar en los diagramas de flujo se realice un control de los errores	Diagramas de flujo
SRS-157	Diagramas de Flujo	A	C	Verificar que los diagramas de flujo contemplen todos los posibles casos de operación del sistema	Diagramas de flujo
SRS-120	Portabilidad	P	PC	Verificar que el lenguaje del software desarrollado permita que este sea transferido de un ambiente de desarrollo a otro	Software

Figura 104: Matriz de verificación de software.

Matriz de Estructura					
ID	Requerimiento	Método	Estado	Observaciones	Fuente
SyRS-81	Interfaz con C&DH	I	C	Comprobar que la comunicación con el C&DH se realice mediante USB	Renders en 3D
SyRS-82	Interfaz con EPS	A	C	Comprobar que la alimentación de cada componente utilice el bus de potencia que cada uno requiere específicamente	PCB
SyRS-99	Compatibilidad con el Bus KRATOS	A	C	Comprobar la compatibilidad con el bus de KRATOS mediante el uso del protocolo USB	PCB
SyRS-105	Compatibilidad Estructural	A	C	Comprobar la compatibilidad del sistema con la estructura de una plataforma CubeSat	Renders en 3D
SyRS-100	Volumen	I	C	Verificar que las dimensiones físicas no excedan una unidad de CubeSat	Renders en 3D
SyRS-101	Masa	A	C	Verificar que el peso del sistema no exceda los 1.3kg	BOM
SyRS-102	Integración Estructural	A	C	Verificar la integración física del sistema con la estructura de una plataforma CubeSat	Renders en 3D
SyRS-108	Interferencia de Partes Móviles	I	C	Verificar que las partes móviles del sistema no interfieran con los demás subsistemas del satélite	Renders en 3D
SRS-127	USB 2.0	I	C	Comprobar que la comunicación con el C&DH se realice mediante USB	Renders en 3D

Figura 105: Matriz de verificación de estructura.

Matriz de Comunicación					
ID	Requerimiento	Método	Estado	Observaciones	Fuente
SyRS-47	Telemetría	I	C	Verificar que en los diagramas de flujo se generen paquetes de telemetría	Diagramas de flujo
SyRS-48	Comunicación con C&DH	I	C	Verificar que existe una conexión con el C&DH	Diagramas de flujo
SyRS-132	Notificación de Anomalías	I	C	Verificar que se envía reporte de anomalía	Diagramas de flujo
SyRS-67	Teleoperación	I	C	Verificar que en los diagramas de flujo se envíen telecomandos	Diagramas de flujo
SyRS-94	Recepción de Telecomandos	I	C	Verificar que en los diagramas de flujo se reciben telecomandos	Diagramas de flujo
SyRS-116	Envío de Telemetría	I	C	Verificar que en los diagramas de flujo se generen paquetes de telemetría y se envíen al C&DH	Diagramas de flujo
SyRS-107	Detección de Anomalías	I	C	Verificar que se envía reporte de anomalía	Diagramas de flujo
SyRS-103	Telemetría	I	C	Verificar que en los diagramas de flujo se generen paquetes de telemetría con datos actualizados	Diagramas de flujo
SyRS-104	Comandos	I	C	Verificar que en los diagramas de flujo se reciben comandos del C&DH	Diagramas de flujo
SyRS-110	Anomalías	I	C	Verificar que se envía reporte de anomalía al C&DH	Diagramas de flujo
SyRS-152	Protocolo de Comunicación	I	C	Verificar que se hace uso de protocolos comunes de comunicación (I2C, UART)	IBD
SRS-77	Telecomando	I	C	Verificar que en los diagramas de flujo se reciben telecomandos	Diagramas de flujo
SRS-83	Telecomandos	I	C	Verificar que en los diagramas de flujo se reciben telecomandos	Diagramas de flujo
SRS-86	Comando de Control Automático de Velocidad de Giro	I	C	Verificar que en los diagramas de flujo se reciben comandos para el control de la velocidad de giro	Diagramas de flujo
SRS-103	Informe de Error	I	C	Verificar que se envía reporte de anomalía	Diagramas de flujo
SRS-107	Telecomandos	I	C	Verificar que en los diagramas de flujo se reciben telecomandos	Diagramas de flujo
SRS-109	Envío de Datos	I	C	Verificar que se envíen datos procesados al C&DH	Diagramas de flujo
SRS-114	Creación de Informes	I	C	Verificar que se almacenan datos para la generación de informes	Diagramas de flujo
SRS-140	Comunicación Constante	I	C	Verificar que existe una conexión constante con el C&DH	Diagramas de flujo
SRS-146	Operaciones de Usuario	I	C	Verificar que en los diagramas de flujo se envían y se reciben telecomandos	Diagramas de flujo

Figura 106: Matriz de verificación de comunicación.

Matriz de Verificación de Sensores					
ID	Requerimiento	Método	Estado	Observaciones	Fuente
SyRS-49	Sensado	I	C	Verificar que en los diagramas de flujo se obtengan datos a través de la sensórica	Diagramas de flujo
SyRS-150	Commutación de Sensores	A	C	Verificar que las conexiones de los sensores permiten la commutación entre encendido y apagado	IBD, PCB
SyRS-85	Acondicionamiento de la Señal (Sensórica)	I	C	Verificar que se amplifican y digitalizan las señales medidas por los sensores	IBD
SRS-78	Datos Obtenidos de los Sensores	I	C	Verificar que en los diagramas de flujo se obtengan datos a través de la sensórica	Diagramas de flujo
SRS-84	Datos Espaciales	A	C	Verificar que se obtengan los datos digitalizados de los sensores	IBD, PCB

Figura 107: Matriz de verificación de sensores.

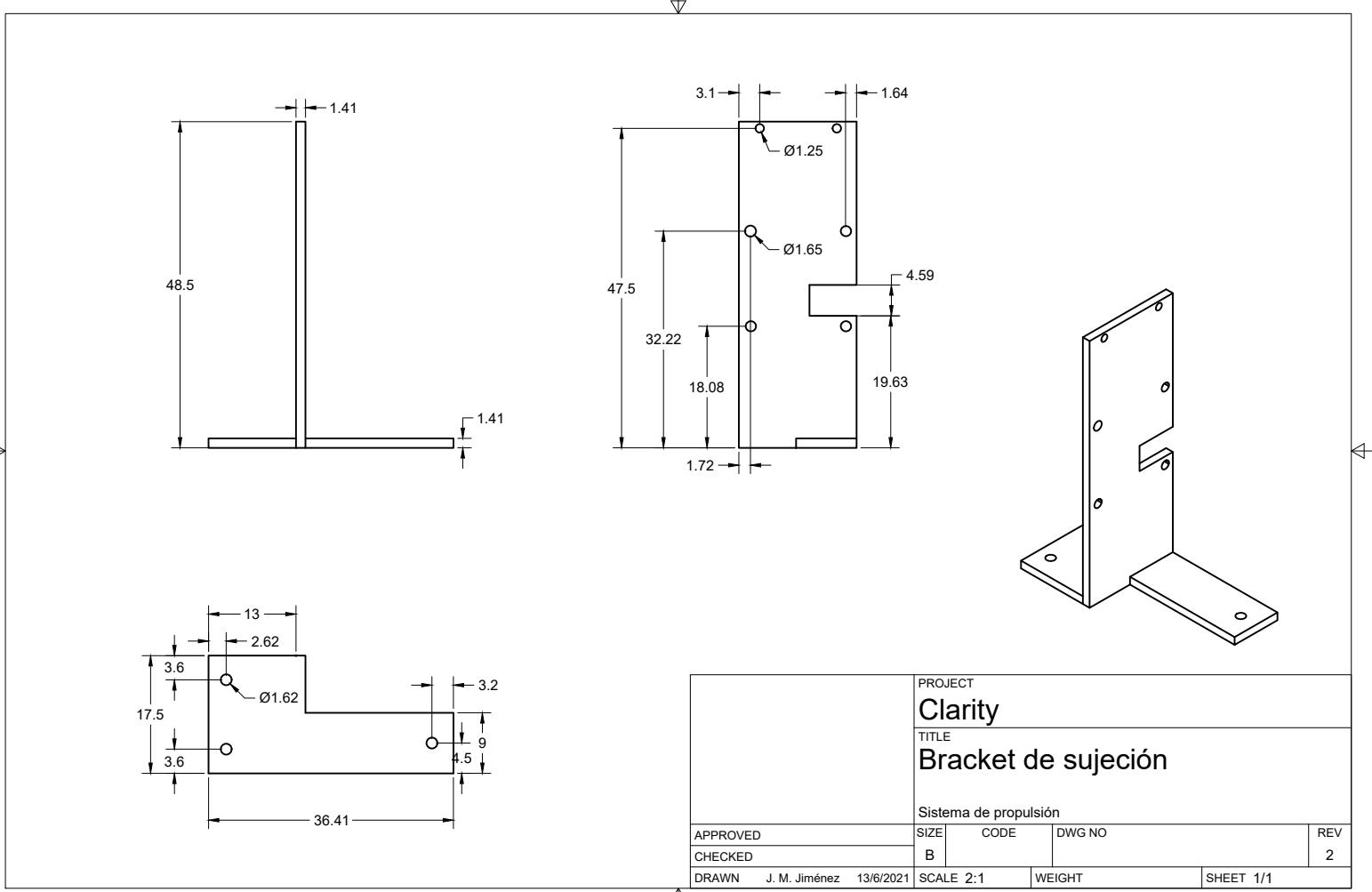
Matriz de Verificación de Control					
ID	Requerimiento	Método	Estado	Observaciones	Fuente
SyRS-50	Estimación de Orientación y Órbita	I	C	Verificar que en los diagramas de flujo se estime la orientación y órbita a partir de los datos dados por la sensórica	Diagramas de flujo
SyRS-51	Cálculo de Error	A	C	Verificar que se calcule el error entre la orientación y órbita actual y la deseada en las simulaciones	Simulaciones
SyRS-52	Cálculo de Torque	A	C	Verificar que se calcule el torque de control en las simulaciones	Simulaciones
SyRS-53	Cálculo de Delta-V	A	PC	Verificar que se calcule el delta-V requerido para el control de órbita abordo en las simulaciones	Simulaciones
SyRS-54	Control de Actuadores	I	C	Verificar que en los diagramas de flujo se envíe las señales de control a los actuadores	Diagramas de flujo
SyRS-129	Control de Actuadores Delta-V (Lazo Cerrado)	I	C	Verificar que en los diagramas de flujo se envíe las señales de control a los actuadores delta-V	Diagramas de flujo
SyRS-130	Control de Actuadores Delta-V (Lazo Abierto)	I	C	Verificar que en los diagramas de flujo se envíe las señales de control en lazo abierto a los actuadores delta-V	Diagramas de flujo
SyRS-131	Detección de Anomalías	A	C	Verificar que las lecturas de los sensores se encuentren en un rango especificado por los parámetros de la misión o telecomandos en las simulaciones	Simulaciones
SyRS-133	Aislamiento de Anomalías	I	C	Verificar que el sistema pueda apagar sensores y actuadores en caso de una anomalía.	Diagramas de flujo
SyRS-59	Cambio de Modo	I	C	Verificar que en los diagramas de flujo el sistema pueda cambiar a los distintos modos de operación	Diagramas de flujo
SyRS-87	Commutación de Actuadores	I	C	Comprobar que la comunicación con los actuadores permite al microcontrolador encenderlos y apagarlos	Diagramas de flujo
SyRS-134	Apagado no Controlado (Anomalía en Sensórica)	I	C	Verificar que en los diagramas de flujo se detecta el apagado no controlado de los sensores	Diagramas de flujo
SyRS-135	Desviación de Lecturas (Anomalía en Sensórica)	A	C	Simular la respuesta del sistema ante desviaciones de lecturas en los sensores	Simulaciones
SRS-80	Control de Actuadores	I	C	Verificar que en los diagramas de flujo se proporcionen señales de salida para el control de los actuadores	Diagramas de flujo
SRS-85	Retroalimentación del Sistema	A	C	Simular la retroalimentación del sistema	Simulaciones
SRS-87	Error Telecomando	I	C	Verificar que el sistema soporte errores en los telecomandos	Diagramas de flujo
SRS-88	Error Retroalimentación	I	C	Verificar que el sistema soporte errores de retroalimentación	Diagramas de flujo
SRS-89	Error Datos Espaciales	I	C	Verificar que el sistema soporte errores dados por los datos adquiridos de los sensores	Diagramas de flujo
SRS-100	Salida Movimiento de Actuadores	I	C	Verificar que en los diagramas de flujo se envíe las señales de control a los actuadores	Diagramas de flujo
SRS-101	Salida Retroalimentación del Sistema	A	C	Simular la retroalimentación del sistema	Simulaciones
SRS-102	Retroalimentación Operador	I	C	Verificar que en los diagramas de flujo se generan reportes para el operador	Diagramas de flujo
SRS-108	Actuadores	I	C	Verificar que en los diagramas de flujo se envíe las señales de control a los actuadores	Diagramas de flujo
SRS-113	Estados	A	C	Simular la retroalimentación del sistema tomando en cuenta los estados anteriores	Simulaciones
SRS-116	Matrices de Control	A	C	Verificar que las matrices de control necesarias se almacenen en la simulación	Simulaciones
SRS-145	Automatización	I	C	Verificar que los diagramas de flujo cuenten con un algoritmo de modo seguro	Diagramas de flujo

Figura 108: Matriz de verificación de control.

Matriz de Potencia						
ID	Requerimiento	Método	Estado	Observaciones	Fuente	
SyRS-78	Consumo de Potencia	A	C	Verificar mediante una simulación que el consumo de potencia del sistema no exceda 1W	BOM	
SyRS-86	Administración de Potencia (Sensórica)	A	C	Corroborar que el suministro de alimentación eléctrica sea el apropiado para cada sensor	IBD	
SyRS-125	Alimentación Energética (Actuadores)	A	C	Corroborar que el suministro de alimentación eléctrica sea el apropiado para cada actuador	IBD	

Figura 109: Matriz de verificación de potencia.

14. Anexo F: Plano del diseño del bracket de sujeción del pro-pulsor



15. Anexo G: Diagrama Eléctrico

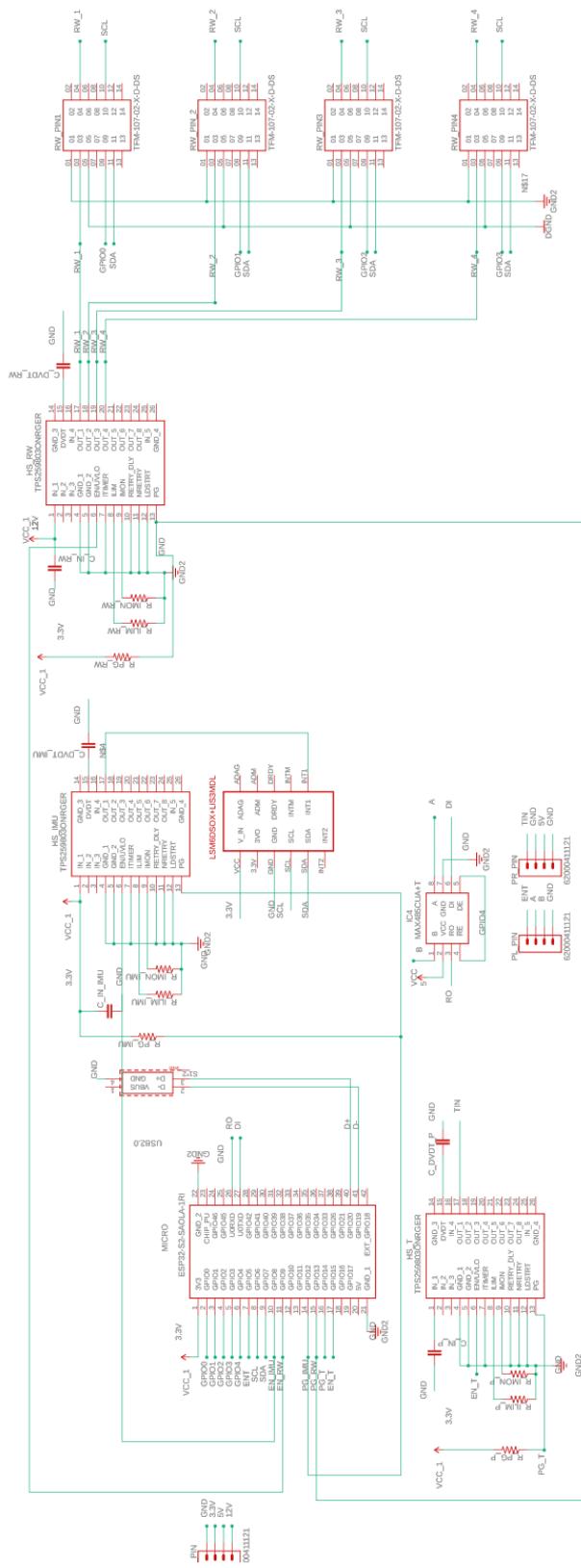


Figura 110: Diagrama Eléctrico

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/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/miniatueralization/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] Hemani Kaushal y Georges Kaddoum. "Optical Communication in Space: Challenges and Mitigation Techniques". En: *IEEE Communications Surveys Tutorials* 19.1 (2017), págs. 57-96. doi: 10.1109/COMST.2016.2603518.
- [11] J. T. Beasley, Thomas Walsh y E. Forstner. "Precision Pointing Considerations for Long-Distance Free-Space Optical Communications". En: 2020.
- [12] A. Chaves. *Introducción a subsistemas satelitales*. Presentación de clase. 2021.
- [13] ECE Paris. "System Specifications for Attitude Determination and Control System". En: (). URL: http://www.ece3sat.com/pdf/System_Specifications_ADCS_+_SOA.pdf.
- [14] 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>.
- [15] A. Passeti. *Background on Attitude and Orbit Control Systems (AOCS)*. 2002. URL: <https://www.pnp-software.com/AocsFramework/AocsBackground.html>.
- [16] S. Wu. *Satellite System Engineering – Attitude and Orbit Control System*. Presentación. Chinese Academy of Science, Shanghai Engineering Centre for Microsatellite, 2016.

- [17] J. Keesee. *Satellite Telemetry, Tracking and Control Subsystems*. Presentación. Massachusetts Institute of Technology, 2003.
- [18] Hans Kuiper y Dennis Dolkens. “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.
- [19] 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>.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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>.
- [23] 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.
- [24] R. Martos. “Cultura Corporativa : Misión, Visión y Valores en la Gestión Estratégica de las empresas del sector de la Automoción en España”. Tesis doct. UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA, jun. de 2009.
- [25] *EL PERFIL DE UN GERENTE DE PROYECTOS*. URL: <https://blogs.unini.org/proyectos/2017/03/08/unini-gerente-de-proyectos/>.
- [26] G. Dieter y L. Schmidt. *Engineering Design*. 5.^a ed. New York: McGraw-Hill, 2013. ISBN: 978-0-07-339814-3.
- [27] John Noll y col. “A Study of the Scrum Master’s Role”. En: *Product-Focused Software Process Improvement*. Ed. por Michael Felderer y col. Cham: Springer International Publishing, 2017, págs. 307-323. ISBN: 978-3-319-69926-4.
- [28] *La tarea del supervisor*. URL: <https://cafydma.org/la-tarea-del-supervisor/>.
- [29] *Roles en el desarrollo de software*. URL: http://profayadira.yolasite.com/resources/Roles_desarrollo_software.pdf.
- [30] *Modelo Descripción Del Puesto De Secretaria — Formato Word Descargable*. URL: <https://formatosyplanillas.com/descripcion-del-puesto-de-secretaria>.
- [31] *What is a Financial Advisor?* URL: <https://corporatefinanceinstitute.com/resources/careers/jobs/financial-advisor/>.
- [32] Raúl Francisco Oltra. “Business Intelligence. Definición.” En: (). URL: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/84471/Oltra%5C%20-%5C%20Business%5C%20Intelligence%5C%20Definici%C3%85n.pdf?sequ=1>.
- [33] ¿Qué funciones desempeña un profesional de la Gestión de Riesgos? URL: <https://www.ealde.es/funciones-gestor-riesgos/>.
- [34] *Quality Control Inspector Job Description*. URL: <https://www.jobhero.com/job-description/examples/quality-control/inspector>.

- [35] *Funciones del líder técnico en la era SCRUM.* URL: <https://novanotio.es/lider-tecnico-scrum/>.
- [36] *WHAT IS HARDWARE ENGINEERING?* URL: <https://www.hcltech.com/technology-qa/what-is-hardware-engineering>.
- [37] *Perfil profesional.* URL: <https://www.uninorte.edu.co/web/ingenieria-mecanica/perfiles>.
- [38] A. González. *¿Qué deben buscar las empresas en un integrador de tecnología?* URL: <https://corporatefinanceinstitute.com/resources/careers/jobs/financial-advisor/>.
- [39] *Responsable de Verificación.* URL: <https://www.fing.edu.uy/inco/cursos/ingsoft/pis/proceso/MUM/roles/respver.htm..>
- [40] *Definición de ingeniería de sistemas.* URL: <https://ingenierodesistemas.co/editorial/definicion-de-ingenieria-de-sistemas/>.
- [41] *¿Qué son las normas ISO y cuál es su finalidad?* URL: <https://www.isotools.org/2015/03/19/que-son-las-normas-iso-y-cual-es-su-finalidad/>.
- [42] A Blanca. *Aplicaciones Didácticas del Modelado y Simulación de Sistemas Físicos-Tecnológicos.* URL: <http://www.uco.es/organizacion/calidad/innovationeducativa/images/documentos/memorias/grupos-docentes/2008-2009/tecnologia/01508A4015.pdf>.
- [43] *What is Scrum?* URL: <https://www.atlassian.com/agile/scrum>.
- [44] Kem Schwaber y Jeff Sutherland. “La guía definitiva de Scrum: Las reglas del juego.” En: (). URL: <https://scrumguides.org/docs/scrumguide/v2016/2016-Scrum-Guide-Spanish-European.pdf>.
- [45] Altova. *Diagrama de bloque interno.* 2021. URL: https://www.altova.com/manual/es/UModel/umodeleenterprise/uminternal_block_diagrams.html.
- [46] David Pampliega Ruiz. *Apéndice B El Filtro de Kalman.* Mayo de 2008. URL: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproj/11611/direccion/Memoria%252F>.
- [47] Cyrill Stachniss. *Kalman Filter & EKF (Cyrill Stachniss).* Sep. de 2020. URL: https://www.youtube.com/watch?v=E-6paM_Iwfc%5C&t=912s.
- [48] El profe García. *Entendí el Control PID, si lo aprendes vas a poder...* Jul. de 2019. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=gtsZ2hsWKJk>.
- [49] Aymeric Kron. *Four Reaction Wheels Management: Algorithms Trade-Off and Tuning Drivers for the PROBA-3 Mission.* Ago. de 2014. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016431460>.
- [50] Altium. *CUMPLIR CON LAS NORMAS IPC PARA CIRCUITOS IMPRESOS.* URL: <https://www.altium.com/es/solution/complying-with-ipc-standards-for-pcb-design>.
- [51] hament sharma. *Carbon Fibre Cube Sat.* Jun. de 2015. URL: <https://grabcad.com/library/carbon-fibre-cube-sat-1>.
- [52] Aurora Propulsion Technologies OY. *Products.* URL: <https://aurorapt.fi/products/>.
- [53] ARO — AURORA RESISTOJET ONE. Datasheet. 2020. URL: <https://aurorapt.fi/downloads/ARO.pdf>.
- [54] Espressif systems. *ESP32-S2, ESP-IDF Programming Guide.* URL: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32s2/esp-idf-en-v4.4-dev-1594-g1d7068e-esp32s2.pdf>.
- [55] *Systems and software engineering — Life cycle processes — Requirements engineering.* Español. ISO/IEC/IEEE, nov. de 2018.

- [56] Open Cosmos Ltd. *OpenApp*. 2020. URL: <https://www.open-cosmos.com/openapp>.
- [57] C. Graham. *adcs-simulink-simulation*. URL: <https://github.com/queens-satellite-team/adcs>.
- [58] Agencia Nacional de Infraestructura. *PLAN DE GESTIÓN SOCIAL (PGS)*. URL: <https://www.ani.gov.co/glosario/plan-de-gestion-social-pgs>.
- [59] *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.
- [60] Juan Chaves Noguera. *Estándares y Pruebas*. Jul. de 2020.
- [61] 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/>.
- [62] IEEE. *Graphic Symbols for Electrical and Electronics Diagrams*. English. Canadian Standards Association, dic. de 1993. URL: https://www.ee.iitb.ac.in/~spilab/Tips/ansi_graphic_symbols_for_electrical_and_electronics_daigrams_1993.pdf.
- [63] ASME. *Engineering Drawing Practices*. 2017. URL: <https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/y14-100-engineering-drawing-practices>.
- [64] ISO/IEC. *Information technology — Object management group systems modeling language (OMG SysML)*. Mar. de 2017. URL: <https://www.iso.org/standard/65231.html>.
- [65] 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>.
- [66] 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>.
- [67] ISO/IEC. *Systems and software engineering — Measurement process*. Mayo de 2017. URL: <https://www.iso.org/standard/71197.html>.
- [68] ISO/IEC. *Software engineering — Software product Quality Requirements and Evaluation (SQaRE) — Data quality model*. Dic. de 2008. URL: <https://www.iso.org/standard/35736.html>.
- [69] 9001Simplified. *ISO 9001 Flowcharts*. Sep. de 2018. URL: <https://www.9001simplified.com/learn/iso-9001-flowcharts.php>.
- [70] ISO/IEC. *Systems and software engineering — Software life cycle processes*. Nov. de 2017. URL: <https://www.iso.org/standard/63712.html>.
- [71] SpaceWorks Enterprises Inc., ed. *Nano/Microsatellite market forecast, 9th edition*. 2019.
- [72] Urmila K. *Financial Strategy*. Abr. de 2021. URL: <https://www.businessmanagementideas.com/strategic-management/financial-strategy/21040>.
- [73] Martin Gillespie. *What is Cash Flow Forecasting?* Abr. de 2021. URL: <https://www.cashanalytics.com/what-is-cash-flow-forecasting/>.
- [74] 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/>.
- [75] 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/>.

- [76] 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>.
- [77] "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.
- [78] R. Garzozi M. Messina C. Moncada J. Ochoa G. Ilabel R. Zambrano. *Planes de negocios para emprendedores*. first. Vol. 1. varios: Iniciativa Latinoamericana de Libros de Texto Abiertos, 2014.