



Escuela de Ingeniería Electromecánica

GESTIÓN DE REQUERIMIENTOS PARA EL DESARROLLO DE
UN SISTEMA INTEGRADO DE PRUEBAS PARA CUBESATS

*Informe de Práctica de Especialidad para optar por el Título de Ingeniero
en Mantenimiento Industrial, Grado Licenciatura*

Autor:

Carlos Andrés Rodríguez Delgado

Cartago, Junio 2023

Carrera Acreditada por:



Agencia de Acreditación de programas
de Ingeniería y de Arquitectura

Hoja de Datos

Información del Estudiante:

Nombre: Carlos Andrés Rodríguez Delgado

Cédula: 1-1585-0639

Carné ITCR: 2016204692

Dirección de residencia en época lectiva: 10 metros norte y 150 metros oeste de la esquina sudoeste del Estadio Municipal, Tibás, San José, Costa Rica.

Teléfono: 8364-3080

Correo electrónico: crodel@live.com

Información del Proyecto:

Título: Gestión de requerimientos para el desarrollo de un sistema integrado de pruebas para CubeSats

Asesor Industrial: Dr. Johan Carvajal Godínez

Profesor Guía: Dr. Juan José Rojas Hernández

Jurado Evaluador:

- Dr. Luis Diego Murillo Soto

- Ing. Luis Chévez Gómez

Información de la Empresa:

Nombre: Laboratorio de Sistemas Espaciales del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Zona: Región Central

Dirección: Aula 511, Edificio K1, 1, km Sur de la Basílica de los Ángeles, C. 15, Dulce Nombre, Cartago, Costa Rica.

Actividad principal: Investigación y desarrollo en proyectos aeroespaciales

Contacto: Dr. Johan Carvajal Godínez

Teléfono: 2550-9171

Resumen

Este trabajo de graduación tiene como objetivo realizar la ingeniería de requerimientos para el desarrollo de un equipo Integrado de Pruebas para Sistemas de Potencia de CubeSats (IPTC). El IPTC es un dispositivo que permite la prueba exhaustiva de los subsistemas de energía para CubeSats, pequeños satélites utilizados para diversos fines como la observación remota, la investigación científica y la comunicación. El sistema IPTC consta de tres módulos de prueba: un Módulo de Carga Electrónica Variable (VELM), un Módulo de Prueba de Batería (BTM) y un Simulador de Matriz Solar (SAM), controlados por una unidad central. El sistema IPTC permitirá pruebas de subsistemas de energía más eficientes y confiables para CubeSats y contribuirá al desarrollo de la tecnología de pequeños satélites. Los requerimientos del sistema se definirán de acuerdo con lo establecido en la norma ISO/IEC 29148:2018 que definirá una guía de buenas prácticas basadas en ingeniería de sistemas para permitir elicitar los requerimientos del sistema. Se seguirá un enfoque de arriba hacia abajo, donde primero se elicitarán los requerimientos de los socios por medio de un documento de Especificación de Requerimientos de Socios (StRS), luego se hará lo mismo para el sistema por medio de la elaboración de un documento de Especificación de Requerimientos del Sistema (SyRS) y, por último, se desarrollará una matriz de verificación de requerimientos.

Palabras Claves: Ingeniería de sistemas, sistemas de potencia, CubeSats, ISO 29148

Abstract

This graduation project aims to carry out the requirements engineering for the development of an Integrated Power Systems Tester for CubeSats (IPTC). The IPTC is a device that allows for the comprehensive testing of power subsystems for CubeSats, small satellites used for various purposes such as remote sensing, scientific research, and communication. The IPTC system consists of three test modules: a Variable Electronic Load Module (VELM), a Battery Test Module (BTM), and a Solar Array Simulator Module (SAM), controlled by a central unit. The IPTC system will enable more efficient and reliable energy subsystem testing for CubeSats and contribute to the development of small satellite technology. The system requirements will be defined according to the ISO/IEC 29148:2018 standard, which will provide a guide of good practices based on systems engineering to elicit system requirements. A top-down approach will be followed, where requirements from stakeholders will first be elicited through a Stakeholder Requirements Specification (StRS) document, then the same will be done for the system through the development of a System Requirements Specification (SyRS) document, and finally, a requirements verification matrix will be developed.

Key Words: Systems engineering, power systems, CubeSats, ISO 29148.

Agradecimientos

Deseo agradecer enormemente a todas las personas que me apoyaron para lograr llegar aquí. A todos los profesores que fueron comprensivos durante mi carrera y que me permitieron, además de completar mi carrera universitaria, emprender y desarrollar mi carrera profesional en conjunto.

Quiero agradecer especialmente a los doctores: Johan Carvajal, Adolfo Chaves y Juan José Rojas, quienes además de servir como inspiración durante mi paso por la universidad, activamente buscaron formas de apoyarme y me permitieron alcanzar logros que hace siete años hubiesen sido imposibles.

¡Gracias por creer en mí y abrirme las puertas a un mundo tan emocionante! Sin su guía no lo hubiera logrado.

Dedicatoria

Dedico esta tesis en primera instancia a mi familia, que siempre ha estado conmigo. A mi madre, que me ha dado su apoyo incondicional y que siempre me ha hecho creer en mí. Me enseñó el valor de mirar hacia adelante y visualizar las posibilidades. A mi padre, que ha trabajado constantemente todos estos años para permitirnos a mi hermana y a mí alcanzar todas nuestras metas. Me enseñó el valor del trabajo duro y la responsabilidad. A mi hermana, que siempre tuvo tiempo para ayudarme cuando lo necesité. A mi tío Alex, que siempre me ha tratado como un hijo más, siempre tuvo tiempo de escucharme y apoyarme en mi desarrollo profesional. Y al resto de mi familia, que siempre celebra mis logros como los suyos y han estado para mí de una forma u otra durante este proceso.

Segundo, quiero dedicar este trabajo a mis amigos Shamall, Rubén, Mata y Rafael. Que en los momentos de mayor estrés fueron mi válvula de escape y una fuente de risas que me recordó siempre que hay más en la vida que solo el desarrollo académico y profesional.

Tercero, a mis compañeros de Orbital Space Technologies, Valeria, Mauricio, Sofía, Fiorella y al resto del equipo que me han mostrado el potencial que hay en este país. Son las personas que me permitieron vislumbrar lo mucho que voy a disfrutar mi vida profesional y me motivaron a seguir adelante. No puedo esperar a poder seguir trabajando junto a ustedes.

Y cuarto, a María Fernanda que fue mi apoyo los últimos cuatro años, ha estado conmigo en los mejores y peores momentos de mi desarrollo profesional, me enseñó una nueva forma de ver el mundo y me motiva a ser una mejor persona cada día

Índice general

Nomenclatura	XVI
1. Introducción	1
1.1. Reseña de la Empresa	1
1.1.1. Misión	2
1.1.2. Visión	2
1.2. Planteamiento del Problema	2
1.2.1. Contexto y orígenes del problema	2
1.2.2. Planteamiento de Problema	4
1.3. Objetivo General	6
1.4. Objetivos Específicos	6
1.5. Justificación	7
1.6. Viabilidad	8
1.6.1. Insumos presupuestarios	8
1.6.2. Insumos tecnológicos	9
1.6.3. Recursos humanos	9

1.6.4. Acceso a la información	9
1.7. Metodología	10
1.7.1. Diseño de Investigación	11
1.7.2. Enfoque de la Investigación	12
1.7.3. Alcance de la investigación	12
1.7.4. Limitaciones de la investigación	13
1.7.5. Cronograma proyectado del desarrollo del proyecto	14
2. Marco Teórico	15
2.1. Ingeniería de sistemas	15
2.2. ISO/IEC 29148:2018	17
2.3. CubeSats	19
2.3.1. CubeSats en el mercado	21
2.4. Sistemas de potencia eléctrica para CubeSats	21
2.5. Fallas en sistema de potencia de CubeSats y módulo de pruebas	25
3. Obtención de requerimientos de los socios del proyecto	29
3.1. Descripción General	29
3.2. Caracterización de los socios del proyecto IPTC	30
3.2.1. Tipos de socios del proyecto	30
3.2.2. Alcance de los perfiles de socios del proyecto	31
3.2.3. Matriz de socios del proyecto	32
3.2.4. Método de recolección de requerimientos de los socios	32
3.3. Caracterización de requerimientos	39

3.4. Requerimientos de gestión empresarial	39
3.4.1. Ambiente empresarial	39
3.4.2. Misión, metas y objetivos	41
3.4.3. Modelo de negocios	42
3.4.4. Entorno de información	43
3.5. Requerimientos operacionales del sistema	44
3.5.1. Procesos del sistema	44
3.5.2. Reglamentos y políticas de operación	46
3.5.3. Limitantes operacionales	47
3.5.4. Estados y modos de operación del sistema	48
3.5.5. Calidad operacional del sistema	49
3.6. Requerimientos de usuario	50
3.6.1. Criterios de calidad	50
3.6.2. Requerimientos de interacción	52
3.6.3. Contextos de uso	53
3.6.4. Escenarios de operación	54
3.6.5. Requerimientos de uso	55
3.7. Conceptos del ciclo de vida del sistema propuesto	55
3.7.1. Concepto operacional	56
3.7.2. Escenarios de operación	58
3.7.3. Otros conceptos del sistema propuesto	58
3.7.4. Limitantes del proyecto	59

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	x
3.8. Matriz de requerimientos de socios	59
4. Requerimientos de sistemas, subsistemas e integración	63
4.1. System Requirements Specification (SyRS)	63
4.2. Arquitectura funcional del IPTC	64
4.3. Requerimientos de usabilidad	69
4.4. Requerimientos de desempeño	70
4.5. Requerimientos de interfaz	70
4.6. Requerimientos de integración entre el sistema y usuario	72
4.7. Requerimientos de mantenimiento	74
4.8. Otros requerimientos de calidad	75
4.9. Requerimientos físicos	75
4.10. Condiciones ambientales	76
4.11. Requerimientos de seguridad	78
4.12. Requerimientos de manejo de información	78
4.13. Requerimientos de políticas reguladoras	79
4.14. Requerimientos de manejo del ciclo de vida	80
4.15. Requerimientos de empaquetado, manejo y transporte	80
4.16. Matriz de requerimientos del sistema	81
5. Verificación de requerimientos	101
5.1. Estándar IEEE 1012-2016	101
5.2. Procesos de verificación	102
5.3. Inspección	103

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	XI
5.4. Revisión	104
5.5. Análisis	106
5.6. Demostración	107
5.7. Pruebas	108
6. Conclusiones y Recomendaciones	110
6.1. Conclusiones	110
6.2. Recomendaciones	112
A. Documento de comandos IPTC	113
A. IPTC Stakeholder Requirement Specification (STRS)	125
B. IPTC System Requirements Specification (SyRS)	140
C. Ejemplo de Revisión Funcional para el MCI	170

Índice de tablas

1.1. Cuadro metodológico del proyecto.	10
3.1. Matriz de socios del proyecto	32
3.2. Título de las personas entrevistadas	34
3.3. Países y regiones de uso del IPTC	38
3.4. Presupuesto para desarrollo del IPTC	40
3.5. Requerimientos Operacionales del IPTC (StRS)	60
3.6. Requerimientos de usuario del IPTC (StRS)	61
3.7. Add caption	62
4.1. Requerimientos funcionales del sistema	82
4.2. Requerimientos funcionales del módulo de control de interfaces	83
4.3. Requerimientos funcionales del módulo de potencia variable	84
4.4. Requerimientos funcionales del módulo de testeo de baterías	85
4.5. Requerimientos funcionales del módulo de matriz solar	86
4.6. Requerimientos funcionales del GUI	87
4.7. Requerimientos funcionales del sistema mecánico	88

4.8. Requerimientos de usabilidad	89
4.9. Requerimientos de desempeño	90
4.10. Requerimientos de interfaz de los módulos de testeo	91
4.11. Requerimientos de interfaz mecánicos	91
4.12. Requerimientos de integración entre el sistema y el usuario	92
4.13. Requerimientos de mantenimiento	93
4.14. Otros requerimientos de calidad	94
4.15. Requerimientos físicos	95
4.16. Requerimientos de adaptabilidad	95
4.17. Requerimientos ambientales	96
4.18. Requerimientos de seguridad	97
4.19. Requerimientos de manejo de información	98
4.20. Requerimientos de políticas reguladoras	99
4.21. Requerimientos de manejo de ciclo de vida	99
4.22. Requerimientos de empaquetado, manejo y transporte	100

Índice de figuras

1.1. Subsistemas responsables de fallas en el tiempo para CubeSats. Fuente:[1]	3
1.2. Debiera contra realidad para planteamiento de problema.	6
1.3. Diagrama de Gantt Semanas 1 a 8.	14
1.4. Diagrama de Gantt Semanas 8 a 14.	14
2.1. Proceso de obtención de requerimientos. Fuente:[2]	18
2.2. Proceso de obtención de requerimientos. Fuente:[2]	19
2.3. Componentes básicos del EPS de los CubeSats. Fuente:[3]	22
2.4. Diagrama general de entradas y salidas al MCP. Fuente:[4]	27
2.5. Diagrama general de entradas y salidas para los módulos de testeo. Fuente:[4]	28
3.1. Rol de entrevistados en el desarrollo de sistemas de potencia para CubeSats. Fuente: Elaboración Propia (Microsoft Forms).	33
3.2. Usos previstos por los socios del IPTC. Fuente: Elaboración Propia (Microsoft Forms).	34
3.3. Posesión de soluciones similares al IPTC. Fuente: Elaboración Propia (Microsoft Forms).	35
3.4. Herramientas de software para el IPTC. Fuente: Elaboración Propia (Microsoft Forms).	36
3.5. Volumen esperado para el IPTC. Fuente: Elaboración Propia (Microsoft Forms).	37

3.6. Instalaciones para el IPTC. Fuente: Elaboración Propia (Microsoft Forms).	38
3.7. Concepto de operaciones del IPTC. Fuente: Elaboración Propia (Draw.io).	45
3.8. Diagrama conceptual de funcionamiento del IPTC. Fuente: Elaboración Propia (Draw.io).	46
3.9. concepto de operaciones del IPTC. Fuente: Elaboración Propia (Draw.io).	56
3.10. Modos operaciones del IPTC. Fuente: Elaboración Propia (Draw.io).	57
3.11. Ciclo de vida del IPTC. Fuente: Elaboración Propia (Draw.io).	58
4.1. Conceptualización de elementos de interfaces del IPTC. Fuente: Elaboración Propia (Draw.io).	71
4.2. Diagrama de conexiones del IPTC. Fuente: Elaboración Propia (Draw.io).	72
4.3. Humedad relativa en las regiones del mundo. Fuente: [5].	77

Capítulo 1

Introducción

1.1. Reseña de la Empresa

El Laboratorio de Sistemas Espaciales (SETECLab) es una entidad encargada del desarrollo e investigación en materia de ingeniería espacial del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR). Se encuentra ubicado en el edificio de Ingeniería Electrónica del Campus Tecnológico Central de Cartago del ITCR.

El SETEC busca liderar la creación de capacidades en ingeniería espacial en Costa Rica por medio del desarrollo de proyectos y programas con alianzas estratégicas tanto a nivel nacional como internacional [6].

Entre los proyectos desarrollados hasta la fecha por el SETEC resalta el Proyecto Irazú, que marcó un hito histórico a nivel regional. Este proyecto puso en órbita el primer satélite a nivel centroamericano en 2018. El SETEC se encargó del desarrollo tecnológico del satélite, desde el diseño mecánico de su carcasa hasta el desarrollo de software, electrónica e integración de sus subsistemas. Esta misión buscaba desarrollar las capacidades de elaboración de satélites en el país por medio del desarrollo de una misión que además tuviera una aplicación tangible. En este caso, el satélite monitoreó la fijación de carbono en un bosque de San Carlos, donde una estación remota transmitía los datos de la medición del crecimiento

de los árboles al satélite por medio de sensores instalados en sus troncos [7]. Además del Proyecto Irazú, el SETEC ha participado en el desarrollo de proyectos de estaciones terrenas para recepción y transmisión de datos a satélites, así como su monitoreo, también colaboró en el desarrollo de otros satélites más grandes en conjunto con otras universidades como la Universidad George Washington de Estados Unidos y el Instituto Tecnológico de Kyushu y desarrolla subsistemas y componentes para uso en CubeSats.

Actualmente, el SETEC está conformado por tres profesores investigadores: el Dr. Johan Carvajal Godínez de la Escuela de Ingeniería Electrónica quien funge como coordinador del laboratorio, el Dr. Adolfo Chaves Jiménez también de la Escuela de Ingeniería Electrónica y el Dr. Juan José Rojas Hernández de la Escuela de Ingeniería Electromecánica. Además de los investigadores principales, el SETEC cuenta con varios estudiantes asistentes que ayudan con las labores investigativas.

1.1.1. Misión

Ser un laboratorio de ingeniería especial enfocado en el desarrollo de proyectos y programas con socios nacionales e internacionales para el desarrollo de la ciencia y la tecnología en el campo de la ingeniería espacial en Costa Rica.

1.1.2. Visión

La visión del SETEC Lab es liderar la creación de capacidades en ingeniería espacial en Costa Rica.

1.2. Planteamiento del Problema

1.2.1. Contexto y orígenes del problema

El desarrollo e integración de satélites pequeños o nanosatélites (CubeSats), es un proceso complejo. Los componentes de estos satélites varían en torno a su misión, pero en general, un CubeSat cuenta con sistemas de comunicación, navegación, potencia, mecánicos, software entre otros, además, se deben tomar

en cuenta las estrictas restricciones de dimensiones y peso que suelen tener estos dispositivos. Aunado a esto, se debe considerar que los CubeSats son la plataforma más accesible para realizar misiones espaciales, lo que los ha convertido en la plataforma preferida por instituciones académicas y quienes suelen desarrollar sus sistemas son estudiantes, lo que aumenta las posibilidades de fallas en los diferentes sistemas. Alrededor del 30 % de los CubeSats fallan en las primeras semanas desde su puesta en órbita [8].

Debido a esto, [1] se dieron a la tarea de encontrar cuales subsistemas generaban la mayor cantidad de fallas catastróficas en CubeSats, para esto, usaron una muestra de 178 CubeSats lanzados al espacio. Sus hallazgos documentaron que la mayoría de los daños registrados eran causados por el subsistema de potencia eléctrica (EPS por sus siglas en inglés), siendo este el causante de alrededor de 44 % de las fallas catastróficas encontradas antes de los 30 días de operación, 36 % antes de los 90 días y 28 % para CubeSats que tuvieron problemas desde el primer momento de operación. Es importante notar, que estos porcentajes probablemente sean mayores ya que en todos los casos hay un porcentaje de fallas que no se pudieron clasificar dentro de uno de los subsistemas porque se desconoce la razón específica por la que falló el satélite mientras estaba en órbita.

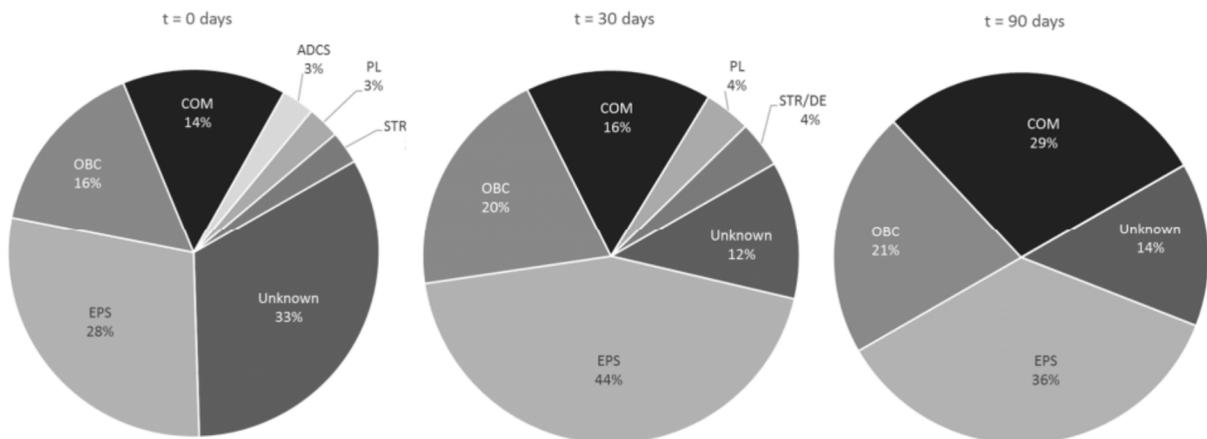


Figura 1.1: Subsistemas responsables de fallas en el tiempo para CubeSats. Fuente:[1]

Estos fallos podrían ser mitigados por medio mejores pruebas previo a la integración de los subsistemas, sin embargo, los equipos existentes en el mercado para realizar pruebas a sistemas de potencia de satélites

convencionales tienen costos prohibitivos y, además, son inadecuados para realizar pruebas en sistemas de potencia de CubeSats pues no están dimensionados para estas aplicaciones de baja potencia. Para atacar este problema, el SETEC se encuentra desarrollando un sistema integrado y modular de pruebas para sistemas de potencia de satélites. Este proyecto financiado por la Vicerrectoría de Investigación y Extensión (VIE) busca crear un módulo configurable de potencia (MCP) que pueda operar como un simulador de arreglo solar, cargador o descargador de baterías o carga electrónica según se requiera. Para poder operar el módulo, el proyecto requiere la creación de un sistema de control e interfaz (SCI) que se encargue de la interacción con el usuario y la comunicación y el control de los MCPs. El desarrollo de un chasis adecuado para integrar los dispositivos que componen el sistema y la integración de todos estos componentes [4].

1.2.2. Planteamiento de Problema

De manera similar a lo mencionado en la sección anterior con los CubeSats, el equipo integrado de pruebas para sistemas de potencia de satélites es un proyecto complejo, que consta de varios subsistemas y cuyo desarrollo debe ser realizado por separado para al final, integrar el producto, que debe además cumplir con todos los requerimientos de los usuarios finales, los requerimientos de diseño e ingenieriles y las necesidades del SETEC-Delta Lab como gestores del proyecto. Actualmente, el SETEC no cuenta con un sistema de ingeniería de requerimientos e integración para el desarrollo de su equipo integrado de pruebas para sistemas de potencia de CubeSats. Esto genera varios problemas a la hora del desarrollo del proyecto. Si no se tienen claras las necesidades de las partes interesadas en el desarrollo del proyecto (stakeholders) el proyecto puede incurrir en gastos mayores a los presupuestados o no cumplir con las necesidades para poder ser comercializado por el productor. Por otro lado, si no se consideran las necesidades de los usuarios del equipo, el producto final puede no resultar útil para los desarrolladores de sistemas de potencia de CubeSats lo que generaría una pérdida de recursos considerable para el SETEC. Por último, pero no menos importante, no se pueden obviar los requerimientos ingenieriles y de diseño de cada uno de los subsistemas, así como la integración de estos para garantizar un producto funcional. Es posible observar

que la gestión de requerimientos en sistemas complejos como este es difícil debido a la escala del sistema en general. Por tanto, es importante articular la gestión de estos requerimientos de manera efectiva para asegurar que las tareas realizadas por los desarrolladores sean concisas y se acoplen a las necesidades de alto nivel del proyecto, ayudando a optimizar los procesos de diseño, integración y construcción del producto final y optimizando el proceso como un todo.

Actualmente, el proyecto se encuentra en sus primeras etapas, los diferentes grupos de trabajo están realizando las labores investigativas necesarias. Sin embargo, en este momento, no existe un plan claro para la gestión de requerimientos del proyecto ni la integración de subsistemas. Esto es un problema debido a que según el Instituto de Gestión de Proyectos la mala gestión al inicio de los proyectos es la causa principal del fracaso de estos [9]. Además, se sabe que los proyectos que están "algo definidos" o "lo suficientemente definidos" tienen una proporción de fracaso de 2 a 1 contra los proyectos bien definidos [10]. De datos como estos es posible inferir la importancia de normas como la ISO 29148 que permiten estudiar forma sistematizada la ingeniería de requerimientos y procesos de ciclos de vida durante las fases iniciales de los proyectos para asegurar las buenas prácticas durante su gestión.

Las estadísticas anteriores toman una importancia mayor en proyectos como los planteados por el SETEC, ya que son proyectos ambiciosos que toman varios años en completarse y son desarrollados primariamente por estudiantes con la guía de los investigadores del laboratorio. Debido a esta naturaleza, la rotación de "personal" desarrollando el proyecto es alta, los estudiantes avanzan en sus carreras y se gradúan y es necesario que otros estudiantes nuevos tomen su lugar. Si el proyecto no tiene requerimientos bien establecidos ni está claro cómo se deben integrar todos los subsistemas la curva de aprendizaje para los nuevos integrantes tiene una pendiente muy grande, además de contribuir a mayores posibilidades de fracaso en el proyecto.

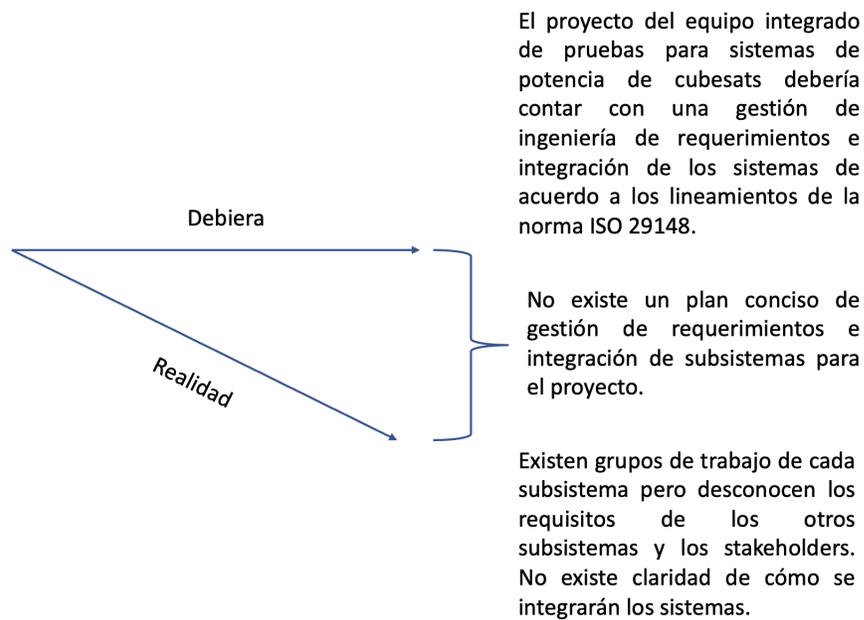


Figura 1.2: Debiera contra realidad para planteamiento de problema.
Elaboración Propia (Microsoft Powerpoint).

1.3. Objetivo General

- Desarrollar un plan de gestión de requerimientos que guie el diseño e implementación del sistema integrado de pruebas de CubeSats (IPTC), y que permita una mejor gestión del desarrollo ingenieril del proyecto siguiendo los lineamientos dictados por la norma ISO 29148 de ingeniería de sistemas, requerimientos y ciclo de vida de procesos.

1.4. Objetivos Específicos

1. Establecer la matriz de requerimientos de socios del proyecto que satisfaga el entorno de alto nivel de los procesos del proyecto de investigación IPTC de acuerdo con lo establecido en la norma ISO 29148.
2. Diseñar una matriz de especificación de requerimientos a nivel de sistemas y subsistemas para la

integración del IPTC siguiendo lo establecido en la norma ISO 29148.

3. Implementar una matriz de verificación de requerimientos con el propósito de garantizar que las necesidades de los socios son satisfechas con el diseño ingenieril.

1.5. Justificación

Como se mencionó anteriormente, en este momento no existe un plan claro y definido para manejar los requerimientos del proyecto tanto en un nivel global como de subsistemas. Se debe actuar sobre esta realidad ya que se sabe que el proceso de requerimientos es la etapa más importante para obtener un producto bien diseñado, sólidamente aceptado y que funciona como se espera. Quien no realiza ingeniería de requerimientos se prepara para el desastre en el proyecto [11]. Sin la gestión adecuada de los requerimientos del proyecto en esta etapa temprana el proyecto se arriesga a distintos tipos de fallas en el futuro, algunos ejemplos son: fallas de integración entre sistemas, necesidad de rediseño e iteración de subsistemas, ejecución ineficiente de presupuestos, generación de un producto que no satisface las necesidades del consumidor, tiempos de desarrollo mayores, pérdida de oportunidades de mercado, entre otros.

La implementación de una correcta gestión de requerimientos ayudará a definir desde etapas tempranas el camino a seguir para cada grupo de trabajo, además asegurará que se cumpla con las necesidades de alto nivel que conlleva el proyecto. Esto reducirá los riesgos asociados a fallas de alto nivel del proyecto, así mismo, optimizará el flujo de trabajo de este, permitiendo asegurar un producto viable para todas las partes en un tiempo menor y con un menor gasto de recursos en comparación con un desarrollo siguiendo los métodos tradicionales de ingeniería. Para asegurar el cumplimiento de estos objetivos y garantizar que se cumplan los estándares de calidad requeridos para un proyecto de esta magnitud se utilizará la norma ISO 29148, que guiará todos los procesos referentes a la ingeniería de requerimientos. El uso de esta norma también sienta un precedente para que otros proyectos del ITCR y especialmente del SETEC puedan hacer un manejo adecuado de su ingeniería de requerimientos en proyectos complejos usando como referencia este proyecto de graduación y agregando sus propias contribuciones a las que serán planteadas

en este documento. Ayudando así, a mejorar la gestión y calidad de los proyectos realizados dentro de la institución.

Por último, pero no menos importante, se debe recalcar que una correcta gestión de requerimientos permitirá que el proyecto del sistema integrado de pruebas para sistemas de potencia de CubeSats que se encuentra en desarrollo por parte del SETEC cumpla con sus objetivos de desarrollo. Como se mencionó anteriormente, la principal causa de fallas críticas en CubeSats son problemas en sus sistemas de potencia, por lo que este es un producto que tiene grandes repercusiones a nivel mundial, es una forma efectiva y accesible de garantizar a investigadores, académicos, industrias y gobiernos que los satélites que están desarrollando no presentarán fallos que pudieron haber sido corregidos antes de enviarlos al espacio en sus sistemas de potencia. Abriendo la posibilidad a más actores a desarrollar tecnología espacial, especialmente en países emergentes, donde tecnologías como estas significan una inversión mayor en comparación con naciones desarrolladas.

1.6. Viabilidad

Este proyecto cuenta con varios insumos que viabilizan su desarrollo.

1.6.1. Insumos presupuestarios

En primera instancia, es un proyecto de investigación avalado por la Vicerrectoría de Investigación que cuenta con financiamiento por parte del ITCR, para la compra de materiales, equipos, pago de horas asistentes y acompañamiento de los investigadores con el fin de garantizar su realización dentro de un periodo establecido.

1.6.2. Insumos tecnológicos

A nivel de insumos tecnológicos, este proyecto es un proyecto de manejo y gestión de proyectos de ingeniería, por tanto, puede realizarse de forma casi completamente virtual, se requiere de una computadora, el paquete básico de software de Office 365 para el desarrollo del trabajo escrito, comunicación vía Microsoft Teams y correos y tablas de Excel para el manejo de información además de algunos software ingenieriles y de diseño como Matlab y Figma para el desarrollo del modelado y visualización de la información así como el manejo del concepto de operaciones. Todos estos softwares están disponibles para estudiantes del ITCR y se permite su uso para la aplicación que se realizará en este proyecto de graduación.

1.6.3. Recursos humanos

El proyecto de investigación cuenta con profesores investigadores que deben dedicar una cantidad de horas específicas al proyecto todas las semanas, tanto el Dr. Rojas como el Dr. Carvajal son expertos en sistemas espaciales, siendo el Dr. Carvajal también experto en ingeniería de sistemas complejos con tecnología espacial. La experiencia de ambos será crucial para obtener recomendaciones y guía. También, el proyecto cuenta con asistentes asignados que deben cumplir con un horario para el desarrollo del proyecto, quienes podrán brindar la información de los requerimientos de sus subsistemas y de las características de interfaz de cada sistema.

1.6.4. Acceso a la información

Este proyecto se basará en la aplicación de la norma ISO 29148 que se encuentra disponible en forma digital. Sumando a esto, el proyecto cuenta con colaboración de otros entes académicos como el Instituto Tecnológico de Kyushu, la Universidad Anhalt de Ciencias Aplicadas y una serie de contactos académicos, técnicos e industriales de los profesores investigadores del proyecto. Donde, las primeras dos instituciones participan de forma activa en el desarrollo del proyecto como stakeholders en conjunto con el SETEC y los demás podrán brindar información importante como usuarios y expertos en la materia.

1.7. Metodología

En este apartado se muestra la tabla de actividades a desarrollar a lo largo del proyecto de graduación, compuesta por fases, objetivo al que corresponde cada fase y actividades a desarrollar en cada una.

Tabla 1.1: Cuadro metodológico del proyecto.

Fase	Objetivo Asociado	Actividades
1. Determinación de los requerimientos de los socios del proyecto de investigación.	Establecer la matriz de requerimientos de socios del proyecto que satisfaga el entorno de alto nivel de los procesos del proyecto de investigación IPTC de acuerdo con lo establecido en la norma ISO 29148.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Investigar y analizar requerimientos de los stakeholders del proyecto. 2. Investigar y analizar los requerimientos de los usuarios del producto final. 3. Establecimiento de la matriz de requerimientos.
2. Desarrollo de matriz de especificación de requerimientos para sistemas y subsistemas.	Desarrollar una matriz de especificación de requerimientos a nivel de sistemas y subsistemas para la integración del IPTC siguiendo lo establecido en la norma ISO 29148.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Investigar y analizar los requerimientos de cada uno de los subsistemas del proyecto. 2. Depuración de la información obtenida y desarrollo del concepto de operaciones preliminar.
3. Desarrollo de matriz de verificación de requerimientos para diseño ingenieril.	Implementar una matriz de verificación de requerimientos con el propósito de garantizar que las necesidades de los socios son satisfechas con el diseño ingenieril.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Creación de modelo de operaciones del sistema con los requerimientos de cada parte interesada y equipos de trabajo. 2. Desarrollo de matriz de verificación de requerimientos del producto final.

A nivel del desarrollo de este documento se contará con 6 capítulos, cuyos contenidos se explican brevemente a continuación:

- Capítulo 1: Sienta las bases generales del proyecto, sus objetivos, el problema a resolver, la metodología, alcance y limitaciones del proyecto.

- Capítulo 2: Hace referencia a toda la documentación técnica para la realización del diseño final.
- Capítulo 3: Se enfoca principalmente en el desarrollo del documento de la determinación de los requerimientos de los socios del proyecto de investigación.
- Capítulo 4: Trata los procesos seguidos para obtener los requerimientos específicos de cada uno de los sistemas y subsistemas del proyecto. Es decir, en este capítulo se encapsulan los requerimientos técnicos del proyecto. Además, en este capítulo se trata el tema de los requerimientos y documentos de interfaz del proyecto.
- Capítulo 5: Tiene como finalidad explicar la matriz de verificación realizada sobre los requerimientos recolectados para el correcto desarrollo del proyecto.
- Capítulo 6: En este capítulo se describen las conclusiones del proyecto, sugerencias para los equipos de trabajo del proyecto IPTC y sugerencias para el desarrollo de futuros proyectos en el área de ingeniería de sistemas relacionados a este.

Además, es importante notar que, a estos capítulos, se anexarán como apéndices los documentos generados con los requerimientos obtenidos del proyecto, y a parte de este documento, se anexará la matriz de verificación de requerimientos que englobará todo lo generado en estos documentos como una hoja de cálculo electrónica.

1.7.1. Diseño de Investigación

Este trabajo se centrará en investigación y recopilación de información para el desarrollo del proyecto IPTC del SETEC Lab. Los subsistemas de potencia de satélites tipo CubeSat son sistemas sumamente especializados, por lo que, nivel mundial son pocos los expertos trabajan en esta área y conocen del tema a cabalidad. Además, estos sistemas son relativamente nuevos. Estas razones limitan la cantidad de información que es posible obtener en la literatura de acuerdo con las necesidades que tienen dichos expertos a la hora de realizar pruebas e investigación en estos sistemas. Por tanto, esta investigación

requerirá de trabajo de investigación de campo, por medio de encuestas, entrevistas y otras herramientas, con el fin de obtener información de primera mano que permita caracterizar las necesidades de estos expertos. Una vez caracterizadas estas necesidades, se realizará un estudio de cómo se traducen estas necesidades a un diseño ingenieril además de las necesidades, interacciones y limitaciones de este.

1.7.2. Enfoque de la Investigación

Esta investigación tiene como visión final poder entregar al cliente los documentos necesarios para permitirle empezar a trabajar con los equipos ingenieriles en los paquetes de trabajo para el desarrollo del proyecto.

- Planteamiento del Problema.
- Revisión de la literatura y desarrollo del marco teórico.
- Desarrollo del diseño de investigación.
- Obtención de requerimientos.
- Análisis de datos.
- Definición y selección de requerimientos finales.
- Establecimiento de mecanismos de verificación.
- Reporte de Resultados.

1.7.3. Alcance de la investigación

Se desarrollará un plan de gestión de requerimientos siguiendo lo establecido en la norma ISO 29148:2018 para la ingeniería de requerimientos. Este sería el primer proyecto en utilizar dicha norma en un proyecto dentro SETEC y sentaría los precedentes de la utilización de la norma para otros proyectos de este estilo. Es importante también ahondar en el hecho de que sentará un precedente de las buenas prácticas de

ingeniería de requerimientos dentro del ente investigativo, y permitirá que otros proyectos del laboratorio tanto presentes como futuros puedan mejorar sus prácticas ingenieriles.

La creación de las matrices de especificación de requerimientos y de verificación de requerimientos, en conjunto con el concepto de operaciones y el establecimiento de requerimientos de alto nivel sólidos cimentarán el proyecto de modo que el desarrollo e integración de los subsistemas se de en forma óptima. Además, garantizará que el producto resultante sea útil para los usuarios y provechoso para los stakeholders ayudando a su vez a minimizar las posibilidades de fallo del proyecto por mala gestión en sus etapas tempranas.

1.7.4. Limitaciones de la investigación

Al ser este un proyecto de investigación de índole cualitativo es sumamente dependiente de la información que se recolectará de los usuarios finales del producto. La calidad de las preguntas realizadas y la calidad de las respuestas de los usuarios, así como su disponibilidad para responderlas, será crucial para desarrollar matrices de requerimientos sólidas que permitan el mejor desarrollo del proyecto. Para mitigar el riesgo de falta de información, es importante alcanzar la mayor cantidad de potenciales usuarios del producto final con el fin de entender a cabalidad sus necesidades y poder discernir las tendencias de estas de forma que se puedan representar dentro de las matrices de requerimientos a realizarse.

Otra posible limitante corresponde a la necesidad de coordinar también grupos grandes de trabajo por cada subsistema y para el sistema en general. Cada grupo de trabajo consta de varias personas, y se requerirán varias sesiones para entender a cabalidad las necesidades de cada subsistema, además de tener sesiones de trabajo con varios subsistemas para entender posibilidades de interfaz y requerimientos que podrían ser conflictivos. Por tanto, se debe seguir una estrategia de reuniones bien estructurada y coordinada con mucha anticipación que además no dependa de la asistencia de todos los integrantes de un subsistema o subsistemas para poder obtener la información necesaria para el proyecto.

1.7.5. Cronograma proyectado del desarrollo del proyecto

A continuación, se muestra el diagrama de Gantt elaborado para visualizar el flujo de actividades del proyecto a catorce semanas y tomando en cuenta el desarrollo del trabajo escrito.

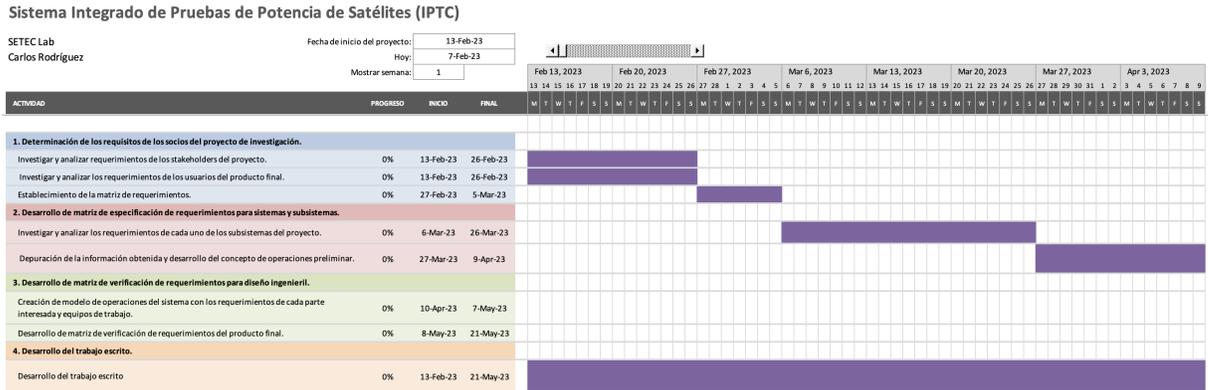


Figura 1.3: Diagrama de Gantt Semanas 1 a 8.
Elaboración Propia (Microsoft Excel).

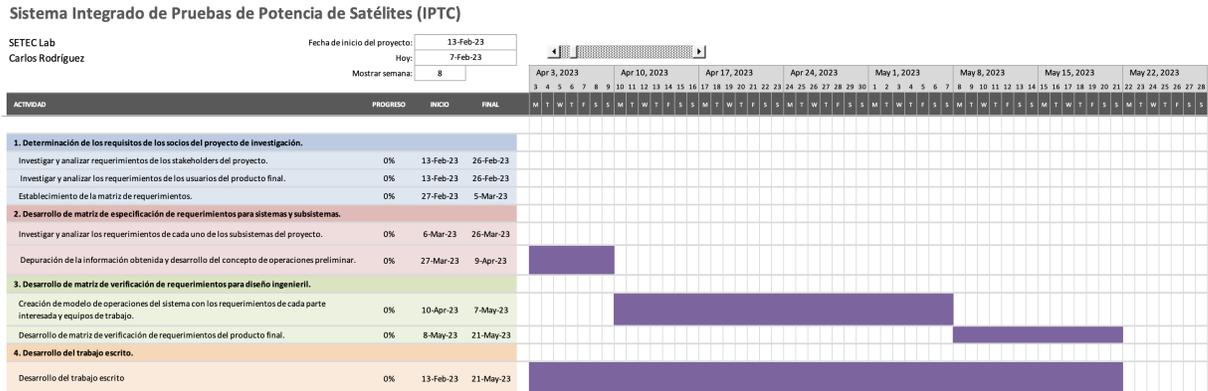


Figura 1.4: Diagrama de Gantt Semanas 8 a 14.
Elaboración Propia (Microsoft Excel).

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Ingeniería de sistemas

La Ingeniería de Sistemas es una disciplina interdisciplinaria que se centra en la concepción, diseño, implementación, operación y evolución de sistemas complejos y de gran escala. Estos sistemas pueden ser físicos, informativos, sociales, económicos o una combinación de estos [12]. La Ingeniería de Sistemas es esencial en la resolución de problemas de gran envergadura y en la optimización de procesos en diversos ámbitos, como la industria, el transporte, las telecomunicaciones y la gestión de recursos, entre otros.

La Ingeniería de Sistemas se basa en varios principios fundamentales que guían el proceso de análisis y diseño de sistemas [13]. Entre estos principios, destacan:

- **Enfoque sistémico:** Se busca comprender el sistema como un todo, en lugar de centrarse únicamente en sus componentes individuales. Este enfoque permite identificar y analizar las interacciones y relaciones entre los elementos del sistema para lograr un diseño óptimo y eficiente.
- **Ciclo de vida del sistema:** La Ingeniería de Sistemas considera todas las etapas del ciclo de vida de un sistema, desde su concepción hasta su retiro, pasando por el diseño, desarrollo, producción, operación y mantenimiento. Esto permite garantizar la viabilidad y sostenibilidad del sistema a lo

largo del tiempo.

- **Gestión de requisitos:** La identificación, análisis, especificación y validación de los requisitos del sistema son aspectos cruciales para asegurar que el sistema cumpla con las necesidades y expectativas de los usuarios y stakeholders.
- **Modelado y simulación:** La Ingeniería de Sistemas emplea técnicas de modelado y simulación para representar y analizar el comportamiento de un sistema en diferentes escenarios y condiciones. Esto permite identificar y evaluar posibles soluciones antes de su implementación.
- **Gestión de riesgos:** La identificación y mitigación de riesgos asociados a un sistema es esencial para garantizar su éxito y minimizar posibles problemas e impactos negativos.

A nivel del área aeroespacial, la ingeniería de sistemas tiene muchas aplicaciones, por ejemplo:

- **Diseño y desarrollo de vehículos espaciales:** La Ingeniería de Sistemas es fundamental en el proceso de diseño y desarrollo de vehículos espaciales, como cohetes, lanzaderas y naves espaciales, que deben cumplir con requisitos específicos de rendimiento, seguridad y fiabilidad [14]. Esto implica la integración de múltiples subsistemas, como propulsión, estructuras, aviónica y sistemas de control térmico, en un sistema coherente y eficiente.
- **Diseño y operación de satélites:** Los satélites son sistemas altamente complejos que requieren la integración de diferentes componentes, como sistemas de comunicación, propulsión, control de actitud, sensores y sistemas de energía. La Ingeniería de Sistemas es esencial en el proceso de diseño y validación de estos componentes, así como en la planificación y ejecución de las operaciones de los satélites en órbita.

Para efectos de este proyecto, se seguirá una línea similar, observando el sistema como un todo para identificar de forma correcta sus requerimientos y garantizar el correcto desarrollo del proyecto.

2.2. ISO/IEC 29148:2018

La norma ISO/IEC 29148:2018, también conocida como Requerimientos de ingeniería e ingeniería de sistemas - Especificación de requerimientos de software (SRS) [2], es una norma internacional que proporciona directrices y recomendaciones para la creación de especificaciones de requerimientos de software. Este estándar se centra en la comunicación clara y efectiva de los requerimientos entre los interesados en el proyecto, como desarrolladores, diseñadores, gerentes y clientes. A pesar de que la norma fue originalmente pensada para proyectos de software, la misma es aplicable a todo tipo de proyectos, ya que sus principios se traducen en buenas prácticas de ingeniería y gestión de proyectos.

El marco teórico de la norma ISO/IEC 29148:2018 incluye los siguientes aspectos clave:

1. Proceso de especificación de requerimientos: La norma establece un proceso para identificar, analizar, validar y documentar los requerimientos de software. Este proceso se compone de las siguientes etapas: recolección, análisis, especificación, validación y gestión de requerimientos.
2. Estructura de la norma ISO 29148:2018: La norma proporciona una estructura detallada para la Especificación de Requerimientos, que debe ser clara, precisa, verificable y trazable. La estructura incluye los siguientes componentes principales:
 - Introducción: Proporciona una visión general del documento, el propósito, el alcance y las definiciones utilizadas.
 - Descripción general del producto: Presenta una visión general del software, incluyendo sus funciones, características y limitaciones.
 - Requerimientos específicos: Detalla los requerimientos funcionales y no funcionales del software, como rendimiento, seguridad, usabilidad y fiabilidad.
 - Apéndices: Incluye información adicional, como casos de uso, diagramas de flujo de trabajo y detalles técnicos.
3. Técnicas de obtención de requerimientos: La norma sugiere varias técnicas para la obtención de

requerimientos, como entrevistas, talleres, encuestas, observación y análisis de documentos.

4. Análisis y validación de requerimientos: La norma describe las actividades y técnicas necesarias para analizar, validar y verificar los requerimientos, como la priorización, la negociación y la validación con los interesados.
5. Gestión de requerimientos: La norma proporciona directrices para la gestión de requerimientos a lo largo del ciclo de vida del proyecto, incluyendo la trazabilidad, el seguimiento y el control de cambios.

En este proyecto se siguió una estrategia de arriba hacia abajo, donde se comenzó identificando los requerimientos más generales, y luego, se fueron especializando hasta llegar a los requerimientos del sistema.

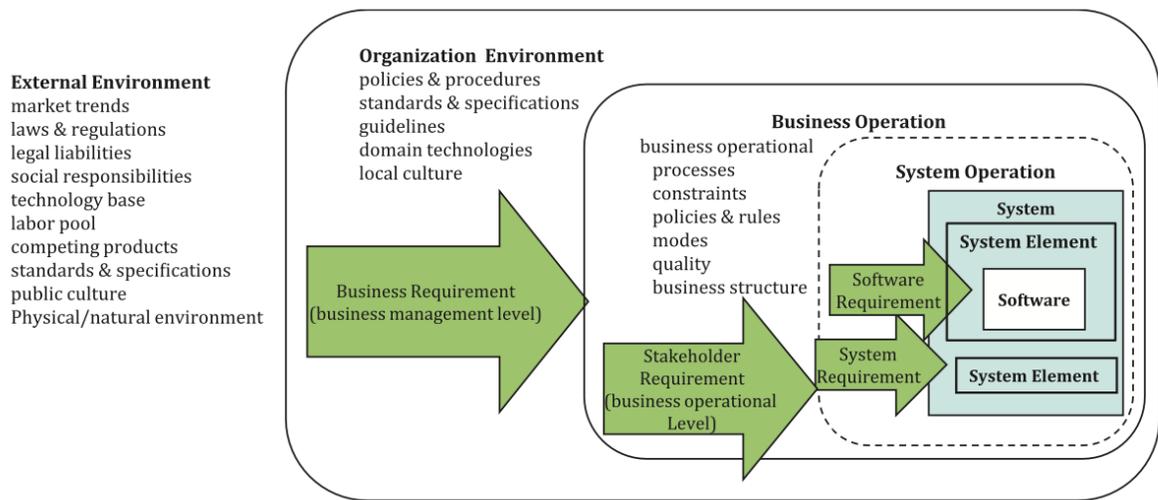


Figura 2.1: Proceso de obtención de requerimientos. Fuente:[2]

Para esto, se seguirá una metodología similar a la mostrada en la siguiente figura 2.2, donde se entenderán los requerimientos a nivel organizacional y se obtendrán los requerimientos de los socios, luego, se procederá a realizar un concepto de operaciones sobre el cuál se obtendrán los requerimientos del sistema de acuerdo con la información obtenida y los lineamientos que deriven del concepto de operaciones y la

arquitectura funcional del sistema.

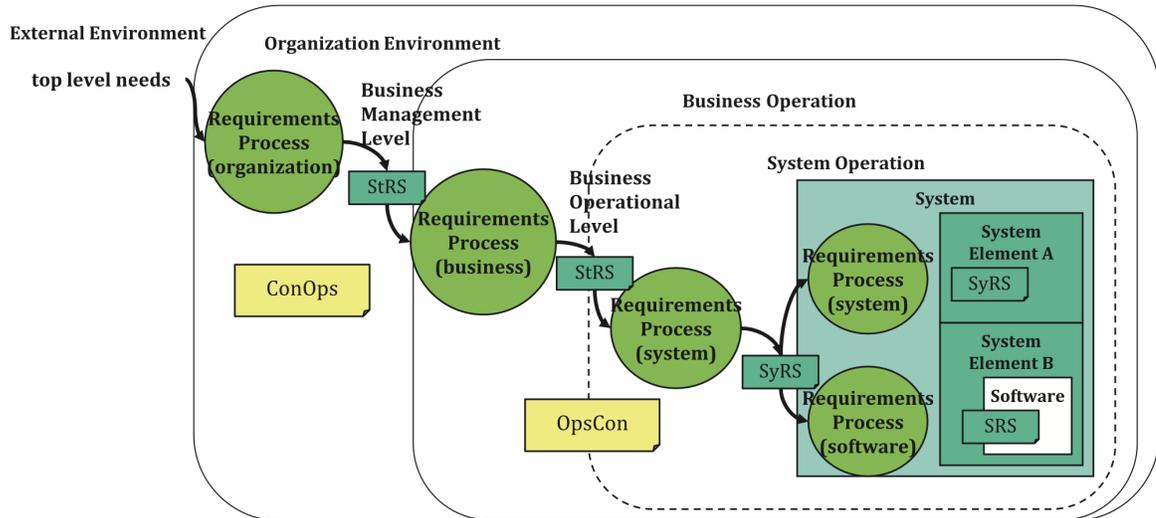


Figura 2.2: Proceso de obtención de requerimientos. Fuente:[2]

2.3. CubeSats

Los CubeSats son una clase de nanosatélites estandarizados que se desarrollaron inicialmente a principios de la década de 2000 por la Universidad Politécnica Estatal de California y la Universidad de Stanford [15]. Estos pequeños satélites tienen un tamaño y forma de cubo, con aristas típicamente de 10 cm y una masa que no supera los 1.33 kg por unidad (1U). Los CubeSats también pueden tener múltiples unidades, como 2U, 3U, 6U o 12U, que se ensamblan para formar satélites más grandes y versátiles. Su diseño modular y estandarizado ha permitido reducir costos y tiempos de desarrollo, facilitando el acceso al espacio para instituciones académicas, empresas y agencias gubernamentales.

Un CubeSat típico consta de varios componentes y subsistemas que trabajan en conjunto para cumplir con los objetivos de la misión [16]. Estos incluyen:

- Estructura:** La estructura mecánica del CubeSat proporciona soporte y protección a los componentes internos, así como puntos de montaje para los sistemas y la carga útil.

- **Sistema de energía:** Los CubeSats suelen utilizar paneles solares y baterías para generar y almacenar energía eléctrica, que se distribuye a los diferentes subsistemas a través de un sistema de control de energía.
- **Sistema de control de actitud:** Este sistema permite orientar y estabilizar el CubeSat en órbita, utilizando sensores como magnetómetros y giróscopos, y actuadores como ruedas de reacción o torques magnéticos.
- **Sistema de comunicaciones:** El sistema de comunicaciones permite transmitir y recibir datos entre el CubeSat y estaciones terrestres, utilizando antenas y transceptores de radiofrecuencia o enlaces ópticos.
- **Sistema de control de órbita:** Aunque no es común en todos los CubeSats, algunos incluyen sistemas de propulsión para realizar maniobras orbitales y controlar su posición en el espacio.
- **Carga útil:** La carga útil es el conjunto de instrumentos, sensores o experimentos que el CubeSat lleva a cabo para cumplir con los objetivos de la misión.

Gracias a su bajo costo y versatilidad, los CubeSats han encontrado aplicaciones en diversas áreas, incluyendo [17]:

- Observación de la Tierra
- Comunicaciones
- Investigación científica
- Pruebas de nuevas tecnologías espaciales
- Educación y formación

2.3.1. CubeSats en el mercado

El mercado de CubeSats se encuentra en expansión. Su demanda aumenta año a año junto con la capacidad de soluciones que pueden ofrecer, aplicaciones desde observación terrestre y espacial, hasta internet, telecomunicaciones, e investigación científica. Es por esto, que a pesar de que históricamente se han utilizado como satélites con misiones individuales, actualmente ya se desarrollan como constelaciones y en el futuro se espera que mega constelaciones de CubeSats orbiten el espacio debido a su relativa facilidad de fabricación. También, por su costo menor de desarrollo y lanzamiento son los satélites preferidos por naciones emergentes [18].

2.4. Sistemas de potencia eléctrica para CubeSats

Los CubeSats son sistemas muy compactos que, generalmente, deben llevar a cabo misiones complejas en un ambiente hostil. Estas misiones requieren que la nave espacial sea capaz de operar de manera óptima, con variables como la potencia requerida por los componentes electrónicos para operar, mantener la temperatura requerida de operación, recolectar toda la energía de los colectores del sistema para permitir la continuación de la misión, entre otros.

Es por esto, que el Subsistema de Potencia Eléctrica del CubeSat es considerado un integrante esencial en estos sistemas. Los sistemas básicos de un sistema eléctrico de potencia (EPS) consisten en los paneles fotovoltaicos que funcionan como fuente principal de energía, el sistema de almacenamiento de energía, los convertidores de potencia electrónicos y el sistema de distribución de potencia [3].

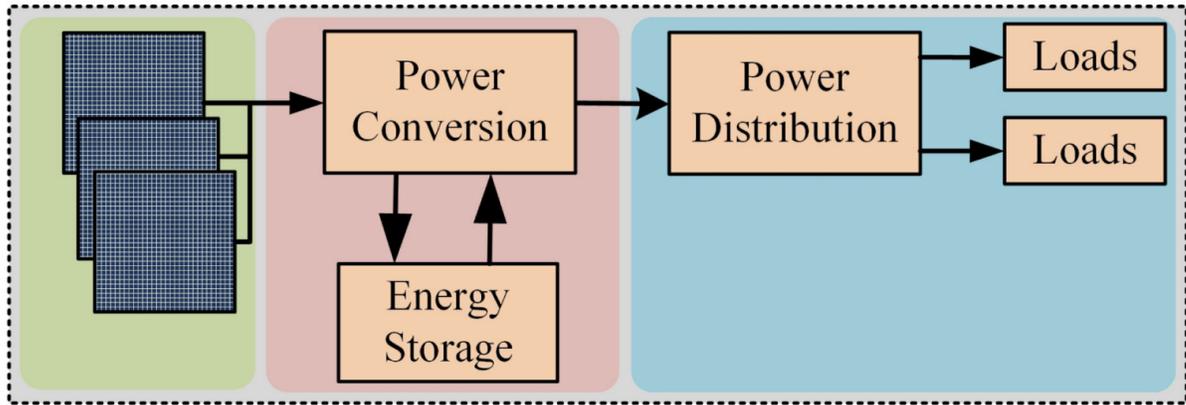


Figura 2.3: Componentes básicos del EPS de los CubeSats. Fuente:[3]

Basado en cómo la energía llega a la carga, las arquitecturas de los sistemas eléctricos de potencia se clasifican como centralizadas o distribuidas. Si la regulación del voltaje se realiza en las placas de los subsistemas, entonces se está utilizando una arquitectura distribuida. Por el contrario, si la regulación del voltaje se lleva a cabo en el subsistema EPS, es una arquitectura centralizada. Las arquitecturas distribuidas son predominantes en satélites medianos y grandes, mientras que las centralizadas se utilizan ampliamente en satélites pequeños [19]. Este proyecto se centrará especialmente en satélites con arquitecturas centralizadas.

Sistema de alimentación fotovoltaica

Los paneles solares en CubeSats son fundamentales para generar la energía eléctrica necesaria para alimentar los diversos subsistemas y cargas útiles durante su misión en órbita [17]. Estos paneles convierten la energía solar en energía eléctrica a través del efecto fotovoltaico, aprovechando la abundante radiación solar en el espacio.

El efecto fotovoltaico es el fenómeno por el cual los materiales semiconductores, como el silicio, absorben la luz solar y generan una corriente eléctrica [20]. Cuando la luz solar incide sobre un panel solar, los fotones de la luz son absorbidos por los átomos del material semiconductor, lo que provoca la liberación

de electrones. Estos electrones se desplazan hacia un electrodo, generando una corriente eléctrica que puede ser utilizada para alimentar los sistemas del CubeSat.

Existen varios tipos de paneles solares utilizados en CubeSats, que se diferencian principalmente por su eficiencia, costo y requisitos de espacio y peso [21]:

- **Celdas de silicio (Si):** Este tipo de panel solar ofrece una alta eficiencia de conversión de energía solar en energía eléctrica (alrededor del 25 %) pero también es más costoso y pesado en comparación con otras tecnologías.
- **Celdas de galio arsénico(Ga-As):** Estos paneles solares tienen una eficiencia de conversión ligeramente inferior (aproximadamente 21.8 %) en comparación con los paneles de silicio monocristalino, pero son más económicos y tienen un menor peso.
- **Triple unión Ga-As:** El uso de celdas solares de múltiples uniones es ideal, ya que proporcionan una distribución adecuada de la irradiancia solar. Se ha demostrado que las celdas de triple unión son más fáciles de fabricar que las celdas de múltiples uniones superiores y son más eficientes que las celdas de una sola unión [22]. Los paneles solares de uniones múltiples de galio arsénico ofrecen una eficiencia de conversión más baja (aproximadamente 33.8 %) pero son más ligeros y flexibles, lo que los hace adecuados para aplicaciones donde el peso y el espacio son limitantes.

La configuración y el despliegue de los paneles solares en CubeSats pueden variar según las necesidades de energía y las restricciones de tamaño y peso de la misión [17]:

- **Paneles solares fijos:** Los paneles solares pueden estar montados de manera fija en las caras externas del CubeSat. Esta configuración es simple y de bajo costo, pero puede limitar la cantidad de energía generada debido al área de superficie disponible.
- **Paneles solares desplegados:** Para aumentar la cantidad de energía generada, los CubeSats pueden utilizar paneles solares desplegables, que se extienden desde el cuerpo del satélite una vez que se encuentra en órbita. Estos paneles permiten una mayor superficie para la captación de energía

solar y, por lo tanto, pueden generar más energía que los paneles fijos. Sin embargo, esta configuración es más compleja y puede tener un costo y un peso adicionales debido a los mecanismos de despliegue y a los componentes adicionales necesarios.

Sistema de convertidores de potencia

Los convertidores de energía son componentes clave en los sistemas de potencia de nanosatélites, como los CubeSats, para garantizar una conversión eficiente y regulada de la energía eléctrica generada por los paneles solares a niveles de voltaje y corriente adecuados para los diferentes subsistemas y cargas útiles del satélite [3].

Sistema de almacenamiento de energía

El subsistema de almacenamiento de energía en CubeSats es un componente crítico que permite almacenar la energía eléctrica generada por los paneles solares y suministrarla a los diferentes subsistemas y cargas útiles del satélite cuando sea necesario. Este subsistema es esencial para garantizar la continuidad de la operación del satélite, especialmente durante las fases de eclipse, cuando los paneles solares no pueden generar energía debido a la falta de luz solar.

Las baterías son la principal tecnología utilizada para almacenar energía en CubeSats. Existen varios tipos de baterías que pueden emplearse en CubeSats, cada una con sus propias ventajas y desventajas. Algunos de los tipos de baterías más comunes incluyen [17], [23]:

- **Baterías de níquel-cadmio (NiCd):** Son baterías recargables y robustas, pero tienen una densidad de energía relativamente baja y pueden sufrir del "efecto memoria", lo que puede limitar su vida útil.
- **Baterías de níquel-hidruro metálico (NiMH):** Ofrecen una mayor densidad de energía que las baterías NiCd y no sufren del efecto memoria, pero pueden tener una vida útil más corta.
- **Baterías de iones de litio (Li-ion):** Son populares en CubeSats debido a su alta densidad

de energía, larga vida útil y bajo peso. Sin embargo, requieren circuitos de protección para evitar sobrecargas y descargas excesivas.

- **Baterías de polímero de litio (LiPo):** Son similares a las baterías Li-ion, pero utilizan un electrolito de polímero en lugar de líquido. Son más ligeras y flexibles, pero pueden ser más susceptibles a daños mecánicos y térmicos.

La gestión y control de las baterías en el subsistema de almacenamiento de energía es crucial para garantizar un funcionamiento seguro y eficiente. Un sistema de gestión de baterías (BMS) es responsable de monitorear y controlar el estado de carga de las baterías, protegerlas contra sobrecargas y descargas excesivas y equilibrar las celdas para maximizar su vida útil y rendimiento. El BMS también puede comunicarse con otros subsistemas del CubeSat para ajustar el consumo de energía y la generación de energía según sea necesario.

2.5. Fallas en sistema de potencia de CubeSats y módulo de pruebas

Como se mencionó en la sección del planteamiento del problema, el sistema de potencia eléctrica (EPS) en CubeSats genera alrededor de un 40% de las fallas críticas en estos satélites, siendo esta la principal causa de fallo de CubeSats en general. Para entender las fallas del EPS de los CubeSats, primero debemos entender su composición y funcionamiento. El EPS funciona como el corazón de un CubeSat. Puede entenderse como una micro red de transmisión eléctrica con fuentes de energía primaria recargables, control y regulación de potencia, sistemas de distribución de potencia y sistemas de protección. La principal fuente de energía para CubeSats es energía fotovoltaica con baterías de iones de litio que se usan típicamente como una fuente de energía recargable [24]. Por lo que es importante observar que el sistema de potencia eléctrico de un CubeSat se divide en varios subsistemas más pequeños y sencillos, siendo los más importantes los subsistemas de baterías, transmisión, control de potencia y los arreglos solares que permiten la captación

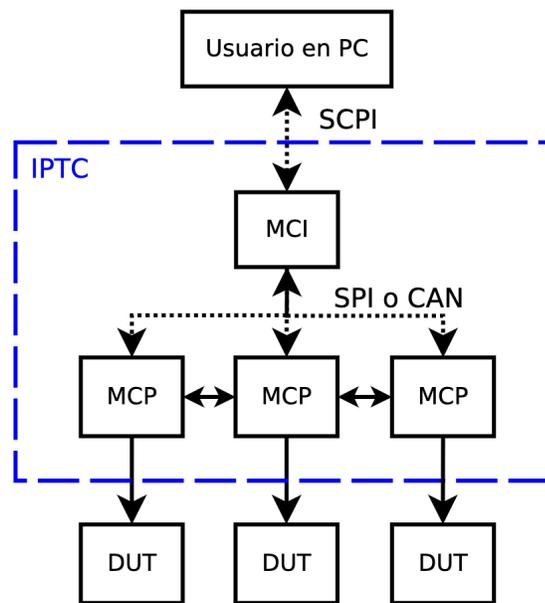
de la energía.

Uno de los principales problemas es que los CubeSats son en su mayoría todos diferentes, cumplen misiones únicas y se diseñan de la forma óptima para la realización de sus funciones específicas. Es por esto, que desarrollar un sistema estándar de características específicas para el desarrollo de un EPS no es una opción técnicamente viable. Tomando por ejemplo uno de los subsistemas del EPS, en un estudio de mercado sobre fabricantes de baterías para CubeSats se identificaron dieciséis fabricantes. Con las baterías siendo usadas como parte de un EPS o en un paquete dedicado de baterías. Las tecnologías más utilizadas son celdas de litio. Sin embargo, existe una gran variabilidad en los productos respecto a su densidad energética, funcionalidades y la información que proveen los fabricantes del equipo original (OEM) [25]. Este problema se presenta con todos los diferentes subsistemas del EPS, haciendo el testeo la única solución viable de garantizar el buen funcionamiento del sistema una vez sea puesto en órbita.

Las condiciones de operación son también importantes a la hora de diseñar un EPS ya que estas pueden generar fallas dentro del mismo. El EPS se encarga del manejo de la fuente de energía primaria del CubeSat que proviene de las celdas fotovoltaicas. Sin embargo, el CubeSat no siempre está expuesto a la luz del sol. En cualquier momento dado, los niveles de radiación en cualquier superficie de las caras del satélite dependen de (i) la posición relativa entre el sol, el CubeSat y cualquier cuerpo que pueda ocultar la luz como la Tierra y la Luna, y (ii) el posicionamiento de la nave espacial respecto a un marco de referencia. Es por esto, que el vector proveniente de los rayos del Sol no es siempre perpendicular a las celdas fotovoltaicas y, por tanto, la distribución de energía solar no es uniforme en las caras del CubeSat. Además, los tiempos de exposición al sol del CubeSat dependen de la órbita particular que esté realizando sobre la Tierra, lo que genera que la producción de potencia no sea uniforme a través de las órbitas [26]. Dado que el consumo de potencia tampoco es uniforme, se debe tener especial cuidado de no drenar la carga eléctrica de las baterías de modo que sea imposible para el satélite seguir operando, sin embargo, tantas variables pueden complicar los cálculos para determinar si el EPS puede fallar por mal manejo energético. Este problema se mitiga por medio de simulaciones que permitan someter al EPS a demandas de carga y descarga eléctrica por parte de la electrónica y los paneles solares para garantizar su correcta

operación en condiciones similares a las que enfrentará en el espacio.

El proyecto que realizará el SETEC desarrollará un sistema integrado y modular de pruebas para sistemas de potencia de CubeSats o “Integrated Power Testing module for CubeSats” (IPTC), el cual permitirá simular las condiciones reales a las que se enfrentarán celdas fotovoltaicas por medio de un Simulador de Matriz Solar (SAS, por sus siglas en inglés) que será operado por un Módulo Configurable de Potencia (MCP), quién será a su vez capaz de simular demandas y cargas energéticas para testear el EPS en las condiciones más cercanas a las reales posibles. El sistema tendrá también un Sistema de Control e Interfaz (SCI) que manejará la interacción con el usuario y la comunicación y control de los MCP [4].



MCI: modulo de control e interfaz
 MCP: modulo configurable de potencia
 SCPI: standard commands for programmable instruments
 DCU: device under test

Figura 2.4: Diagrama general de entradas y salidas al MCP. Fuente:[4]

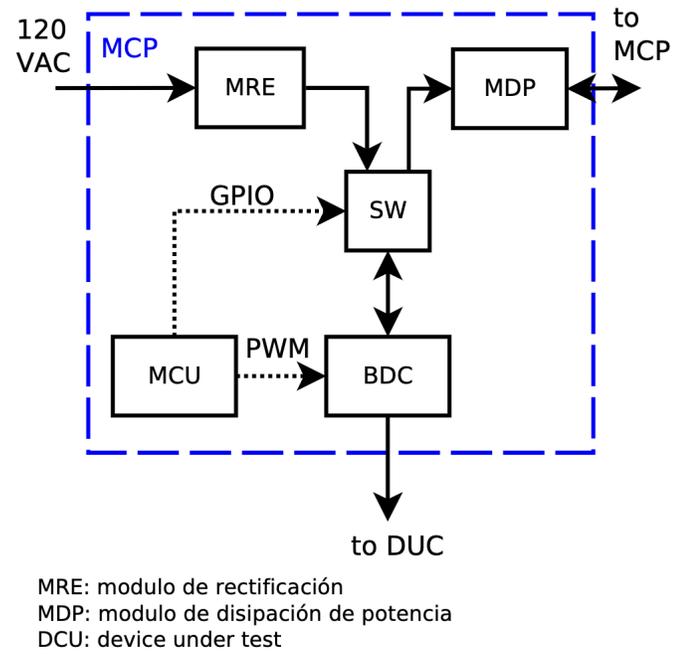


Figura 2.5: Diagrama general de entradas y salidas para los módulos de testeo. Fuente:[4]

Capítulo 3

Obtención de requerimientos de los socios del proyecto

El presente capítulo tiene como objetivo presentar el estudio realizado a los socios del proyecto para la obtención de sus requerimientos.

En él, se caracterizan los tipos de socios del proyecto, sus requerimientos, los requerimientos operacionales del sistema, los del usuario y los requerimientos del ciclo de vida propuesto para el proyecto. Al final, se presenta una matriz con todos los requerimientos obtenidos de este estudio.

3.1. Descripción General

El IPTC es un sistema complejo, requiere de varios subsistemas trabajando en conjunto y siendo operados e integrados de forma harmónica para permitir su correcto funcionamiento. Además, añadiendo otro nivel de complejidad al proyecto, este debe cumplir con las expectativas de los desarrolladores, las necesidades de las Instituciones socias que están a cargo del proyecto y los usuarios finales del producto que se va a generar. El nivel de complejidad técnica del proyecto, sumado a las necesidades de todos los

involucrados en él, generan un ambiente difícil de manejar para cumplir con las expectativas del producto desde varios frentes si no se tienen bien definidas todas las necesidades de los involucrados en el proyecto.

Para este fin, según lo establecido en la norma ISO 29148:2018. Se redactó un documento de Especificación de Requerimientos de los Socios (StRS) [A](#) por sus siglas en inglés. Las siguientes secciones de este capítulo desarrollan los procedimientos que se siguieron para generar los contenidos de este documento.

3.2. Caracterización de los socios del proyecto IPTC

Para la caracterización de los socios del proyecto primero, se procedió a dividir cada uno de los socios dentro de una clase, en este caso, los desarrolladores, quienes son a su vez: los dueños del proyecto, que velan por él según sus requerimientos de alto nivel y los encargados de llevar a cabo el diseño, integración, documentación y eventual ensamblaje del proyecto. Y los clientes, que serán los usuarios finales del producto generado.

Para el desarrollo de la caracterización de socios y sus resultados, se procedió a realizar una encuesta tanto a los desarrolladores como a los clientes para entender sus necesidades. En el caso de los desarrolladores ya se manejaban sus contactos desde la concepción del proyecto, sin embargo, dado que los clientes son personas en un nicho altamente especializado se recurrió a tomar los contactos de personas que ya se conocía de antemano que trabajan con estos sistemas.

3.2.1. Tipos de socios del proyecto

- Desarrolladores: Los desarrolladores del IPTC pertenecen todos a cuatro instituciones académicas o laboratorios de estas.
 1. Delta Lab del Instituto Tecnológico de Costa Rica.
 2. Laboratorio de Sistemas Espaciales (SETEC Lab) del Instituto Tecnológico de Costa Rica.
 3. Instituto Tecnológico de Kyushu (Kyutech)

4. Universidad Anhalt de Ciencias Aplicadas.

Al pertenecer a instituciones académicas y a laboratorios especializados, para los fines de este proyecto, se asume que los desarrolladores tienen un alto grado de conocimientos técnicos. Estos conocimientos vienen en una amplia gama de grados académicos, desde estudiantes de pregrado hasta doctorados y técnicos. Los desarrolladores tendrán personas con conocimientos diversos de ingeniería como: software, mecánica, electrónica, electricidad, entre otros.

- **Clientes:** Los clientes del proyecto pertenecen a diferentes tipos de organizaciones, entre estas se encuentran: laboratorios de investigación académicos y gubernamentales, ministerios de tecnología y telecomunicaciones y empresas de desarrollo de componentes para CubeSats, además de empresas de desarrollo de misiones espaciales. Las personas pertenecientes a estas organizaciones tienen también un alto grado de especialización técnica en el área perteneciente a sistemas de potencia de CubeSats, además de contar con perfiles académicos y técnicos, también se entrevistó a personas con perfiles más enfocados a manejo de proyectos.

3.2.2. Alcance de los perfiles de socios del proyecto

Todos los socios que se considerarán para este proyecto están relacionados con el área de desarrollo de sistemas de pruebas para subsistemas de potencia en CubeSats. Dentro de esta área se encuentran relacionadas actividades de diseño, desarrollo, manufactura y testeo de componentes para los subsistemas de potencia de los CubeSats. Estas actividades están relacionadas con divisiones de ingeniería, investigación y desarrollo, y manufactura. A nivel externo, también se relaciona con las entidades que se relacionan directamente con el área de negocios relacionados a estos sistemas, como: procuradores de componentes y clientes que compran unidades de testeo para CubeSats.

Por tanto, el sistema a desarrollar sustentará la industria de testeo de subsistemas de potencia para CubeSats. Esto implica entonces que permitirá el desarrollo de actividades de ingeniería, investigación y desarrollo, y manufactura para estos subsistemas, Además, deberá cumplir con las necesidades de los

desarrolladores de CubeSats que requieren de unidades de testeo que sean confiables y precisas para sus unidades antes de ser enviadas al espacio. Este sistema en especial, se centrará en desarrollar las pruebas asociadas a simulación y caracterización de celdas fotovoltaicas para CubeSats, simulación de cargas variables de potencias y un simulador de ciclos de carga y descarga para sistemas de almacenamiento de energía como baterías.

3.2.3. Matriz de socios del proyecto

La matriz de socios del proyecto, de acuerdo a lo establecido en las subsecciones anteriores es la siguiente:

Tabla 3.1: Matriz de socios del proyecto

Socios	Descripción	Información de contacto
Desarrolladores		
SETEC Lab	Johan Carvajal Godinez	johcarvajal@itcr.ac.cr
Delta Lab	Juan José Rojas	juan.rojas@tec.ac.cr
Kyushu Institute of Technology	Pooja Lepcha	lepcha.pooja586@mail.kyutech.jp
Anhalt University of Applied Sciences	Hugo Sánchez	husanchez@itcr.ac.cr
Clientes		
National University (Mongolia)	Turtogtokh Tumenjargal	turtogtox@gmail.com
Nepal Ministry of Technology	Abhas Maskey	editor@madeinepal.com
Agencia Espacial de Paraguay	Adolfo Jara	javier.jara-cespedes758@mail.kyutech.jp
National Astronomical Research Institute of Thailand	Phongsakorn Meemak	phongsakornmyart@gmail.com
Philippines Space Agency	Izrael Bautista	izrael.bautista@philsa.gov.ph
California Polytechnical Institute	Pauline Faure	pfaure@calpoly.edu
Honduras National Autonomus University	Reinel Galindo	rosales.reynel-josue457@mail.kyutech.jp
Buthan Telecommunications Ministry	Kiran Pradhan	kkpradhan@dit.gov.bt

3.2.4. Método de recolección de requerimientos de los socios

Para la obtención de requerimientos inicial, se desarrolló una encuesta enviada a los socios del proyecto, tanto desarrolladores como clientes.

Rol de encuestados en el desarrollo de sistemas de potencia para CubeSats

Primero, se preguntó el rol de los encuestados en sus proyectos relacionados con CubeSats. De esta pregunta resultó que aproximadamente el 46 % de las personas encuestadas son investigadores en temas referentes a CubeSats, un 18 % se identificaron como gerentes de proyecto, un 27 % se identificaron tanto como investigadores como gerentes de proyecto y un 9 % se identifican como desarrolladores de CubeSats.

Los resultados se muestran en la siguiente figura:

1. You are a:

[More Details](#)

● Researcher	8
● Developer	1
● Integrator	0
● Seller	0
● Project Manager	5
● Other	0

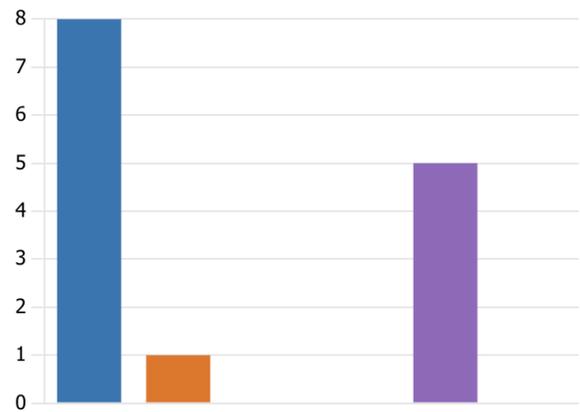


Figura 3.1: Rol de entrevistados en el desarrollo de sistemas de potencia para CubeSats. Fuente: Elaboración Propia (Microsoft Forms).

Además, se comprobó que todas las personas entrevistadas contaban con un alto grado de conocimiento académico y técnico. Todas las personas entrevistadas cuentan con un grado de bachillerato universitario o superior como lo muestra la siguiente tabla:

Tabla 3.2: Título de las personas entrevistadas

Número de personas	Título
2	Dr.
2	Investigador(a) de satélites.
1	Ingeniero(a) de sistemas de satélites
1	Ingeniero(a)
1	Coordinador(a)
2	Profesor(a) de universidad
1	Estudiante de doctorado

Soluciones para pruebas de sistemas de potencia de Cubesats y usos previstos

Seguidamente, la encuesta indagó cómo utilizarían estos expertos el sistema IPTC. A continuación, se muestran los usos propuestos en la encuesta y el porcentaje de encuestados que expresaron su intención de operar el sistema de esa forma entre paréntesis. La encuesta permitía marcar más de una opción.

1. Para testear y simular celdas fotovoltaicas(30%)
2. Para testear bancos de baterías en satélites pequeños (30%)
3. Para simular el consumo de cargas en otros subsistemas de satélites (34%)
4. Para testear los sistemas de potencia de experimentos para la Estación Espacial Internacional (6%)

A continuación se muestra la representación gráfica de estos datos.

7. How would you use the Integrated Power Tester for Cubesats? (multiple choices allowed)

More Details

- To test solar array simulators (S... 10
- To test banks on EPS for small s... 10
- To emulate the power consumpt... 11
- To test the power system of an l... 2

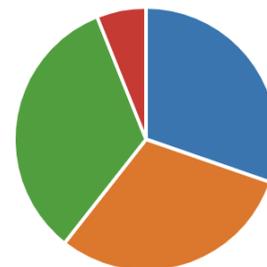


Figura 3.2: Usos previstos por los socios del IPTC. Fuente: Elaboración Propia (Microsoft Forms).

La siguiente sección permitía a las personas encuestadas sugerir otros usos para un tester integrado de pruebas para sistemas de potencia de CubeSats. Estas fueron las respuestas recolectadas:

- Cálculo de presupuesto de potencia.
- Calibrar las mediciones de sensores de corriente y voltaje.
- Testear límites de protección de sobrevoltaje y sobrecorriente en un sistema.
- Testeo de situaciones inesperadas como, corto circuitos, y "latch-ups" de evento único.

Además, de las personas encuestadas solo un 20% expresó tener una solución que permitiera las funciones propuestas por el IPTC planteado en este proyecto de investigación.

6. Do you have a similar solution?

[More Details](#)

● Yes	2
● No	8
● Other	0

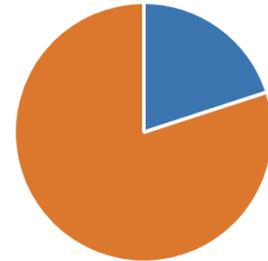


Figura 3.3: Posesión de soluciones similares al IPTC. Fuente: Elaboración Propia (Microsoft Forms).

Expectativas de calidad, desempeño y usabilidad del IPTC

Los socios también caracterizaron algunas de sus expectativas sobre el desempeño del sistema. Dentro de estas se encontraron:

- Que se puedan seleccionar los múltiplos y submúltiplos de las variables (A, mA, etc.).
- Que sea compatible con los sistemas de potencia para CubeSat estándar.

- Debe cumplir con los estándares para garantizar que las mediciones sean válidas para proveedores de lanzamientos espaciales y otras plataformas como estaciones espaciales.
- El sistema debe ser preciso y fiable.
- Que sea fácil darle mantenimiento.

Sobre las expectativas de uso del sistema las personas encuestadas mencionaron:

- Que sea modular.
- Que también se pueda utilizar como un aparato único, es decir, sin la necesidad de una computadora.
- Que pueda tener compatibilidad con aplicaciones móviles.
- Que sea fácil de usar.
- Que tenga una interfaz gráfica amigable con el usuario.

Sobre el software para testeo y diseño, la mayoría de los encuestados expresó su deseo de poder utilizar herramientas de software libre como Python(62%), un 31% expresó su deseo de poder integrar el hardware del IPTC con la herramienta LabView de National Instruments y un 8% expresó su deseo de usar otras herramientas.

10. What design and testing tools and software would you prefer for the IPTC?

[More Details](#)

● LabView	4
● Python or any other Open Sourc...	8
● Other	1

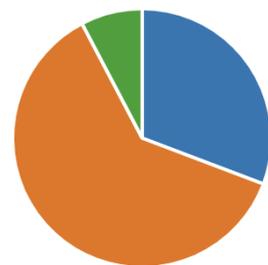


Figura 3.4: Herramientas de software para el IPTC. Fuente: Elaboración Propia (Microsoft Forms).

Ambiente de uso previsto

Por último, la encuesta se centra en el ambiente donde se usará el sistema para poder delimitar los requerimientos que tendrá el sistema a nivel de protección externa, interfaces con el mundo externo, entre otros.

La primera consideración sobre el ambiente al que será sometido el sistema se refiere a sus dimensiones físicas. Un 9% de las personas encuestadas esperan que el producto final tenga un volumen de 2m^3) o menor, el 45% espera un volumen de 1m^3) o menor, un 27% espera un volumen final de 0.2m^3) o menor y un 18% expresó que esperaba otro volumen.

13. The volumen you expect the tester would have is?

More Details

● Less than 2 cubic meters	1
● Less than 1 cubic meters	5
● Less than 0.2 cubic meters	3
● Other	2

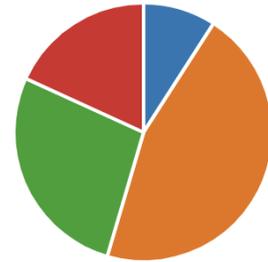


Figura 3.5: Volumen esperado para el IPTC. Fuente: Elaboración Propia (Microsoft Forms).

Sobre el espacio físico donde las personas encuestadas planean colocar el IPTC la encuesta arrojó dos espacios principales: laboratorios de investigación (73%) y cuartos limpios (27%). La encuesta tomaba en cuenta otros tipos de instalaciones pero ninguna persona las eligió, por lo que se considerarán estos dos tipos de instalaciones a la hora de desarrollar el proyecto.

12. If you get an IPTC, where would you install it?

More Details

- Research facility 8
- Manufacturing facility 0
- Clean room facility 3
- on a FabLab 0
- Other 0

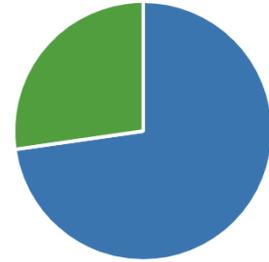


Figura 3.6: Instalaciones para el IPTC. Fuente: Elaboración Propia (Microsoft Forms).

Por último, se deben considerar las ubicaciones geográficas donde será instalado el IPTC. Estas se pueden obtener de la matriz de socios 3.1 desarrollada anteriormente en este capítulo. Basados en la información de las personas encuestadas se elaboró la siguiente tabla de países y regiones donde será utilizado el sistema. Es importante notar, que el producto final, probablemente sea utilizado en más países y regiones que las enlistadas en la siguiente tabla.

Tabla 3.3: Países y regiones de uso del IPTC

País	Región
Costa Rica	Centroamérica
Japón	Asia Pacífico
Alemania	Europa
Mongolia	Asia
Nepal	Sudeste Asiático
Paraguay	Sudamérica
Tailandia	Sudeste Asiático
Filipinas	Sudeste Asiático
Estados Unidos	Norteamérica
Honduras	Centroamérica
Bután	Asia

3.3. Caracterización de requerimientos

En esta sección explica cómo de los datos tomados de la encuesta se utilizaron, en conjunto con datos obtenidos de otras fuentes para generar el documento de especificación de requerimientos de socios [A](#).

3.4. Requerimientos de gestión empresarial

A nivel de gestión empresarial se examinaron el ambiente empresarial en el cual se desarrollará el proyecto, la misión, metas y objetivos del proyecto, el modelo de negocios que se utilizará una vez esté construido el producto final y por último, el ambiente de información en el cual se desarrollará y se desenvolverá el proyecto.

3.4.1. Ambiente empresarial

A nivel del ambiente empresarial en el que se desarrolla el proyecto se estudiaron tanto factores internos como externos.

Como factores externos principales se tienen:

- **Tendencias de mercado:** La demanda por los CubeSats es cada vez mayor, la tasa de crecimiento compuesto anual de este mercado es de 15.1%, y tenía un mercado de 857.4 millones de dólares estadounidenses en el 2021.[\[27\]](#). A pesar de este aumento de demanda, las soluciones comerciales existentes para la prueba de sistemas de potencia de estas naves espaciales generalmente están pensadas para satélites de mucho mayor tamaño como los convencionales, lo que genera un océano azul (un mercado con mucha demanda y poca competencia) para el desarrollo del proyecto propuesto.

A nivel de factores internos considerados se tienen:

- **Cultura organizacional:** A nivel de cultura organizacional, el desarrollador principal de este proyecto es el TEC, donde los demás desarrolladores actúan como soporte o desarrollan subsistemas

del producto final.

Al ser el TEC el desarrollador principal, y más específicamente el SETEC Lab en conjunto con el Laboratorio Delta se debe tener en cuenta cómo funcionan estos laboratorios. Para efectos de este proyecto, el SETEC Lab actúa como el socio comercial del proyecto, donde éste es el encargado de ofrecer el proyecto a otros y se encarga de asegurarse que se cumplan las expectativas de todos los socios, mientras que el Laboratorio Delta, es el encargado de desarrollar el producto final y sus subsistemas. El producto final será codesarrollado por los investigadores principales de los laboratorios y los asistentes de estos. Por lo que estarán involucrados estudiantes de ingeniería y profesores con grado de doctorado en el desarrollo del proyecto.

- **Estrategia de negocios:** La visión final para este producto es que sea un open source, es decir, que cualquiera pueda acceder a la documentación de este y pueda construir el suyo propio y aportar al desarrollo futuro del producto. Sin embargo, se espera que el proyecto pueda generar ingresos a los laboratorios que lo diseñaron y desarrollaron por medio de la oferta del servicio de construcción del producto para aquellas personas que quieran evitar construirlo por su cuenta.
- **Recursos disponibles:** A nivel de recursos, el proyecto cuenta con la infraestructura de los laboratorios desarrolladores, además del conocimiento de los investigadores principales y un presupuesto destinado al desarrollo del producto.

Tabla 3.4: Presupuesto para desarrollo del IPTC

Descripción	Presupuesto
Materiales y productos metálicos	₡ 100,000.00
Materiales y productos eléctricos - telefónicos y de cómputo	₡ 350,000.00
Herramientas e instrumentos	₡ 800,000.00
Repuestos y accesorios	₡ 170,000.00
Becas estudiante asistente especial	₡ 880,000.00
Maquinaria y equipo diverso	₡ 400,000.00
Presupuesto total	₡ 2,700,000.00

3.4.2. Misión, metas y objetivos

El objetivo final del desarrollo de este proyecto es crear una plataforma de testeo para sistemas de potencia open source de uso libre para CubeSats que varían desde 1U hasta 3U. Delta Lab y SETEC Lab están desarrollando este producto para proporcionar a los desarrolladores de CubeSat en todo el mundo una herramienta útil para probar su tecnología que ayudará al avance científico y tecnológico. La documentación sobre cómo producir el IPTC será gratuita, sin embargo, si un cliente lo desea, SETEC Lab y Delta Lab podrían cobrar una tarifa por producir y enviar un IPTC.

Los objetivos definidos del proyecto, según lo presentado a la Oficina de Investigación y Desarrollo del TEC, son:

- **Objetivo General:** Desarrollar un sistema de prueba integrado y modular para sistemas de energía en CubeSats.
- **Objetivo Específico 1:** Desarrollar un Módulo de Energía Configurable (CPM) que pueda funcionar como un simulador de matriz solar, cargador de batería, descargador de batería o carga electrónica, según sea necesario.
- **Objetivo Específico 2:** Desarrollar un Módulo de Control e Interfaz (ICM) que sea responsable de la interacción del usuario, la comunicación y el control de los CPM.
- **Objetivo Específico 3:** Desarrollar un chasis adecuado para integrar los dispositivos que conforman el sistema.
- **Objetivo Específico 4:** Integrar el sistema de prueba para sistemas de energía en CubeSats.

Además, debe tenerse en cuenta que, incluso si estos son los únicos objetivos presentados oficialmente al TEC, como se mencionó anteriormente, el motivo de este proyecto es crear un tester capaz de resolver las necesidades de las partes interesadas. Como tal, después de que se cumplan estos objetivos, también debería llevarse a cabo una fase de prueba y un proceso de documentación para que otros comprendan

cómo se desarrollaron e integraron estos módulos de prueba, permitiéndoles construir los suyos propios o tener Delta Lab y SETEC Lab ensamblar el probador y enviarlo a ellos. Por lo cual, se considerarán dos objetivos específicos adicionales:

- **Objetivo Específico 5:** Probar el IPTC integrado en condiciones normales y extremas para asegurar que funcione según lo esperado y sea seguro de usar, siguiendo la norma de prueba ISO 17025:2005.
- **Objetivo Específico 6:** Recopilar y documentar toda la información necesaria para el ensamblaje y funcionamiento del IPTC en forma de un manual de usuario.

3.4.3. Modelo de negocios

El proyecto de dispositivos de prueba para subsistemas de potencia de CubeSats se basa en un modelo de negocio que incluye el desarrollo de una plataforma de uso libre, la cual puede ser utilizada por aquellos interesados en construir sus propios dispositivos. Adicionalmente, el laboratorio proporcionará el servicio de ensamblaje y envío del producto a las partes interesadas.

El enfoque principal del proyecto es dirigirse a desarrolladores y fabricantes de CubeSat, así como instituciones de investigación y universidades involucradas en proyectos similares. Los servicios y productos ofrecidos abarcan la plataforma de código abierto y los dispositivos de prueba en sí.

El proyecto apunta a países con una fuerte presencia en la industria de CubeSat, como Estados Unidos, Japón y Europa, así como a naciones y regiones con ecosistemas espaciales emergentes, incluidos América Latina, Asia-Pacífico y África, que están creando sus primeros CubeSats.

Los canales de distribución incluyen relaciones comerciales establecidas con instituciones académicas involucradas en proyectos similares y mediante la publicación de artículos científicos que detallen la investigación, los cuales estarán disponibles para el público y la industria. El proyecto tiene como objetivo establecer alianzas con otras instituciones académicas y actores de la industria, al tiempo que fortalece las relaciones existentes entre TEC y otras organizaciones, construyendo así una sólida red y aumentando

la visibilidad de los dispositivos de prueba.

Finalmente, el modelo financiero y de ingresos del proyecto contempla la venta de dispositivos de prueba y los ingresos por el servicio de construcción y envío de los dispositivos. Este enfoque busca generar ingresos adicionales para financiar las actividades de investigación de los laboratorios.

3.4.4. Entorno de información

- **Portafolio de proyectos:** El proyecto de dispositivos de prueba para subsistemas de energía de CubeSat forma parte del portafolio general de investigación y desarrollo de SETEC Lab y Delta Lab, ambos del Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC), el Instituto Tecnológico de Kyushu y la Universidad de Ciencias Aplicadas de Anhalt. La prioridad y posición de este proyecto en el portafolio se determinan por su potencial para contribuir a la generación de conocimiento y al avance de la ciencia y la tecnología.

Dentro de los proyectos desarrollados por SETEC Lab y el Laboratorio Delta se encuentran: el proyecto Irazú que fue el primer CubeSat desarrollado en Centroamérica [7], el proyecto GW-Sat que fue otro CubeSat codesarrollado por el SETEC Lab y la Universidad Geore Washington de Estados Unidos [28]. Además, el Laboratorio Delta ha realizado varios proyectos que tienen que ver con electrónica, como proyectos de automatización y manejo de recursos por medio de la internet de las cosas (IoT) [29], proyectos de desarrollo de subsistemas para CubeSats y estaciones terrestres de comunicaciones para CubeSats, entre otros. Esta experiencia será vital para el correcto desarrollo del proyecto propuesto.

- **Plan a largo plazo del sistema:** El proyecto de dispositivos de prueba para subsistemas de potencia de CubeSats se alinea con el plan a largo plazo del sistema de los laboratorios involucrados. El proyecto seguirá las pautas establecidas de infraestructura y arquitectura del sistema, y las restricciones se considerarán al tomar decisiones de diseño. El proyecto será llevado a cabo principalmente por estudiantes que trabajan en su tesis de graduación, así como por asistentes bajo la orientación

de los profesores de los laboratorios. A largo plazo, la documentación del sistema estará disponible en línea en plataformas como GitHub o similares, donde otros desarrolladores podrán acceder a ella y podrán desarrollar sus propias soluciones o construir sobre el trabajo realizado.

- **Información disponible para el desarrollo del proyecto:** Este proyecto sigue el trabajo previamente realizado por el Dr. Juan José Rojas en Kyutech; como tal, sus hallazgos e investigaciones serán fundamentales en el desarrollo del proyecto. También hay algunas tesis de graduación realizadas por asistentes de los laboratorios que abordan los primeros prototipos de algunos de los módulos que integrarán el producto final. Además, hay mucha información disponible en Internet.

3.5. Requerimientos operacionales del sistema

En esta sección se explicará el proceso de obtención de requerimientos enfocados en la operación del sistema. La operación del sistema incluye los procesos del sistema, los reglamentos y políticas de operación del sistema, los estados y modos de operación del sistema y la calidad operacional del sistema.

3.5.1. Procesos del sistema

Los procesos del sistema describen en qué contexto el sistema apoya las actividades esperadas de él por los socios. En general fluyen de los procesos más grandes a los más específicos [2].

Para este proceso, se usó la información obtenida de los encuestados en la sección 3.2.4. De la información recolectada fue posible identificar cuatro actividades primarias que el sistema debe ser capaz de apoyar para cumplir con su propósito.

1. P1. Permitir al usuario seleccionar diferentes tipos de pruebas (pruebas de baterías, pruebas de carga electrónica y pruebas de simulación de celdas fotovoltaicas) para subsistemas de potencia de CubeSats.
2. Actuar en conjunto o como módulos de pruebas únicos.

3. Analizar los datos generados.
4. Entregar los datos procesados al usuario por medio de una interfaz gráfica intuitiva utilizando técnicas de experiencia de usuario.

De estas actividades, fue posible realizar una versión primeriza del Concepto de Operaciones del sistema.

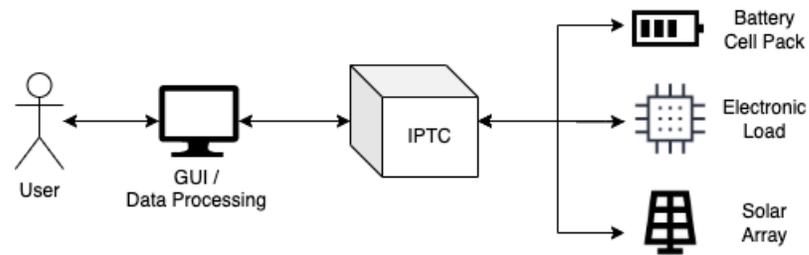


Figura 3.7: Concepto de operaciones del IPTC. Fuente: Elaboración Propia (Draw.io).

Haciendo uso de este Concepto de Operaciones preliminar se elaboró también un primer diagrama conceptual de funcionamiento del sistema.

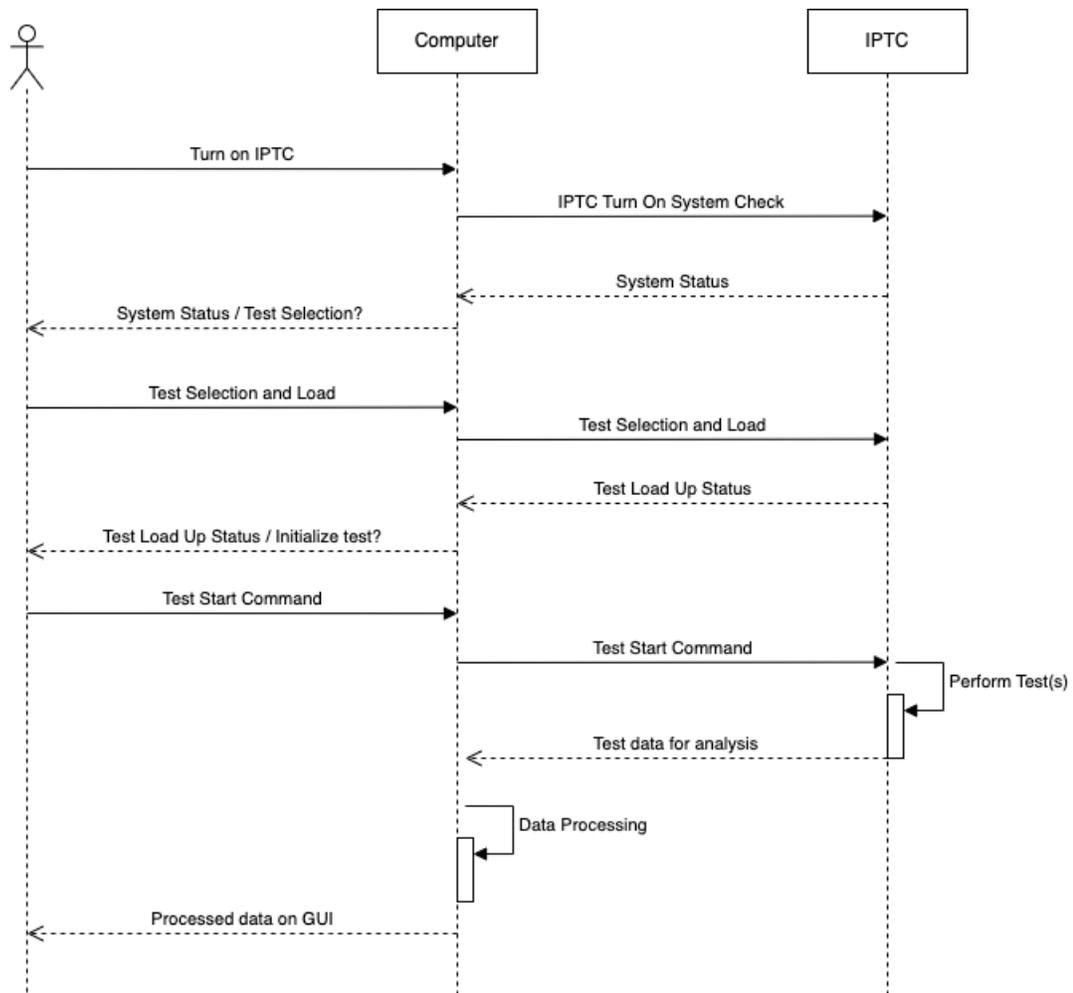


Figura 3.8: Diagrama conceptual de funcionamiento del IPTC. Fuente: Elaboración Propia (Draw.io).

3.5.2. Reglamentos y políticas de operación

La sección de reglamentos y políticas de operación del documento de Especificación de requerimientos de los socios describe las políticas operacionales y restricciones que tendrá el sistema.

En este caso, los requerimientos de reglamentos y políticas de operación seguirán el estándar de la guía de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) 116:2018, guías para la evaluación de riesgos de seguridad y reducción de riesgos por equipo de bajo voltaje [30]. Donde se especifican algunas estrategias de gestión de riesgos para equipos que operan en rangos de tensión menores a 1000 V en corriente alterna

y 1500 V en corriente directa.

3.5.3. Limitantes operacionales

Para definir las primeras limitantes operacionales se estudió el contexto de desarrollo del IPTC.

Primero, se definieron algunas **políticas de uso** del instrumento. Para esto se identificaron dos puntos importantes de descargo de responsabilidad legal que deberán ser incluidos en la documentación del proyecto. Primero, dado que las tres instituciones de los desarrolladores son instituciones académicas que se manejan dentro de lo requerido legalmente dentro de sus países. Por tanto, se espera que cualquier producto que desarrollen sea para usos legales únicamente. Además, tanto Japón como Alemania han firmado y ratificado el tratado sobre los principios que deben regir las actividades de los Estados en la exploración y utilización del espacio ultraterrestre, incluso la Luna y otros cuerpos celestes [31] de la Oficina de las Naciones Unidas para los Asuntos del Espacio Ultraterrestre (UNOOSA, por sus siglas en inglés). Dicho tratado especifica que no se podrán llevar a cabo operaciones militares en el espacio. Debido a lo anterior, y al hecho de que Costa Rica como país repudia todo acto de guerra, el segundo descargo de responsabilidad legal que deberá ser incluido en la documentación del proyecto dictará que el IPTC no puede ser utilizado para aplicaciones con fines militares.

A nivel del uso del tester por los usuarios se identificaron varias limitantes operacionales que se deben tener en cuenta durante el desarrollo del proyecto. Respecto a la **privacidad de datos del usuario**, dado que la mayoría de los clientes estarán utilizando el IPTC serán investigadores e ingenieros de satélites es posible inferir que los datos que generarán usando el sistema serán confidenciales y pertenecerán a su propiedad intelectual, por tanto, estos datos deberán ser únicamente accesibles para la persona que esté usando el IPTC y no deben existir otras formas en las que se pueda obtener la información generada por el aparato sin el conocimiento del usuario.

Ligado al punto anterior, otra limitante será la **propiedad intelectual**. La propiedad intelectual del desarrollo del IPTC pertenecerá exclusivamente a los desarrolladores. A pesar de que el IPTC será un

aparato de uso libre, éste no deberá ser replicado para fines lucrativos por terceros.

La última limitante serán las **políticas de seguridad** del usuario. Como se mencionó anteriormente, el diseño de este instrumento se hará siguiendo las normativas de seguridad establecidas por la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) 116:2018, en el documento, guías para la evaluación de riesgos de seguridad y reducción de riesgos por equipo de bajo voltaje [30]. Además, en el repositorio de información del proyecto se incluirá un manual de usuario que contenga instrucciones de seguridad. Debido a esto, los desarrolladores se liberarán de la responsabilidad por cualquier accidente que suceda a un usuario que esté relacionado a usos fuera de los especificados en el manual de usuario y la norma del IEC.

3.5.4. Estados y modos de operación del sistema

Los estados y modos de operación del sistema se realizaron usando como guía el manual de usuario de otro aparato similar, la carga electrónica programable DL 3000 de la compañía Rigol, Inc. [32]. De este documento, se infirieron cuatro modos de operación principales. A continuación, se muestran los usos encontrados.

1. **Modo de operación normal:** Este modo se refiere al modo de operación común, donde el usuario realiza las pruebas para las que está diseñado el sistema.
2. **Modo de mantenimiento:** El modo de mantenimiento entra a fungir si el aparato necesita mantenimiento (programado o por fallo). Este modo implica apagar el dispositivo o limitar sus funciones.
3. **Modo de emergencia:** Este modo funciona en caso de fallo crítico o emergencia. En este modo el sistema deja de operar de acuerdo con su estado normal y prioriza salvaguardar al usuario primero y luego a sí mismo y su entorno.
4. **Modo de validación y calibración:** En este modo el sistema opera de acuerdo a un set de funciones específicas que le permitan calibrar cada uno de sus instrumentos.

3.5.5. Calidad operacional del sistema

De la encuesta realizada a los socios del proyecto se encontraron varios factores de calidad operacional que se deberán tomar en cuenta durante el desarrollo del proyecto. En la subsección 3.2.4 se definieron las guías de los factores de fiabilidad, precisión y compatibilidad. Donde los clientes expresaron su interés por que el producto final cumpla con todas estas características y se pueda utilizar de forma sencilla para hacer las pruebas que necesitan. Además, del ambiente en el cuál será utilizado el dispositivo fue posible determinar que éste estará en un ambiente de laboratorio o cuarto limpio, donde se espera que el dispositivo pueda moverse de forma sencilla para acomodarlo de acuerdo con las necesidades en una estación de trabajo. También los socios expresaron su deseo de poder utilizar el dispositivo como un aparato único con una interfaz gráfica amigable y capaz de utilizarse sin la necesidad de conectarlo a una computadora, ya sea por medio de una aplicación móvil o una pantalla integrada al dispositivo.

PPor otro lado, en las subsecciones anteriores de esta sección se definieron las expectativas de seguridad y mantenimiento del dispositivo. A nivel de mantenimiento, y sabiendo que el dispositivo será diseñado como un dispositivo de uso libre, se tomó una ruta diferente a la establecida en la guía de usuario del producto similar que se utilizó como referencia [32]. Esto debido a que el producto de referencia es un producto comercial y los encargados de éste especifican que el mantenimiento debe ser realizado por un equipo especializado y aprobado por la compañía desarrolladora. Ya que el IPTC estará disponible para que cualquier persona pueda construir el suyo propio, se agregó a las expectativas que sea sencillo darle mantenimiento y que la plataforma permita mejoras a lo largo del tiempo.

Entonces, de acuerdo con la información recolectada se delimitaron las siguientes expectativas en orden de prioridad:

1. **Fiabilidad**
2. **Precisión**
3. **Compatibilidad**

4. Seguridad
5. Mantenimiento
6. Interfaz gráfica amigable
7. Portabilidad
8. Conexión a aplicación celular o pantalla integrada

El desglose de estas expectativas se encuentra en la sección 3.5 del apéndice A.

3.6. Requerimientos de usuario

Haciendo uso de las expectativas desarrolladas en 3.5 y de lo expresado por los socios del proyecto en la encuesta realizada se sintetizaron los requerimientos de usuario preliminares del proyecto. Estos requerimientos encapsulan conceptos de calidad, interacción con el sistema, escenarios de operación y requerimientos de uso.

3.6.1. Criterios de calidad

En esta sección, se discute el proceso de obtención de los requerimientos de usuario y los criterios de calidad asociados a estos. Los requerimientos específicos no serán mencionados en esta sección, ya que se encuentran en los apéndices y en una tabla resumen al final del capítulo. Los requerimientos relacionados a criterios de calidad abordan aspectos como las mediciones, la fiabilidad, la seguridad y el precio del sistema.

Mediciones: Dado que el IPTC está diseñado para realizar pruebas en sistemas críticos para los CubeSats, es posible argumentar que tener un sistema de pruebas de sistemas de potencia ayudaría a mitigar de forma muy significativa el riesgo de falla más común de estas misiones de acuerdo con lo definido por [1]. Por tanto, es fundamental garantizar mediciones precisas y exactas para cumplir con los

requisitos de los desarrolladores del satélite. Para lograr esto, se investigaron las tecnologías y métodos de medición disponibles, seleccionando aquellos que ofrecen los mejores resultados en términos de precisión y exactitud. Se consideró la necesidad de calibrar el sistema y se evaluaron los estándares de calidad de los datos producidos.

Fiabilidad: El IPTC debe ser capaz de manejar un gran volumen de datos y transacciones con una latencia mínima, además de operar durante largos períodos sin disminuir su rendimiento. En este contexto, se analizarán las demandas de rendimiento y la capacidad de procesamiento del sistema de acuerdo con el diseño preliminar. Esto se realizará tomando como referencia otros sistemas similares existentes en el mercado como la carga electrónica programable DL3000 de la compañía Rigol [32]. Además, se tomará en cuenta la escalabilidad y la resistencia a fallas del sistema.

Seguridad: Para abordar la seguridad del IPTC, se identificaron posibles vulnerabilidades y amenazas, como accesos no autorizados o ataques maliciosos. Estas situaciones se tomarán en cuenta en el desarrollo del proyecto para tomar medidas de protección adecuadas, como controles de acceso, encriptación de datos y monitorización de la actividad del sistema. Además, se evaluaron los riesgos asociados con la operación del sistema dentro de sus límites operacionales y se implementarán medidas de seguridad para proteger al usuario y al entorno circundante.

Precio: En el contexto de la accesibilidad del IPTC, se tuvieron en cuenta las restricciones presupuestarias de los usuarios en laboratorios de investigación en países en desarrollo. Para el desarrollo del proyecto se deberá investigar y comprender el rango de precios que estos usuarios pueden permitirse, equilibrándolo con los costos de producción y desarrollo del sistema. Además, se deben explorar opciones de financiamiento o subsidios que puedan ayudar a reducir el costo total del sistema para estos usuarios, garantizando así que el IPTC sea asequible para una amplia gama de usuarios en el ámbito de la investigación espacial.

3.6.2. Requerimientos de interacción

En esta sección se discute el proceso para los requerimientos de interacción.

Preferencias de software: Por medio de la encuesta se identificaron las plataformas de software más comunes y preferidas por los usuarios en el ámbito del desarrollo de CubeSats como Python y LabView. Dado que varios usuarios expresaron interés en usar ambos. El sistema IPTC será diseñado para ser compatible e integrarse fácilmente con ambas opciones, garantizando una amplia accesibilidad y facilidad de uso.

Datos y comunicaciones: El IPTC debe manejar diferentes tipos de datos y convertirlos al código interno del sistema. Para lograr esto, se investigaron y seleccionaron algoritmos y protocolos de conversión de datos que permitieran una comunicación fluida con diversas fuentes de datos. A nivel de comunicación entre el Sistema de Control de Interfaz (SCI) y el usuario, se consideraron dos protocolos distintos de comunicación, SCPI y JSON. Finalmente se decidió utilizar SCPI puesto que es el estándar de comunicaciones de estos sistemas y, por tanto, será más sencillo para el usuario final trabajar con este tipo de formato.

Selección de pruebas, carga y visualización de datos: Para facilitar la interacción del usuario con el IPTC, se diseñará una interfaz de software intuitiva que permita la selección de pruebas, carga de datos y visualización de resultados de manera integrada y sencilla.

Interfaces de prueba: La interfaz de prueba entre el IPTC y los dispositivos de prueba debe ser fácil de usar. Se investigarán y seleccionarán conectores estándar de la industria que permitan conexiones seguras y sencillas para las mediciones previstas. El uso de estos será parte de los requisitos del desarrollo del proyecto y deberá también ser incluido en el documento de integración e interfaces del IPTC.

Portabilidad: El IPTC deberá ser diseñado teniendo en cuenta la portabilidad según los requerimientos de los clientes. Por tanto, se deberán diseñar elementos mecánicos que permitan mover el sistema de un lugar a otro y, además, todo el sistema debe mantenerse debajo del volumen total indicado por los usuarios.

Mantenibilidad: Para garantizar la funcionalidad continua del IPTC, se deberán establecer rutinas de mantenimiento. El sistema deberá facilitar el servicio y las actualizaciones tanto de hardware como de software. También, se deberán etiquetar correctamente los elementos internos para facilitar la identificación y se deberá considerar el acceso a los componentes individuales durante el diseño, garantizando que sean fácilmente accesibles para medición, prueba y, si es necesario, reemplazo.

3.6.3. Contextos de uso

Para los contextos de uso se estudiaron tres variables principales: los usuarios del IPTC, las instalaciones donde será utilizado el sistema y las regiones del mundo donde deberá operar el aparato.

A nivel de usuarios la Tabla 3.2 muestra claramente que los usuarios del sistema son todos profesionales con altos grados académicos en el sector de desarrollo de las actividades del IPTC. Por tanto, se puede inferir que estos usuarios ya estarán capacitados para utilizar el IPTC y tendrán una idea general de cómo operar un sistema de este tipo. Por tanto, toda la documentación realizada para estos puede partir de un nivel técnico sin necesidad de tener demasiada exposición o ahondar en conceptos básicos.

Sobre las instalaciones de uso, se descubrió que el IPTC se utilizará principalmente en instalaciones de investigación y cuartos limpios. Por lo tanto, el sistema debe ser capaz de resistir el uso diario en un entorno de laboratorio de investigación, considerando factores como la limpieza y la compatibilidad con las condiciones específicas de los cuartos limpios.

Sumado a esto, el IPTC estará instalado en laboratorios alrededor del mundo, por tanto, debe contar con instrucciones que puedan ser comprendidas por todos estos usuarios. Además, se deben considerar las diferencias en voltaje, frecuencia y tipo de enchufe para poder ser utilizado en las diferentes regiones y poder operar en los climas tan diferentes de las regiones donde será utilizado (Asia Pacífico, Asia Central, Sudeste Asiático, América del Norte, Central y del Sur, Europa, África, etc.)

3.6.4. Escenarios de operación

En el caso de los escenarios de operación, las principales fuentes de datos fueron los usos previstos que proporcionaron los socios en la encuesta. Además, se realizaron entrevistas a parte, con los desarrolladores del IPTC para entender los modos de operación de este. De este ejercicio, se encontraron seis escenarios operacionales del IPTC.

1. **Módulo de matriz solar:** Se refiere al uso únicamente del módulo para simulación de matrices solares. En este modo el IPTC simula ser una matriz solar recibiendo energía del sol y puede proveer energía a el circuito de potencia de un satélite.
2. **Módulo de carga electrónica variable:** Se refiere al uso únicamente del módulo de carga electrónica variable. En este modo el IPTC puede actuar como una carga electrónica variable, demandando potencias variables del sistema a lo largo del tiempo o puede operar como una fuente de energía para probar los subsistemas de potencia del CubeSat.
3. **Módulo de pruebas de baterías:** Se refiere al uso únicamente del módulo de pruebas de baterías. Este módulo permitirá al usuario cargar y descargar baterías de acuerdo con una cantidad de ciclos definida o al modo de comportamiento esperado de la misión espacial.
4. **Enlace de múltiples módulos:** En este modo de operación, se conectarán varios de los módulos mencionados anteriormente y se pondrán a trabajar simultáneamente.
5. **Uso único del módulo sin la computadora:** Se espera que el IPTC pueda operar sin necesidad de una computadora, por medio de una interfaz gráfica integrada. En este modo algunas de sus funciones estarán reducidas ya que las pruebas más complejas definirán y procesarán sus datos a nivel de software en la computadora principal.
6. **Modo de conexión:** Se refiere al uso del IPTC conectado a la red. Se espera que, de esta forma, los usuarios puedan tener acceso a sus datos de forma remota y puedan guardar los datos generados en una nube.

3.6.5. Requerimientos de uso

Por último, para permitir al usuario utilizar el IPTC de forma adecuada se encontraron cuatro áreas de especial atención.

1. **Interfaz gráfica:** La interfaz gráfica será la ventana entre el sistema y el usuario, es el punto donde se llevará a cabo la mayor parte de la interacción entre ambos. Por tanto, es sumamente importante que sea amigable con el usuario y que permita operar el sistema de la forma deseada.
2. **Botones y elementos exteriores:** Además de la interfaz gráfica, el sistema contará con botones y otros elementos externos como conectores para permitir las pruebas, con el fin de facilitar el uso del instrumento, todos estos elementos deberán estar claramente identificados y etiquetados.
3. **Tiempos de carga y operación:** : Se espera que este elemento tenga un rendimiento comparable con otros sistemas de este tipo como el DL 3000 [32]. Por tanto, deberá ser capaz de medir datos a una frecuencia adecuada para la aplicación, además, deberá ser capaz de procesar datos de forma rápida y los tiempos de carga de datos al sistema y de comunicación deben ser optimizados para permitir una buena experiencia de usuario.
4. **Manuales de usuario y documentación:** Además, el sistema deberá tener documentos detallados para su construcción, mantenimiento y operación.

3.7. Conceptos del ciclo de vida del sistema propuesto

En esta sección se discuten algunos conceptos relacionados al ciclo de vida del IPTC como producto. Se explorarán conceptos operacionales, políticas de operación y limitantes, se dará una descripción del sistema propuesto, los modos de operación de este, las clases de usuarios existentes, el ambiente de soporte del sistema, los escenarios de operación, otros conceptos encontrados y las limitantes del proyecto.

3.7.1. Concepto operacional

En este apartado se discutirán algunos de los puntos importantes a tener en cuenta durante el planteamiento del proyecto y la obtención de requerimientos relacionados al concepto de operaciones del sistema.

Políticas de operación y limitantes

Como se mencionó anteriormente en 3.5.2 y en 3.5.3. El sistema deberá contar con políticas de uso esperado escritas en los documentos que se harán disponibles para el usuario final. Estas políticas también incluirán condiciones de operación, rangos de variables de operación, modos correctos de conexión de interfaces, entre otros. Además, se deberán incluir manuales de seguridad y mantenimiento con el fin de asegurar la seguridad final del usuario. Se debe liberar a los desarrolladores de cualquier responsabilidad por el uso incorrecto del sistema.

Descripción del sistema propuesto

A continuación se muestra el concepto básico de operaciones del IPTC.

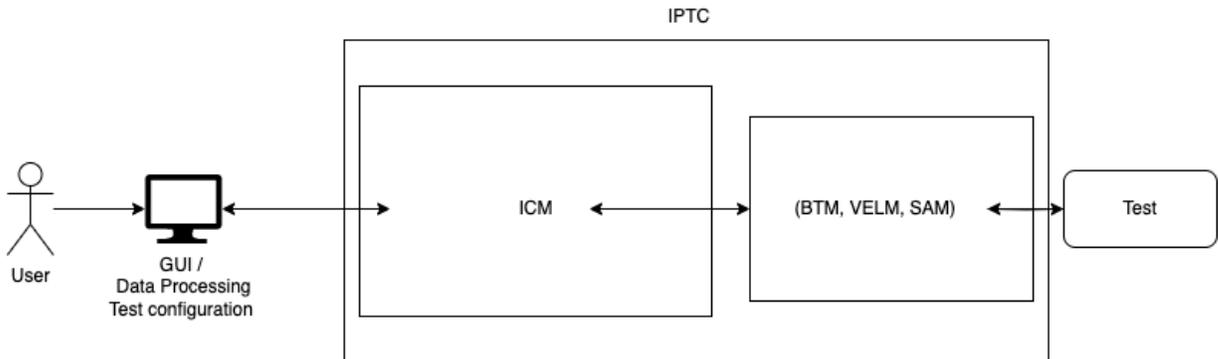


Figura 3.9: concepto de operaciones del IPTC. Fuente: Elaboración Propia (Draw.io).

El IPTC se compone de un módulo de control de interfaz (ICM por sus siglas en inglés) y tres módulos de testeo: módulo de testeo de baterías (BTM), módulo de matriz solar (SAM) y el módulo de carga electrónica variable (VELM). Estos tres módulos permiten hacer pruebas a los diferentes subsistemas de

potencia de un CubeSat. Estos módulos reciben las instrucciones de prueba del usuario por medio de una interfaz gráfica conectada al módulo de control de interfaz. El siguiente capítulo tratará más a detalle la composición interna de cada uno de los módulos que componen el IPTC.

Modos de operación del sistema

A continuación, se muestran los modos de operación de cada módulo y componentes que interactúan con el IPTC. Es importante recordar que los módulos del IPTC pueden actuar por separado o en conjunto.

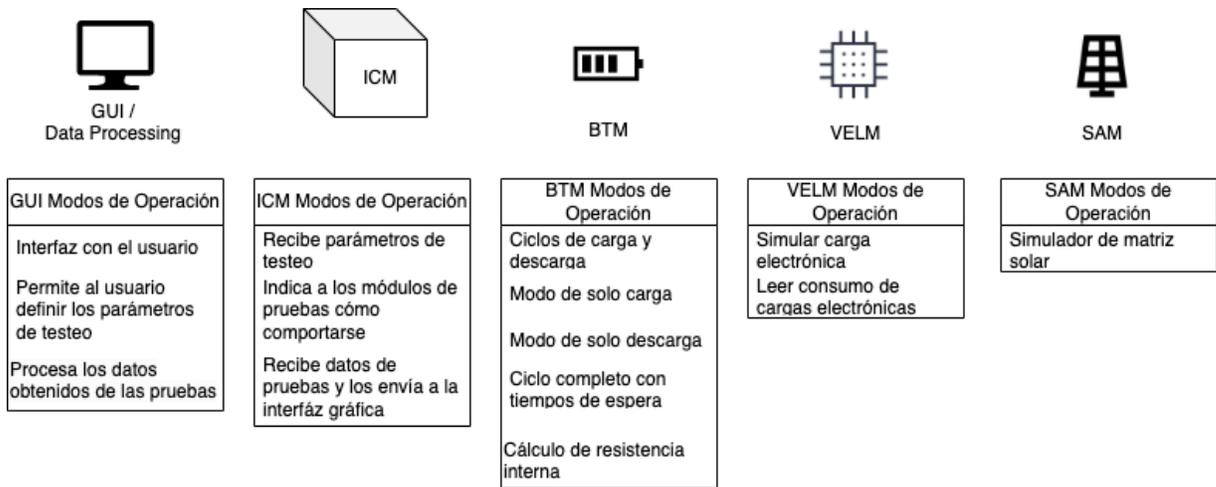


Figura 3.10: Modos operaciones del IPTC. Fuente: Elaboración Propia (Draw.io).

Clases de usuario y personal involucrado

A nivel de usuarios estos se calificarán como operarios y como personal de mantenimiento. Los operarios serán aquellas personas que utilizan el IPTC para pruebas de sistemas de potencias de CubeSats. Es decir, serán los desarrolladores, gestores de proyecto e investigadores de CubeSats. El personal de mantenimiento serán personas que entiendan a cabalidad el sistema y hayan leído los manuales de mantenimiento. Deben ser personas con el conocimiento técnico necesario para llevar a cabo estas tareas.

3.7.2. Escenarios de operación

Durante el ciclo de vida del proyecto este tendrá dos escenarios primarios de operación:

1. **Testeo**
2. **Mantenimiento**

Una descripción a cabalidad de estos escenarios de operación se encuentra en la sección 5.2 del apéndice [A](#)

3.7.3. Otros conceptos del sistema propuesto

El ciclo de vida del IPTC seguirá las siguientes etapas:

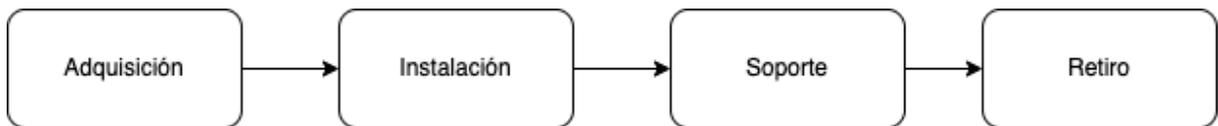


Figura 3.11: Ciclo de vida del IPTC. Fuente: Elaboración Propia (Draw.io).

En la etapa de adquisición, el usuario puede decidir construir el IPTC por su cuenta basado en toda la documentación que estará disponible en internet o podrá contratar al SETEC Lab y al Delta Lab para que construyan un dispositivo y se lo envíen por un monto a acordar.

En la etapa de instalación, el usuario construye e instala el IPTC en su laboratorio haciendo uso de los manuales de instalación incluidos en la documentación del instrumento.

En la etapa de soporte, el dispositivo podrá recibir mejoras y cualquier tipo de arreglo por medio de internet. Además, al ser un proyecto de uso libre, los diferentes usuarios alrededor del mundo podrán poner a disposición de la comunidad cualquier cambio o mejora que realicen a sus dispositivos.

Por último, el IPTC deberá tener un tiempo de vida recomendado, tras el cual, los usuarios deberán deshacerse del sistema de forma correcta para evitar accidentes o fallas.

3.7.4. Limitantes del proyecto

Como se mencionó anteriormente, este proyecto tiene un presupuesto limitado [3.4](#). Además, al ser un proyecto investigativo suscrito al Instituto Tecnológico de Costa Rica, tiene un tiempo establecido para su ejecución. El diseño e implementación del instrumento debe ser finalizado durante los próximos dos años (2023-2024) [\[4\]](#).

3.8. Matriz de requerimientos de socios

A continuación, se muestran los requerimientos obtenidos de la información recolectada en este capítulo a hacia los socios del proyecto. Para más detalle respecto a estos requerimientos referirse al apéndice [A](#)

Tabla 3.5: Requerimientos Operacionales del IPTC (StRS)

ID Number	Requirement
Operational Requirements	
StRS-1	The IPTC must comply with the International Electrotechnical Commission (IEC) Guide 116:2018
StRS-2	The documentation for the IPTC must state that it can not be used for military or illegal applications
StRS-3	The documentation for the IPTC must state that the device's intellectual property belongs to SETEC and Delta Lab and the device cannot be replicated for profit by any third party.
StRS-4	The system documentation will include a user's manual, SETEC and Delta Lab will not be responsible for any accident related to use outside of the user's manual instructions.
StRS-5	The IPTC system should be able to handle a large volume of data and transactions with minimal latency.
StRS-6	The readings of the IPTC must be reliable with one another, the system should be able to provide accurate measures and be calibrated to ensure the quality of these measurements.
StRS-7	The system should be designed to work seamlessly with different hardware configurations and be able to interact with different devices under test.
StRS-8	The system should be protected from unauthorized access or malicious attacks.
StRS-9	The IPTC system should have established maintenance routines to ensure the system keeps working as intended. It should be easily serviced and upgraded when necessary both hardware and software wise.
StRS-10	The system must have a user friendly and intuitive GUI that enables the researchers to focus on the data and not on having to configure the computer to show what they want to see. It must be easy to navigate and show different screens of interest.
StRS-11	The system should be able to display data when disconnected from a computer, for example with a mobile app or a built-in screen.

Tabla 3.6: Requerimientos de usuario del IPTC (StRS)

ID Number	Requirement
User requirements	
StRS-12	The measurements performed by the tester must be precise and accurate.
StRS-13	The system shall be able to be calibrated and produce data that is valid for meeting the launch requirements provided by the different launch entities such as space agencies and launch providers and integrators.
StRS-14	The system shall be safe to operate within the system operational boundaries without posing a threat to the user.
StRS-15	The system must be priced in a manner that makes it affordable for users with restrictive budgets in research laboratories in developing space nations.
StRS-16	The system shall be able to be integrated with both, Python or other open-source options, and LabView.
StRS-17	The system shall be able to seamlessly handle different types of data and convert them to the internal code of the system allowing it to function with different types of data sources.
StRS-18	The test selection, load up and data visualization of the system shall be intuitive and seamlessly integrated to the software of the system.
StRS-19	The testing interface between the IPTC and the testing devices must be easy to use, the tester must account for easy and safe connections using industry standard connectors for the intended measurements.
StRS-20	The system shall be designed with portability in mind. The whole system must have mechanical elements that allow movement from one place to another, the whole ensemble must have a volume equal to or less than 1 cubic meter.
StRS-21	The system should be easily serviced and upgraded when necessary both hardware and software wise. All the internal elements must be correctly labeled to allow for easy identification. The system must also be designed with maintenance in mind, ensuring that each individual component must be reasonably easy to reach, measure, test and if needed, changed for a new one.
StRS-22	The system must be able to withstand everyday use on a research laboratory environment.
StRS-23	The system shall account for these differences in voltage, frequency and type of power socket on the different regions it will be used on.
StRS-24	The system shall be designed with the ambient temperature and humidity of the different regions it will be used on.
StRS-25	The system must have a user-friendly GUI that allows for easy operation and data visualization.
StRS-26	The tester must have correctly labeled buttons and outside elements such as connections, sockets, etc. As well as security indications to allow for a safe operation.
StRS-27	The system must be able to operate and provide data in a quick manner. The load up times and communication times must be optimized to allow for a good user experience.
StRS-28	The IPTC must be bundled with complete and detailed documentation and user manuals, for its operation, construction, and maintenance.

Tabla 3.7: Add caption

ID Number	Requirement
Life Cycle Requirements	
StRS-29	The IPTC shall be able to operate as a SAM, BTM or VELM individually or can have multiple modules interacting with each other to simulate complex power systems of the Cube-Sat.
StRS-30	The operational mode must be selected by the user through the GUI and the tests that will be performed must be loaded up by the user through the computer.
StRS-31	The IPTC must have instructions that can be understood by users around the world
StRS-32	The IPTC will be used in conjunction with a computer and shall have the connections necessary to interface with these devices as well as with the broad range of devices that will be tested with the equipment.
StRS-33	The system shall have a maintenance mode that will enable the user to troubleshoot and find errors and problems that might affect the IPTC. These problems will be displayed to the user through the GUI under the maintenance mode option.
StRS-34	A maintenance manual shall be included in the documentation of the system.
StRS-35	Patches and software updates must be possible through internet connection and will be implemented through a GUI prompt.
StRS-36	The device will have instruction manuals detailing how to build it and use it so that users can easily start doing tests with it.
StRS-37	Documentation must be made readily available through the web.
StRS-38	The IPTC must have a recommended lifetime.

Capítulo 4

Requerimientos de sistemas, subsistemas e integración

Este capítulo tiene como objetivo definir de forma más concreta los requerimientos del IPTC tanto a nivel general como de sus subsistemas. Para ello, se estudiará primero la arquitectura funcional del instrumento y sus subsistemas y luego, se adentrará en los requerimientos de usabilidad, desempeño, interfaz, integración, mantenimiento, confiabilidad, calidad, adaptabilidad, ambientales, seguridad, manejo de información, políticas reguladoras, manejo de ciclo de vida y de empaquetado, manejo y transporte.

4.1. System Requirements Specification (SyRS)

Esta sección estudiará a detalle la arquitectura funcional del IPTC con el fin de comprender el sistema a detalle y las funciones que realizará una vez construido.

4.2. Arquitectura funcional del IPTC

La arquitectura funcional del sistema se refiere al desglose de funciones que tendrá el sistema en general y cada uno de sus subsistemas. A continuación, se muestra la arquitectura funcional de cada uno de los subsistemas del IPTC.

La arquitectura funcional del proyecto se obtuvo por medio de entrevistas y sesiones de trabajo con los desarrolladores del proyecto mencionados en la matriz de socios 3.1 y las encuestas realizadas.

Arquitectura ICM

El Módulo de Configuración de Interfaz (ICM por sus siglas en inglés) es el cerebro del sistema. Se encarga de comunicarse con todos los subsistemas y decide cuál de los módulos debe operar y bajo qué criterios. Siguiendo una metodología de desglose de estructura de trabajo (Work Breakdown Structure en inglés) se establecieron las siguientes funciones para el MCI.

- **Manejo de interfaces:**

- Configurar interfaces.
- Seleccionar la interfaz a usar para comunicación.

- **Manejo de comandos:**

- Recibir macro comandos desde la computadora.
- Enviar macro comandos a la computadora.
- Descomponer macro comandos en comandos más pequeños.
- Componer comandos en macro comandos.
- Secuenciar los macro comandos descompuestos.
- Enviar los comandos a los módulos de testeo.

- **Manejo de telemetría:**

- Guardar actividad en un archivo de registro.
 - Consolidar la información de telemetría del módulo.
 - Guardar la telemetría consolidada.
- **Manejo de errores:**
- Guardar errores en un archivo de registro.
 - Mostrar errores.

Arquitectura SAM

El Módulo de Matriz Solar (SAM por sus siglas en inglés), es el más complejo de los tres módulos, ya que debe ser capaz de generar a nivel interno curvas de corriente voltaje basado en los datos de ángulo, corriente de corto circuito, corriente de máxima potencia, voltaje de circuito abierto y voltaje de máxima potencia [33].

El desglose de la arquitectura funcional para el SAM es el siguiente:

- **Modos de operación:**
- Simular una matriz de celdas solares y generar la potencia que entregaría el sistema a una carga electrónica por medio de una curva de corriente voltaje variante en el tiempo de acuerdo al perfil de ángulos otorgados por el usuario.
 - Medir consumo de potencia y ángulos de incidencia de radiación de paneles solares reales conectados al módulo.
- **Manejo de comandos:**
- El módulo debe ser capaz de recibir los comandos enviados por el módulo de configuración de interfaz.
 - El módulo debe ser capaz de interpretar los comandos enviados por el módulo de configuración de interfaz y operar de acuerdo a lo que se le solicita.

- **Manejo de errores:**

- Guardar errores en un archivo de registro.
- Comunicar errores al módulo de configuración de interfaz.

- **Manejo de datos:**

- El módulo debe ser capaz de enviar los datos de las pruebas al módulo de configuración de interfaz.
- El módulo debe ser capaz de guardar los datos de las pruebas en un registro local.

Arquitectura VELM

El módulo de carga electrónica variable (VELM por sus siglas en inglés) es el encargado de simular y medir cargas electrónicas de acuerdo con las especificaciones que tenga cada CubeSat. Su arquitectura funcional es similar a la del módulo de matriz solar, pero con diferentes modos de operación.

- **Modos de operación:**

- Simular el consumo de potencia de una carga electrónica variable a lo largo del tiempo.
- Medir el consumo de potencia de una carga electrónica conectada a el módulo.

- **Manejo de comandos:**

- El módulo debe ser capaz de recibir los comandos enviados por el módulo de configuración de interfaz.
- El módulo debe ser capaz de interpretar los comandos enviados por el módulo de configuración de interfaz y operar de acuerdo a lo que se le solicita.

- **Manejo de errores:**

- Guardar errores en un archivo de registro.

- Comunicar errores al módulo de configuración de interfaz.
- **Manejo de datos:**
 - El módulo debe ser capaz de enviar los datos de las pruebas al módulo de configuración de interfaz.
 - El módulo debe ser capaz de guardar los datos de las pruebas en un registro local.

Arquitectura BTM

El módulo de pruebas de baterías (BTM por sus siglas en inglés) se encarga de probar el sistema de almacenamiento energético del CubeSat. Tiene una arquitectura funcional similar a los otros módulos excepto en sus modos de operación.

- **Modos de operación:**
 - Únicamente carga de baterías.
 - Únicamente descarga de baterías.
 - El usuario puede definir una cantidad específica de ciclos de carga y descarga.
 - El sistema es capaz de generar un gráfico de carga y descarga.
 - El sistema debe ser capaz de medir el estado e carga de la celda en cualquier momento dado de la prueba.
 - El sistema debe ser capaz de medir la resistencia interna de las baterías.
- **Manejo de comandos:**
 - El módulo debe ser capaz de recibir los comandos enviados por el módulo de configuración de interfaz.
 - El módulo debe ser capaz de interpretar los comandos enviados por el módulo de configuración de interfaz y operar de acuerdo a lo que se le solicita.

- **Manejo de errores:**

- Guardar errores en un archivo de registro.
- Comunicar errores al módulo de configuración de interfaz.

- **Manejo de datos:**

- El módulo debe ser capaz de enviar los datos de las pruebas al módulo de configuración de interfaz.
- El módulo debe ser capaz de guardar los datos de las pruebas en un registro local.

Arquitectura funcional mecánica

Por último, el sistema contará con una carcasa mecánica que albergará todo el sistema. Su arquitectura funcional es la siguiente:

- **Carcasa:**

- Albergar todos los componentes y subsistemas del IPTC.

- **Mantenimiento:**

- Armado y desarmado sencillo con formas fáciles de acceder cada uno de los componentes del IPTC para mantenimiento.

- **Disipación térmica:**

- Disipar la energía térmica generada dentro del sistema de forma segura para el usuario.

- **Portabilidad:**

- Permitir un transporte fácil del sistema completo.

4.3. Requerimientos de usabilidad

Para los requerimientos de usabilidad se tomaron como base los requerimientos definidos en el capítulo anterior para el usuario y para operaciones. Sobre estos conceptos se expandió de acuerdo con los conceptos de efectividad, satisfacción y manejo de riesgos.

- **Efectividad:** Para este criterio, se tomaron como referencia otros sistemas similares a este. De la información recolectada, se decidió que el sistema deberá tener un error de 1 % o menos con respecto a mediciones de referencia realizadas [34]. Además, se estableció un tiempo medio de preparación de prueba a ejecución de 10 minutos.
- **Satisfacción:** Para satisfacer las necesidades de los clientes, el IPTC deberá contar con documentación clara y concisa para asegurar que el usuario pueda usar el sistema de forma efectiva. Esta documentación incluye: manual de usuario, manual de especificaciones del sistema, guía de ensamblaje, guía de mantenimiento, documento de interfaces, manual de comandos, manual de seguridad.
- **Manejo de riesgos:** Para el manejo de riesgos, además de la documentación de seguridad, el sistema incluirá advertencias a nivel de software que indiquen al usuario de riesgos para evitar accidentes, daños al equipo o a los dispositivos bajo prueba.

Para garantizar que se cumplan los criterios anteriores, se requerirá que el equipo desarrollador del IPTC desarrolle un documento de métricas de desempeño para evaluar factores como tasas de error, duración de cada tarea, número de pasos para completar una actividad, entre otros. Además, una vez esté construido el sistema, se deberá desarrollar una encuesta entre los usuarios preliminares para obtener retroalimentación sobre la satisfacción con el diseño y encontrar áreas de mejora.

4.4. Requerimientos de desempeño

Se estudió el tiempo requerido de operación continua del sistema y algunos criterios de operación para garantizar un desempeño correcto del sistema. Primero, se estudió el tiempo de operación del sistema. Debido a que este sistema será utilizado tanto por investigadores como por personas en la industria, se espera que pueda operar de forma continua, además, de que debe ser capaz de operar simulando el tiempo total de una misión de CubeSat, que puede durar entre 6 meses y un año. Además, se estudió el tiempo de vida aproximado de estos aparatos [35], por lo que se estableció una expectativa de vida para el aparato de 10 años o 70 000 horas, lo que suceda primero. Además, se definió que la tasa de recolección de datos del aparato deberá ser de 2 Hz el tiempo de respuesta a cambios del sistema será de máximo 0,5 segundos y para garantizar la seguridad de los usuarios se definió un límite máximo de sonoridad de 40 dB de acuerdo a los límites de seguridad establecidos por la CDC [36].

4.5. Requerimientos de interfaz

Para un vistazo detallado de las interfaces del sistema, referirse al apéndice B donde se anexa el documento de interfaces del IPTC. Sin embargo, para efectos de este documento, en esta sección se explicarán las interfaces esperadas en el IPTC y de forma general la arquitectura de componentes de los subsistemas.

A nivel general, las interfaces del sistema pueden visualizarse como interfaces externas (del dispositivo con el mundo exterior) e interfaces internas (de los subsistemas del dispositivo). A nivel interno se encuentran el módulo de comando de interfaz y los módulos de pruebas, todos ellos contenidos por una carcasa mecánica. A nivel externo está el ambiente, el internet, el usuario y la computadora que actúa como interfaz gráfica entre el usuario y el aparato, y como interfaz entre el aparato y la red.

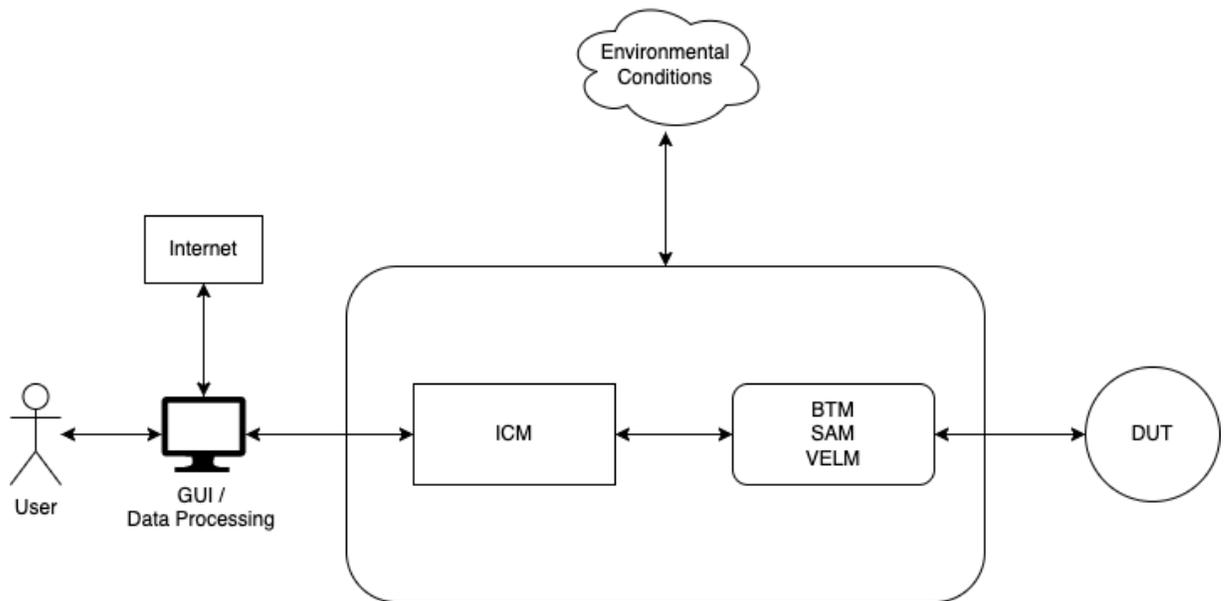


Figura 4.1: Conceptualización de elementos de interfaces del IPTC. Fuente: Elaboración Propia (Draw.io).

De la figura anterior, es posible observar las interfaces de forma conceptual, sin embargo, estas relaciones se pueden definir aún más al conocer los componentes principales que utilizará cada uno de estos elementos.

- **Módulo de Control de Interfaz (ICM):** El Módulo de Control de Interfaz será operado por un microcontrolador (por ejemplo: Raspberry Pi, Arduino, etc.). Para la primera iteración del sistema se está haciendo uso de un Raspberry Pi 4. Este microcontrolador se conecta a los módulos de pruebas por medio de sus puertos seriales utilizando un bus SPI como protocolo de comunicación. Adicionalmente, se interfazará con la computadora por medio de un controlador Transmisor-Receptor Asíncrono Universal (UART) y utilizará el protocolo SCPI para enviar los comandos al ICM.
- **Módulos de pruebas:** Todos los módulos de pruebas del IPTC estarán construidos exactamente igual. Todos constan de un microcontrolador STM32 que se conecta a un Controlador de Interfaz Periférico (PIC por sus siglas en inglés), el PIC se conecta un convertidor bidireccional que será el encargado de generar las condiciones operacionales para la prueba a realizar [37].

- **Elemento a testear:** El elemento a testear se conectará al IPTC utilizando 4 conectores tipo banana estándar. Esta conexión sucederá en la carátula frontal de la carcasa mecánica del IPTC.
- **Carcasa mecánica:** La carcasa mecánica tendrá conectores estándar (RS-232 y USB) para permitir la interfaz del ICM con la computadora, además, tendrá las entradas de los conectores tipo banana para permitir la interfaz entre el elemento a testear y el IPTC. Por último, tendrá integrado un sistema de disipación de calor, botones y elementos de sujeción que permitan la operación del sistema.

A continuación, se muestra un diagrama más detallado de las interfaces y conexiones del sistema.

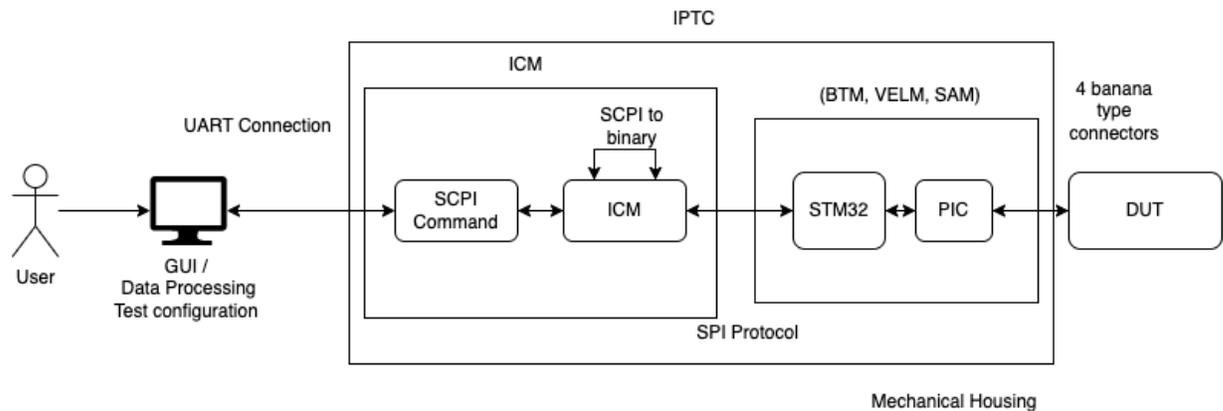


Figura 4.2: Diagrama de conexiones del IPTC. Fuente: Elaboración Propia (Draw.io).

4.6. Requerimientos de integración entre el sistema y usuario

Los requerimientos de integración humana son un aspecto crítico en el diseño de cualquier sistema, y el IPTC no es la excepción. Estos requerimientos se refieren a la capacidad del sistema para ser utilizado por seres humanos y a la necesidad de que se diseñe de manera que se adapte a la forma en que las personas interactúan con él [2].

Uno de los aspectos más importantes de los requerimientos de integración humana es la formación del operador. Es crucial que se proporcione documentación completa, incluyendo manuales de usuario y

tutoriales, para guiar a los operadores en el uso del sistema IPTC y sus módulos como se ha mencionado anteriormente en este documento. Es necesario proporcionar instrucciones claras y pautas para solucionar problemas comunes, que permita a los operadores resolver problemas de manera independiente. Esto se puede hacer a través de foros en línea, donde los usuarios puedan publicar sus propias soluciones.

Otro aspecto importante de los requerimientos de integración humana es la interfaz gráfica. La interfaz debe ser consistente en todo el sistema IPTC y sus módulos, promoviendo la familiaridad y facilidad de uso. Para lograr esto, se deben utilizar etiquetas claras, iconos y sugerencias para ayudar a los operadores a entender el propósito de cada elemento y control de la interfaz. Además, se debe proporcionar retroalimentación visual, como barras de progreso o indicadores de estado, para informar a los operadores de los procesos en curso o estados del sistema. También, es importante tener buenas prácticas de experiencia de usuario para la interfaz gráfica, esta debe permitir la personalizar las preferencias de visualización, incluyendo el tamaño del texto, los esquemas de color y otros elementos visuales para acomodar varias necesidades del operador [38]. La asignación de tareas es otro requerimiento importante de la experiencia de usuario. El IPTC y sus módulos deben emplear la automatización donde sea apropiado para reducir la carga de trabajo del operador y minimizar el potencial de error humano. Se deben establecer procedimientos claros y bien documentados para las tareas manuales, asegurando que los operadores comprendan sus roles y responsabilidades.

La prevención y gestión de errores es otro requerimiento importante de este proceso. El sistema IPTC y sus módulos deben incorporar mecanismos de validación de entrada y verificación de errores para prevenir errores de entrada de datos. Se deben mostrar mensajes de error claros y concisos para informar a los operadores de cualquier problema y sugerir acciones correctivas apropiadas. Además, se deben proporcionar funciones de deshacer y rehacer para permitir que los operadores reviertan fácilmente cambios o corrijan errores. Se deben implementar funciones de copia de seguridad automática y recuperación para proteger contra la pérdida de datos y minimizar el impacto de los errores del operador.

Finalmente, la seguridad es un requerimiento crítico de la integración humana. El sistema IPTC y sus módulos deben incorporar características de seguridad, como circuitos de protección, aislamiento y

puesta a tierra, para minimizar el riesgo de peligros eléctricos. Se deben proporcionar botones de parada de emergencia u otros mecanismos de seguridad para permitir que los operadores detengan rápidamente la operación del sistema en caso de emergencia [30]. Se deben realizar inspecciones y mantenimiento regulares para garantizar la operación segura y confiable del sistema IPTC y sus módulos.

4.7. Requerimientos de mantenimiento

Con respecto al mantenimiento, se espera que esta unidad de pruebas sea capaz de operar por una gran cantidad de horas sin presentar fallas, además, su mantenimiento debe ser sencillo de realizar y debe poder hacerlo el cliente. Para obtener los requerimientos de mantenimiento se tomaron en cuenta cinco aspectos:

- **Tiempo:** Se refiere a la cantidad de tiempo que requieren las acciones de mantenimiento. Dado que el IPTC es un sistema de testeo electrónico sin partes móviles se espera que únicamente esté expuesto al desgaste normal de operación y el estrés térmico generado dentro del sistema. El IPTC es un dispositivo que deberá ser construido por los usuarios en su mayoría, por tanto, debe ser fácil de ensamblar y desensamblar. Basados en esta premisa, el diseño del sistema deberá ser modular y desarrollado con mantenimiento en mente. El tiempo de ensamblaje del IPTC con todas sus partes debe ser menor a 10 horas para dos personas y cada acción correctiva o de mantenimiento no debe exceder una hora.
- **Frecuencia:** Se refiere a la frecuencia con que se debe dar mantenimiento al sistema. Al ser un sistema principalmente electrónico, las acciones de mantenimiento consistirán principalmente de chequeo de conexiones y limpieza del dispositivo.
- **Complejidad de mantenimiento:** El mantenimiento de este sistema debe ser realizado por el cliente, por tanto, se debe incluir una guía exhaustiva de mantenimiento de este en la documentación del proyecto. Las acciones de mantenimiento deben poder realizarse por una única persona y deben

poder realizarse con herramientas estándar y disponibles a los clientes. Cada uno de los componentes del IPTC debe ser fácil de quitar y reemplazar.

- **Accesibilidad de componentes:** Los componentes del IPTC deberán ser sencillos de conseguir y cada uno de ellos deberá estar claramente rotulado para que sean fáciles de identificar por el cliente.
- **Calibración:** Para las acciones de calibración del sistema, se usará lo establecido en la norma [39].

4.8. Otros requerimientos de calidad

Además de los requerimientos ya mencionados se consideraron dos aspectos más respecto a calidad para el IPTC.

- **Portabilidad:** Como se ha mencionado con anterioridad, la encuesta realizada a los socios del proyecto arrojó que el IPTC será utilizado mayoritariamente en laboratorios y cuartos limpios 3.6. Dado que estos ambientes no necesariamente son estáticos, el IPTC deberá diseñarse para permitir la movilidad del equipo en caso de ser necesario.
- **Compatibilidad:** No existe un estándar de componentes para CubeSats, los componentes de estos son sumamente variados, por lo tanto, el IPTC y sus módulos de pruebas (VELM, SAM y BTM), deberán ser diseñados de forma tal que sean compatibles con la mayor cantidad posible de componentes en el mercado.

4.9. Requerimientos físicos

El IPTC debe cumplir con ciertos requerimientos físicos en términos de peso, volumen y dimensiones. Para minimizar el peso y el volumen, se debe diseñar con un factor de forma compacto y liviano, lo que facilita su transporte e integración con las instalaciones de prueba de CubeSat. El volumen del IPTC no debe superar 1 m^3 según lo establecido en la encuesta 3.5.

La construcción del sistema debe realizarse con materiales duraderos, resistentes a la corrosión y adecuados para su uso en entornos de laboratorio y pruebas. También debe cumplir con los estándares de la industria para garantizar la calidad y el buen desempeño.

Cada módulo dentro del sistema IPTC debe tener etiquetas y marcas claras para facilitar su identificación y uso. Además, los módulos deben estar diseñados con interfaces estándar para permitir su intercambiabilidad dentro del sistema.

En cuanto a los módulos de prueba (VELM, SAM y BTM), las dimensiones de cada uno de los módulos de prueba deben ser tales que se puedan integrar fácilmente con el sistema IPTC y otros módulos sin obstaculizar el funcionamiento del sistema o de los otros módulos.

4.10. Condiciones ambientales

Las condiciones ambientales a las que estará sometido el sistema se infirieron tanto de las instalaciones donde estará colocado 3.6 como de las regiones del globo terráqueo donde se utilizará 3.3.

De la Tabla 3.3 es posible observar que solamente en la muestra de expertos entrevistados se representa la mayor parte del mundo, además, considerando que el IPTC también está pensado para que investigadores y desarrolladores de CubeSats en países en vías de desarrollo espacial puedan realizar sus actividades, es seguro asumir que también será usado en regiones del mundo como el continente africano, medio oriente y Oceanía.

Se sabe que el IPTC será utilizado principalmente en ambientes de cuarto limpio y laboratorios de investigación. En el caso de cuartos limpios, la temperatura y humedad son factores controlados, sin embargo, se debe considerar que algunos laboratorios de investigación están en contacto con las condiciones atmosféricas del lugar donde se ubican y no necesariamente son instalaciones con mecanismos de regulación ambiental. Siendo este el caso, se debe diseñar el IPTC para que pueda soportar las condiciones ambientales en casi todo el mundo (excluyendo casos extremos como los polos, zonas de gran altitud, océanos y condiciones extremas de temperatura).

Para esto, se estudió el rango de temperaturas a nivel global, haciendo uso de los datos históricos brindados por el Observatorio Terrestre de la NASA, se estima que la temperatura en tierra del planeta se encuentra en un rango de -25°C a 45°C [40]. Por tanto, se decidió establecer un rango de temperaturas de 0°C a 40°C para la operación normal del IPTC.

De forma similar, se estudiaron los datos históricos de humedad relativa proporcionados por la red Copernicus, de la Agencia Espacial Europea, donde se observó que la humedad relativa mundial está en un rango de 30 % a 80 % [5]. Dado que el IPTC también se puede encontrar en ambientes de cuartos limpios, se estableció un rango de humedad relativa para operación nominal del instrumento de 20 % a 80 % sin condensación.

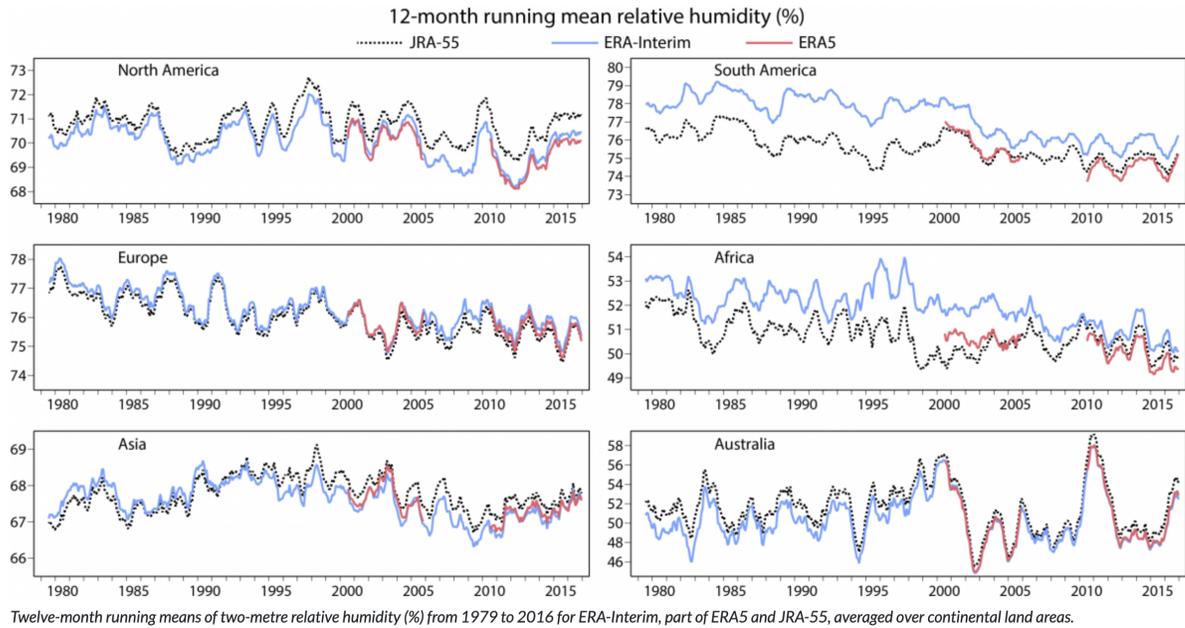


Figura 4.3: Humedad relativa en las regiones del mundo. Fuente: [5].

Por último, debido a que el aparato estará en contacto con el ambiente dentro de los laboratorios de investigación, se espera que esté expuesto a polvo y partículas de este tipo que no deberán impactar su desempeño.

4.11. Requerimientos de seguridad

En la sección de requerimientos de seguridad del IPTC, se deben abordar tanto la seguridad física de las instalaciones que albergan el sistema como la seguridad operativa del sistema en sí. Para lograr esto, se deben considerar diferentes medidas de seguridad, como el control de acceso a través de procedimientos seguros de inicio de sesión con autenticación de nombre de usuario y contraseña para evitar el acceso no autorizado. También se deben implementar diferentes niveles de privilegios de usuario para garantizar que solo tengan acceso a las funciones necesarias.

Además, los datos sensibles y los resultados de las pruebas deben ser protegidos mediante encriptación y almacenamiento seguro para evitar el acceso no autorizado, la modificación o la divulgación. Es esencial contar con métodos de respaldo y recuperación de datos en caso de fallas de hardware o violaciones de seguridad.

Para asegurar la seguridad de la red, el sistema debe contar con protocolos de comunicación seguros y protección de firewall para evitar el acceso no autorizado al sistema a través de la red. También es importante contar con actualizaciones y parches de seguridad para mantener el sistema actualizado y seguro.

Para todos estos procedimientos se usará de referente el estándar ISO 27040:2015 [41].

4.12. Requerimientos de manejo de información

Para los requerimientos de manejo de información, se espera que el sistema sea capaz de realizar las siguientes funciones básicas:

1. **Guardar datos:** Se espera que el sistema pueda guardar los datos generados por las pruebas, estos pueden ser guardados a nivel local en la unidad IPTC en caso de estar operando sin la interfaz a la computadora, en la unidad de disco duro de la computadora o en una nube web.

2. **Acceso a datos:** El usuario debe tener acceso a los datos del sistema por medio de un usuario y contraseña como se especificó en la sección anterior.
3. **Respaldo y archivo de datos:** El sistema debe ser capaz de guardar y respaldar los datos del usuario. Este respaldo se debe hacer de forma automática cada vez que se utiliza el sistema.
4. **Exportar datos:** El sistema debe poder exportar datos en formatos comunes como JSON y CSV.
5. **Retención de datos:** El sistema debe guardar los datos por un tiempo definido tras el cual podrá borrarlos.

Los tipos de datos que utilizará el sistema incluyen: archivos en formato CSV, JSON, datos binarios y por protocolo SCPI.

4.13. Requerimientos de políticas reguladoras

El sistema IPTC debe cumplir con políticas organizacionales, prácticas empresariales y regulaciones externas que afecten su operación o desempeño que se definieron en el capítulo anterior de este documento.

Además, se identificaron los siguientes puntos:

- **Criterios de salud y seguridad:**El diseño de los módulos VELM, BTM y SAM debe priorizar la salud y seguridad al incorporar características apropiadas de equipo, métodos de operación e influencias ambientales. Esto incluye, pero no se limita a, protección contra descargas eléctricas, sobrecalentamiento o exposición a materiales peligrosos (IEC 116:2018) [30].
- **Compatibilidad Electromagnética (EMC):**Los módulos deben cumplir con los requerimientos de compatibilidad electromagnética, minimizando la interferencia con otros dispositivos y sistemas electrónicos y asegurando que operen dentro de los límites aceptables de radiación electromagnética.
- **Sustancias Tóxicas:**Los módulos deben diseñarse y fabricarse de acuerdo con las regulaciones relevantes sobre el uso y disposición de sustancias tóxicas, como la Directiva de Restricción de

Sustancias Peligrosas (RoHS) [42].

4.14. Requerimientos de manejo del ciclo de vida

La sostenibilidad del ciclo de vida del sistema IPTC y sus módulos (VELM, BTM y SAM) se garantizará mediante la definición de requisitos de mantenimiento como las explicadas en la sección anterior. En lo que respecta a las actividades de calidad, se establecerán chequeos regulares del sistema para identificar posibles problemas y también se llevará a cabo la calibración del sistema cada cierto tiempo.

En cuanto a la gestión de repuestos y suministros, se elaborará una lista detallada de materiales que contemple la disponibilidad de piezas de repuesto y materiales consumibles durante todo el ciclo de vida del sistema. Se identificarán proveedores fiables y se establecerán procesos de adquisición eficientes.

Asimismo, se proporcionará documentación técnica detallada, que incluirá manuales de usuario, guías de mantenimiento y recursos de solución de problemas para facilitar la operación, mantenimiento y reparación del sistema y sus módulos.

4.15. Requerimientos de empaquetado, manejo y transporte

Los desarrolladores de IPTC deben asegurar que el sistema IPTC y sus módulos (VELM, BTM y SAM) puedan ser empacados, manipulados, enviados, transportados y almacenados de manera segura y eficiente en su contexto operativo previsto (en caso de que el cliente decida comprar el sistema a los desarrolladores). Para ello, es necesario diseñar un empaque protector que prevenga daños durante el envío y el transporte. También se deben proporcionar instrucciones claras para la manipulación segura del sistema durante el transporte, instalación y mantenimiento, lo que incluye especificar los puntos de levantamiento, equipo necesario y cualquier precaución para evitar daños o lesiones. Por último, se deben identificar los métodos de envío y transporte adecuados, considerando factores como tamaño, peso y fragilidad, y asegurándose de que cumplan con las regulaciones y estándares de la industria aplicables.

4.16. Matriz de requerimientos del sistema

Tabla 4.1: Requerimientos funcionales del sistema

ID Number	Requirement
System functional requirements	
SyRS-1	The IPTC system shall provide real-time data acquisition and monitoring of system performance.
SyRS-2	The IPTC system shall be capable of operating in standalone mode or in conjunction with other modules.
SyRS-3	The IPTC system shall be capable of generating test reports and data logs.
SyRS-4	The IPTC system shall be capable of handling multiple test scenarios and configurations.
SyRS-5	The IPTC system shall be capable of supporting a range of CubeSat power system testing needs.
SyRS-6	The IPTC system shall have the ability to configure and control the system under test, including the VELM, SAM, and BTM modules.
SyRS-7	The IPTC system shall be capable of supporting multiple users and sessions simultaneously.
SyRS-8	The IPTC system shall be capable of providing traceability and documentation of test results for quality control purposes.
SyRS-9	The IPTC system shall be designed to be scalable and adaptable to support future advancements in CubeSat power systems technology.
SyRS-10	The IPTC system shall provide the capability to set up and run automated test scripts for repetitive testing and data collection.
SyRS-11	The IPTC system shall provide the capability to save and recall test configurations and test results for future reference and comparison.
SyRS-12	The IPTC system shall be capable of generating test reports in a standardized format for easy documentation and sharing.
SyRS-13	The IPTC system shall be designed to be compact and lightweight for easy transportation and integration with CubeSat testing facilities.
SyRS-14	The IPTC system shall be capable of performing diagnostic tests and self-checks to ensure its own operational readiness and identify any potential issues or problems.
SyRS-15	The IPTC must be able to support power systems of CubeSats with a volume of 1-3U.
SyRS-16	The IPTC system shall be designed to minimize the time and resources required for testing, without compromising the quality or thoroughness of the testing process.
SyRS-17	The IPTC shall be able to control the VELM, SAM, and BTM modules independently or in combination.
SyRS-18	The IPTC shall be able to provide constant or variable loads to the power system under test.
SyRS-19	The IPTC shall be able to simulate different solar irradiance levels and sun angles to test the performance of the solar panels.
SyRS-20	The IPTC should be able to monitor and record the power system performance parameters such as voltage, current, power, and efficiency.
SyRS-21	The IPTC shall be able to provide real-time feedback to the user on the status of the test and the system performance.
SyRS-22	The IPTC shall be able to generate reports and data files for post-processing and analysis.
SyRS-23	The IPTC shall provide open circuit test mode for measuring the open circuit voltage and short circuit current of the power system.
SyRS-24	The IPTC shall provide constant current mode for measuring the maximum power point of the solar panels.
SyRS-25	The IPTC shall provide constant voltage mode for measuring the power output of the power system under different loads.
SyRS-26	The IPTC shall provide a dynamic load mode for simulating different load conditions and testing the power system response.

Tabla 4.2: Requerimientos funcionales del módulo de control de interfaces

ID Number	Requirement
ICM functional requirements	
SyRS-27	The ICM shall be able to configure interfaces.
SyRS-28	The ICM shall be able to select which interface to use for communication.
SyRS-29	The ICM shall be able to receive Macro Commands from PC.
SyRS-30	The ICM shall be able to send Macro Commands to PC
SyRS-31	The ICM shall be able to decompose macro command into smaller commands.
SyRS-32	The ICM shall be able to compose smaller commands into macro commands.
SyRS-33	The ICM shall be able to sequence the decomposed commands.
SyRS-34	The ICM shall be able to send commands to testing modules.
SyRS-35	The ICM shall be able to register activity on log file.
SyRS-36	The ICM shall be able to consolidate module telemetry information.
SyRS-37	The ICM shall be able to store consolidated telemetry data.
SyRS-38	The ICM shall be able to register errors in Error Log.
SyRS-39	The ICM shall be able to show errors.

Tabla 4.3: Requerimientos funcionales del módulo de potencia variable

ID Number	Requirement
VELM functional requirements	
SyRS-40	The VELM shall be able to simulate power consumption of variable electronic loads over a defined period of time.
SyRS-41	The VELM shall be able to read power consumption of actual electronic loads over a period.
SyRS-42	The module must be able to receive binary commands from the ICM.
SyRS-43	The module must be able to interpret the commands sent by the ICM.
SyRS-44	The module must be able to Register Errors in Error Log
SyRS-45	The module must be able to communicate Errors to the ICM
SyRS-46	The module must be able to send binary data to the ICM.
SyRS-47	The module must be able to store data locally in a log file.

Tabla 4.4: Requerimientos funcionales del módulo de testeo de baterías

ID Number	Requirement
BTM functional requirements	
SyRS-48	The BTM shall be able to operate in a Battery Charge mode (Output Voltage and Current at set values)
SyRS-49	THE BTM shall be able to operate Battery Discharge mode (Demand voltage and current at set values)
SyRS-50	The BTM shall be able to allow the user to define the number of cycles of charge and discharge.
SyRS-51	The user must be able to define the Variable Current and Continuous Current Parameters, with a maximum of 30V in VC and 5-10 V in CC.
SyRS-52	The module must be able to provide the data necessary to generate a CC charge and discharge graph with the CC and Voltage measurements.
SyRS-53	The module must be able to provide state of charge of the cell packs at any given time of the test (as long as it is consistent with the measurement frequency).
SyRS-54	The module must be able to calculate the internal resistance of the battery.
SyRS-55	The module must be able to receive binary commands from the ICM.
SyRS-56	The module must be able to interpret the commands sent by the ICM.
SyRS-57	The module must be able to Register Errors in Error Log
SyRS-58	The module must be able to communicate Errors to the ICM
SyRS-59	The module must be able to send binary data to the ICM.
SyRS-60	The module must be able to store data locally in a log file.

Tabla 4.5: Requerimientos funcionales del módulo de matriz solar

ID Number	Requirement
SAM functional requirements	
SyRS-61	The SAM must be able to simulate Solar Array power delivery by generating a power curve of the solar panels that varies over time depending on the angle inputs set by the user.
SyRS-62	The SAM must be able to read power consumption and angles of incidence of actual solar arrays over a period of time.
SyRS-63	The module must be able to receive binary commands from the ICM.
SyRS-64	The module must be able to interpret the commands sent by the ICM.
SyRS-65	The module must be able to Register Errors in Error Log
SyRS-66	The module must be able to communicate Errors to the ICM
SyRS-67	The module must be able to send binary data to the ICM.
SyRS-68	The module must be able to store data locally in a log file.

Tabla 4.6: Requerimientos funcionales del GUI

ID Number	Requirement
GUI/PC functional requirements	
SyRS-69	The GUI must be able to interact with the user through a computer.
SyRS-70	The system must allow the user to be able to select the mode of operation of each module on the software.
SyRS-71	The GUI must allow the user to be able to feed data to the system.
SyRS-72	The PC must allow the system must be able to connect to the internet for updates and to databases for storage.
SyRS-73	The PC must be able to create a test profile and send it to the ICM using SCPI commands.
SyRS-74	The system must be able to store test data in a local disk or on a cloud-based solution as defined by the user
SyRS-75	The system must be able to process data and present it to the user in a useful format (graphics, tables, etc.)
SyRS-76	The system must be able to transform the data inputs of the user into a macro command that will be sent to the ICM.
SyRS-77	The system must be able to receive macro commands and turn them into data for processing.
SyRS-78	The system must have means to only allow the users to have access to the data.
SyRS-79	The system must have protections such as firewalls to protect its data from outside attacks.
SyRS-80	The system must be able to Register Errors in Error Log
SyRS-81	The system must be able to receive Errors from the ICM
SyRS-82	The system must be able to identify the received errors and communicate them to the user.

Tabla 4.7: Requerimientos funcionales del sistema mecánico

ID Number	Requirement
Mechanical system functional requirements	
SyRS-83	The mechanical system shall house all the IPTC components.
SyRS-84	The mechanical system shall allow for easy disassemble and component reach for maintenance.
SyRS-85	The mechanical system shall dissipate the heat generated by the system in a safe manner for the user.
SyRS-86	The system must enable easy transport of the IPTC.

Tabla 4.8: Requerimientos de usabilidad

ID Number	Requirement
Usability requirements	
SyRS-87	The IPTC system shall allow users to complete 95 % of their tasks without encountering critical errors or needing to seek assistance.
SyRS-88	The IPTC system shall provide accurate test results, with a maximum error rate of less than 1 % when compared to reference measurements.
SyRS-89	The IPTC system shall enable users to complete test setup and execution within an average time of 10 minutes per test.
SyRS-90	The IPTC system shall allow users to complete at least 90 % of their tasks within the specified timeframes, minimizing the time spent on system configuration and test execution.
SyRS-91	The IPTC system shall provide context-sensitive help and clear, concise documentation, ensuring users can quickly and easily access information needed to use the system effectively. These documents include the user's manual, specifications manual, assembly guide, maintenance guide, interface document, command document, security manual.
SyRS-92	The IPTC system shall include safety features and warnings to prevent users from causing damage to the equipment under test or harm to themselves due to incorrect operation or configuration.
SyRS-93	The IPTC system shall include clear instructions and guidelines for safe operation and troubleshooting to minimize the potential for harm in various contexts of use.
SyRS-94	Performance metrics: Quantitative metrics, such as task completion time, error rates, and the number of steps or clicks required, will be collected, and analyzed to assess system efficiency and effectiveness.
SyRS-95	User feedback: Surveys, interviews, and focus groups will be conducted to gather user feedback on their experiences using the IPTC system, helping to identify areas for improvement and assessing overall satisfaction.

Tabla 4.9: Requerimientos de desempeño

ID Number	Requirement
Performance requirements	
SyRS-96	The system shall be able to handle changes in load and current draw in real-time and be able to respond to changes within a maximum of 0.5 seconds.
SyRS-97	The system shall have a minimum data collection rate of 2 Hz.
SyRS-98	The device shall not surpass 40 dB when operating at maximum capacity.
SyRS-99	The system shall be able to operate continuously indefinitely. The minimum total life expectancy of the system shall be 10 years or 70 000 operational hours.
SyRS-100	The system must be able to be operated in stand-alone mode where each module (VELM, SAM, and BTM) can operate independently.
SyRS-101	The system must be able to be operated in combined mode: All modules can operate together and communicate with each other.
SyRS-102	The system shall have a calibration mode to ensure accuracy and consistency of measurements.
SyRS-103	The system must have a maintenance mode to ensure that the integrity of the system is maintained, and the lifetime of the equipment is met.

Tabla 4.10: Requerimientos de interfaz de los módulos de testeo

ID Number	Requirement
Testing modules Interface requirements	
SyRS-104	The VELM, BTM and SAM shall support a user-friendly graphical interface for configuring and controlling the load conditions, enabling users to monitor and adjust test parameters easily. This interface will be developed using software tools compatible with the STM32 microcontroller to ensure seamless communication with the ICM.
SyRS-105	The VELM, BTM and SAM shall provide an interface for communication with the ICM using the STM32 microcontroller, allowing it to receive commands and send telemetry data using the SPI standard communication protocol.
SyRS-106	The VELM, BTM and SAM shall support standard electrical connectors and wiring for connecting to the power system under test, ensuring compatibility with a wide range of CubeSat power systems. The STM32 microcontroller will be responsible for managing the connections and monitoring the power system parameters.

Tabla 4.11: Requerimientos de interfaz mecánicos

ID Number	Requirement
Mechanical housing interface requirements	
SyRS-107	The mechanical housing will allow for standardized connection ports, such as RS-232 or USB, to enable integration of the ICM with the computer.
SyRS-108	The mechanical housing will allow for four banana type connectors per test module for testing purposes.
SyRS-109	The mechanical housing will have an integrated power dissipation unit to allow for correct operation of the system.
SyRS-110	The mechanical housing will have buttons and handles to allow movement and operation of the IPTC.

Tabla 4.12: Requerimientos de integración entre el sistema y el usuario

ID Number	Requirement
Human system integration requirements	
SyRS-111	Comprehensive documentation, including user manuals and tutorials, shall be provided to guide operators in using the IPTC system and its modules.
SyRS-112	Online resources must be made available for operators on how to use the device when the documentation is sent out to the public.
SyRS-113	Clear instructions and guidelines for troubleshooting common issues should be provided, enabling operators to resolve problems independently. This can be done through forums so that users can post their own solutions.
SyRS-114	The user interface should be consistent across the IPTC system and its modules, promoting familiarity and ease of use.
SyRS-115	Clear labels, icons, and tooltips should be used to help operators understand the purpose of each interface element and control.
SyRS-116	Visual feedback, such as progress bars or status indicators, should be provided to inform operators of ongoing processes or system states.
SyRS-117	The user interface should allow for customization of display preferences, including text size, color schemes, and other visual elements to accommodate various operator needs.
SyRS-118	The IPTC system and its modules should incorporate input validation and error checking mechanisms to prevent data entry errors.
SyRS-119	Clear and concise error messages should be displayed to inform operators of any issues and suggest appropriate corrective actions.
SyRS-120	Undo and redo functions should be provided to allow operators to easily revert changes or correct mistakes.
SyRS-121	Automatic backups and recovery features should be implemented to safeguard against data loss and minimize the impact of operator errors.
SyRS-122	The IPTC system and its modules should support standardized communication protocols, such as RS-232 or USB, to enable seamless integration with external systems and devices.
SyRS-123	Clear and concise documentation should be provided for each supported communication protocol, detailing its implementation and usage as well as the commands document for the system.
SyRS-124	Communication interfaces should be designed with robust error handling and data integrity checks to ensure reliable data transmission.
SyRS-125	The IPTC system and its modules should employ automation where appropriate to reduce operator workload and minimize the potential for human error.
SyRS-126	Clear and well-documented procedures should be in place for manual tasks, ensuring that operators understand their roles and responsibilities.
SyRS-127	The IPTC system and its modules should incorporate safety features, such as circuit protection, insulation, and grounding, to minimize the risk of electrical hazards.
SyRS-128	Emergency stop buttons or other safety mechanisms should be provided to allow operators to quickly halt system operation in case of emergencies.
SyRS-129	Regular maintenance and inspections should be conducted to ensure the safe and reliable operation of the IPTC system and its modules.
SyRS-130	The system must be designed following the directives given by IEC's Guidelines for safety related risk assessment and risk reduction for low voltage equipment (IEC 116:2018(E))

Tabla 4.13: Requerimientos de mantenimiento

ID Number	Requirement
Maintainability requirements	
SyRS-131	Each module (VELM, SAM, and BTM) shall have a mean downtime of no more than 1 hour per maintenance action.
SyRS-132	Each module shall have a maximum downtime of no more than 2 hours for any single maintenance action.
SyRS-133	The average time to repair each module (VELM, SAM, and BTM) shall not exceed 1 hour.
SyRS-134	The average time to assemble the IPTC once all its parts have been sourced shall not exceed 10 hours, for two people.
SyRS-135	Preventative maintenance actions shall be performed on each module every 6 months or 2000 operating hours, whichever comes first.
SyRS-136	Maintenance of each module (VELM, SAM, and BTM) shall require no more than 1 person with training in the module's operation and components.
SyRS-137	Maintenance of each module shall require a limited set of standard tools and diagnostic equipment to minimize complexity and streamline the maintenance process.
SyRS-138	Each module (VELM, SAM, and BTM) shall be designed with modularity and ease of maintenance in mind, allowing for quick removal, replacement, or repair of components with minimal disruption to the overall system.
SyRS-139	Each module (VELM, SAM, and BTM) shall be designed with easily accessible components and parts to facilitate maintenance tasks.
SyRS-140	Components and parts within each module shall be organized and labeled to expedite identification and replacement.
SyRS-141	Cable management and routing within each module shall be optimized to prevent entanglement and ensure easy access to connectors and components.
SyRS-142	Fasteners and connectors used in each module should be standardized wherever possible to simplify maintenance tasks and reduce the need for specialized tools.
SyRS-143	The IPTC must be calibrated according to the established procedures of the norm ISO/IEC 17025:2017 or the most recent version of the norm.

Tabla 4.14: Otros requerimientos de calidad

ID Number	Requirement
Other quality requirements	
SyRS-144	- The IPTC should be designed with compactness and lightweight materials to facilitate easy transportation and integration into different testing environments.
SyRS-145	The VELM should be compatible with various CubeSat power systems to ensure seamless integration during testing.
SyRS-146	The SAM should be compatible with different solar panel technologies used in CubeSat power systems.
SyRS-147	The BTM should be compatible with various battery types and chemistries used in CubeSat power systems.

Tabla 4.15: Requerimientos físicos

ID Number	Requirement
Physical requirements	
SyRS-148	The IPTC system should be designed with a lightweight and compact form factor to minimize weight and volume, making it easier to transport and integrate with CubeSat testing facilities.
SyRS-149	The IPTC volume shall not exceed 1 cubic meter.
SyRS-150	The IPTC system should be built with materials that are durable, corrosion-resistant, and suitable for use in laboratory and testing environments.
SyRS-151	The construction should adhere to industry standards for quality and workmanship to ensure reliable and consistent performance.
SyRS-152	Each module within the IPTC system should have clear nameplates and system markings to facilitate easy identification and use.
SyRS-153	The modules should be designed with standard interfaces to enable interchangeability within the IPTC system.
SyRS-154	The dimensions of each of the testing modules should be such that it can be easily integrated with the IPTC system and other modules without obstructing their operation.

Tabla 4.16: Requerimientos de adaptabilidad

ID Number	Requirement
Adaptability requirements	
SyRS-155	The IPTC system should be designed with scalability and modularity in mind, allowing for seamless integration of additional modules or components as needed to support the evolving CubeSat power system testing requirements.
SyRS-156	The system should be capable of adapting to new testing methodologies and configurations as they emerge.
SyRS-157	The IPTC system should be able to accommodate advancements in CubeSat power systems technology and support new capabilities as they become relevant.
SyRS-158	The system should provide the flexibility to work with different power systems, battery chemistries, and solar array configurations.
SyRS-159	The IPTC system should be designed to allow for the removal or replacement of modules or components as needed, without affecting the overall system's performance or functionality.
SyRS-160	The BTM should be designed to support different battery types and chemistries that may emerge in the future, ensuring its continued relevance in CubeSat power system testing.
SyRS-161	The SAM should be designed to simulate various solar panel outputs and configurations, allowing for adaptability as new solar technologies and CubeSat power system designs become available.

Tabla 4.17: Requerimientos ambientales

ID Number	Requirement
Environmental conditions	
SyRS-162	The system should operate within a temperature range of 0°C to 40°C.
SyRS-163	The system should be capable of operating under humidity levels from 20 % to 80 % non-condensing.
SyRS-164	The IPTC system should be resistant to dust and particulate ingress.
SyRS-165	The system should be designed to withstand typical levels of radiation encountered in a lab or testing environment.
SyRS-166	The IPTC system should be designed to withstand shock and vibration during transportation and normal operation.
SyRS-167	The system should comply with EMC standards and should not be adversely affected by external electromagnetic interference, nor should it generate excessive electromagnetic emissions. It shall be compliant with IEC 61000-4.
SyRS-168	The system should be able to handle any self-induced thermal loads during operation and maintain a stable temperature to ensure accurate testing results. A 100 % power dissipation must be assumed (i.e., if the maximum electrical power input of the system is 350 W, it should be able to dissipate the whole 350 W load).
SyRS-169	The VELM, SAM and BTM should comply with EMC standards and should not be adversely affected by external electromagnetic interference or generate excessive electromagnetic emissions.
SyRS-170	The IPTC system should be designed and operated in compliance with relevant legal and regulatory requirements, including safety standards, and environmental regulations according to each country's regulations.
SyRS-171	The IPTC system should be developed with a focus on minimizing environmental impact and promoting sustainability in its operation and disposal.

Tabla 4.18: Requerimientos de seguridad

ID Number	Requirement
Security Requirements	
SyRS-172	The system should have secure log-on procedures with username and password authentication to restrict unauthorized access.
SyRS-173	Different levels of user privileges should be implemented to ensure that users only have access to the necessary features and functions based on their role.
SyRS-174	Sensitive data and test results should be encrypted and securely stored to prevent unauthorized access, modification, or disclosure.
SyRS-175	The system should have data backup and recovery methods in place to ensure the availability and integrity of the data in the event of hardware failure or security breaches.
SyRS-176	The IPTC system should have secure communication protocols and firewall protection to prevent unauthorized access to the system over the network.
SyRS-177	The system must be able to be patched and updated, either from the manufacturer or by solutions made by the user community. These community updates must be disclaimed as not supported in any way as to stay away of any liability from the developer's standpoint.
SyRS-178	The system security must be conducted in accordance to the ISO 27040:2015 standard.

Tabla 4.19: Requerimientos de manejo de información

ID Number	Requirement
Information management requirements	
SyRS-179	The system should be capable of receiving, processing, and storing various types of data, including test configurations, test results, performance parameters, logs, and user information. Some of these include: JSON files, CSV files, binary data and SCPI protocol data.
SyRS-180	The system should have sufficient storage capacity to handle the data generated during testing and store it securely for future reference and analysis. It should have at least 2 GB of local storage to secure any information used when not connected to a computer.
SyRS-181	Authorized users should be able to access the stored data and information according to their privileges and roles within the system.
SyRS-182	The system should regularly back up the data and archive it in a secure location to ensure its availability and integrity, even in the event of hardware failure or security breaches. It must backup the data after each use, when the user closes the software.
SyRS-183	The system should be able to export data in standardized formats, such as CSV or JSON, to facilitate sharing and collaboration with other systems or users.
SyRS-184	The system should adhere to data retention policies and requirements, including the duration for which data must be stored and the conditions under which it should be deleted or archived.
SyRS-185	The VELM, SAM and BTM should be able to process, store, and export the test data generated during testing, including voltage, current, power, and efficiency parameters.

Tabla 4.20: Requerimientos de políticas reguladoras

ID Number	Requirement
Policy regulation requirements	
SyRS-186	The design of the VELM, BTM, and SAM modules should prioritize health and safety by incorporating appropriate equipment characteristics, methods of operation, and environmental influences. This includes, but is not limited to, protection against electric shock, overheating, or exposure to hazardous materials (International Electrotechnical Commission Guide 116:2018).
SyRS-187	The modules should comply with electromagnetic compatibility requirements, minimizing interference with other electronic devices and systems, and ensuring that they operate within the acceptable limits of electromagnetic radiation.
SyRS-188	The modules should be designed and manufactured in accordance with relevant regulations regarding the use and disposal of toxic substances, such as the Restriction of Hazardous Substances (RoHS) Directive.

Tabla 4.21: Requerimientos de manejo de ciclo de vida

ID Number	Requirement
System lifecycle sustainment requirements	
SyRS-189	Implement regular system checkups to identify any potential issues on the system. Also, the system must be calibrated every 2000 hours of operation or every 6 months, whichever comes first.
SyRS-190	Develop a comprehensive BOM list that considers the availability of spare parts and consumables throughout the system's lifecycle. This includes identifying reliable suppliers and establishing efficient procurement processes.
SyRS-191	Provide comprehensive technical documentation, including user manuals, maintenance guides, and troubleshooting resources, to facilitate the operation, maintenance, and repair of the IPTC system and its modules.

Tabla 4.22: Requerimientos de empaquetado, manejo y transporte

ID Number	Requirement
Packaging, handling, shipping, and transportation requirements	
SyRS-192	- Design protective packaging for the IPTC system to prevent damage during shipping and transportation. The packaging should be robust, shock-absorbent, and resistant to environmental factors such as moisture and temperature changes.
SyRS-193	- Provide clear instructions and guidelines for safely handling the IPTC system during transportation, installation, and maintenance. This includes specifying lifting points, necessary equipment, and any precautions to avoid damage or injury.
SyRS-194	- Identify suitable shipping and transportation methods for the IPTC system, considering factors such as size, weight, and fragility. Ensure that the selected methods meet relevant regulations and industry standards.

Capítulo 5

Verificación de requerimientos

El presente capítulo tiene como propósito, desarrollar y explicar el proceso de verificación que se utilizará para los requerimientos del IPTC.

5.1. Estándar IEEE 1012-2016

IEEE Std 1012-2016, también conocido como "Estándar IEEE para la Verificación y Validación de Sistemas, Software y Hardware", es un estándar técnico publicado por el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE). Este estándar proporciona pautas, procesos y requisitos para la verificación y validación de sistemas, software y hardware.

El objetivo principal del estándar es garantizar la calidad, confiabilidad y rendimiento de los productos de sistemas, software y hardware. Al seguir los procesos de validación y verificación descritos en IEEE 1012-2016, los desarrolladores pueden analizar, evaluar y verificar sistemáticamente el diseño, implementación y funcionamiento de sus productos [43].

Es por esto, que este estándar será el utilizado para la elaboración de la matriz de verificación de los requerimientos del IPTC. El estándar desarrolla 5 diferentes tipos de verificación:

1. **Inspección**
2. **Revisión**
3. **Análisis**
4. **Demostración**
5. **Pruebas**

Para efectos de este documento, se explicará en detalle cada uno de los tipos de verificación y se mostrará un ejemplo del desarrollo de este tipo de verificación para uno de los requerimientos del sistema. Las verificaciones correspondientes para todos los requisitos podrán encontrarse en la hoja de cálculo de los requerimientos del IPTC.

5.2. Procesos de verificación

El estándar provee únicamente los tipos de verificaciones que existen. Sin embargo, no provee los procesos para realizarlos, por lo que, estos se deben establecer de forma propia. Aunque el estándar no proporciona un proceso detallado específicamente, podemos deducir un enfoque efectivo para llevar a cabo verificaciones basado en las buenas prácticas y los principios establecidos en el estándar. A continuación, se describe el esquema para llevar a cabo los procesos de verificación.

1. **Planificación:** La planificación es esencial antes de comenzar la verificación. Según IEEE 1012-2016, la planificación de las actividades de verificación y validación debe incluir la identificación de los artefactos que se analizarán, los roles y responsabilidades del equipo de análisis, los criterios de aceptación y las herramientas y técnicas que se utilizarán durante el análisis.
2. **Preparación:** Antes de realizar el proceso de verificación, los miembros del equipo deben familiarizarse con los artefactos que se verificarán y los criterios de aceptación de la prueba a realizar. Esto

puede incluir la revisión de la documentación relevante, las pautas de verificación y los estándares aplicables. Los miembros del equipo también pueden recibir capacitación sobre las técnicas de verificación y las herramientas que se utilizarán.

3. **Ejecución:** Durante este proceso, los miembros del equipo de inspección examinan sistemáticamente los artefactos para identificar defectos, inconsistencias o desviaciones de los estándares. Los miembros del equipo deben registrar los problemas identificados y clasificarlos según su gravedad y prioridad.
4. **Comprobación:** Los resultados obtenidos del proceso deben ser comparados contra los criterios de aceptación de la prueba y se debe comprobar si se cumplen o no para determinar si el objetivo está cumplido.
5. **Documentación:** Se deben documentar todos los procesos descritos con anterioridad y se debe documentar el resultado de la comprobación para aceptar o no la validez de cumplimiento del criterio de verificación.

Habiendo establecido y explicado los procesos de verificación, se procede a dar un ejemplo de cada uno de los procesos acoplado a uno de los requisitos del sistema IPTC.

5.3. Inspección

Los procesos de inspección implican un examen detallado del producto, sus componentes o documentación para verificar su conformidad con los requisitos especificados. Esto puede incluir revisar requisitos, documentos de diseño, código, casos de prueba y otros artefactos. Las inspecciones pueden ser manuales o automatizadas, y ayudan a identificar defectos, inconsistencias o desviaciones de estándares o mejores prácticas. Algunos ejemplos de actividades de inspección son revisiones de código, revisiones de documentos de diseño y análisis de trazabilidad de requisitos.

Para ejemplificar este proceso se hará uso del requisito SyRS-149 de la tabla de requerimientos físicos 4.15, que especifica: ".E1 volumen del IPTC no debe superar 1 m³". Apegándonos al esquema establecido

en la sección anterior el proceso de inspección se verá de la siguiente manera:

1. **Planificación:** Para este proceso se necesitará solamente una persona, se estudiarán las dimensiones externas de la carcasa mecánica del IPTC, dado que el volumen máximo es grande, se hará uso de un instrumento de medición graduado que permita medir una distancia máxima de 1 metro (una cinta métrica, regla, medición láser, etc.)
2. **Preparación:** La persona que efectuará la medición deberá familiarizarse con la forma correcta de utilizar el instrumento de medición (correcta lectura, posicionamiento, etc.), además, deberá conocer la forma correcta de hacer las mediciones de una forma estadísticamente válida siguiendo principios de metrología y debe asegurarse que el instrumento a utilizar esté debidamente reglamentado dentro del estándar [39].
3. **Ejecución:** La persona efectuando la medición, deberá medir cada una de las distancias relevantes para obtener el volumen del artefacto haciendo uso del instrumento de medición y teniendo en cuenta las buenas prácticas de metrología.
4. **Comprobación:** Una vez obtenido el volumen real del artefacto, este se comparará con el volumen especificado de 1 m^3 , si el volumen medido es menor, el requerimiento estará cumplido, si es mayor, se debe identificar por cuanto más para evaluar un rediseño o si no es una desviación crítica darlo por aprobado.
5. **Documentación:** Todo el proceso de inspección se documentará en un archivo de texto que especifique cada uno de los pasos seguidos, los resultados obtenidos y si el criterio de aprobación se cumplió o no.

5.4. Revisión

Las revisiones son evaluaciones sistemáticas de componentes, documentos o artefactos de un producto. Su objetivo es identificar defectos, evaluar el cumplimiento de los requisitos y garantizar que el producto

cumpla con sus objetivos. Las revisiones generalmente involucran a un equipo de revisores que siguen un proceso estructurado para examinar el artefacto y proporcionar comentarios. Los tipos comunes de revisiones incluyen revisiones por pares, revisiones de la dirección y revisiones del cliente. El proceso de revisión puede implicar discusión, negociación y toma de decisiones para abordar los problemas identificados. Para este ejemplo se utilizará el requerimiento SyRS-105 de la tabla de requerimientos de interfaz de los módulos de testeo 4.10 que dicta: "Los módulos VELM, BTM y SAM deberán proveer una interfaz para comunicaciones con el ICM usando el controlador STM32, permitiéndole recibir comandos y enviar datos de telemetría usando el protocolo de comunicación estándar SPI". La revisión de este requerimiento será una revisión de diseño donde:

1. **Planificación:** El proceso de verificación será una revisión de diseño de interfaz, para esto, estarán presentes los miembros de los equipos de cada uno de los módulos de pruebas, del ICM y los ingenieros de sistemas e integración. Los objetos por analizar serán las conexiones de tarjetas STM32 que tendrán cada uno de los módulos de pruebas y el Raspberry Pi 4 que utilizará el ICM. Para pasar el criterio de aceptación se deberá comprobar que los tres módulos usan el mismo protocolo de comunicación que el ICM y que las conexiones físicas de los pines concuerdan entre los módulos, el ICM y programa de control.
2. **Preparación:** Para esta prueba, cada equipo deberá proveer la documentación de interfaces de su sistema y el dibujo ingenieril de su sistema.
3. **Ejecución:** Los ingenieros de sistema e integración harán uso de una lista de verificación para comprobar que cada uno de los módulos siguen los parámetros establecidos en el documento de comandos del sistema para su comunicación, además revisarán los dibujos ingenieriles para comprobar que la lógica de comandos y las conexiones físicas de los dibujos cumplen con los requerimientos de integración.
4. **Comprobación:** Se revisará el resultado de la lista de verificación, en caso de no cumplir con alguno de los chequeos, se deberá realizar un rediseño y repetir la verificación hasta cumplir con todos los

parámetros.

5. **Documentación:** Todo el proceso de revisión se documentará en un archivo de texto que especifique cada uno de los pasos seguidos, los resultados obtenidos y si el criterio de aprobación se cumplió o no.

5.5. Análisis

El análisis implica el uso de técnicas matemáticas, estadísticas o lógicas para evaluar la corrección, consistencia e integridad de un producto o sus componentes. Esto puede ayudar a identificar defectos, validar suposiciones y demostrar el cumplimiento de los requisitos. Ejemplos de técnicas de análisis incluyen análisis de código estático, métodos formales, modelado de confiabilidad y modelado de rendimiento. El análisis se puede utilizar para evaluar varios aspectos de un producto, como seguridad, protección, confiabilidad y mantenibilidad.

Para ejemplificar este proceso se hará uso del requerimiento SyRS-168 de la tabla de requerimientos ambientales 4.17 que especifica que: el sistema debe ser capaz disipar el 100 % de la potencia eléctrica que está diseñado para utilizar. Es decir, asumiendo que el sistema final tendrá una potencia máxima de 350 W, este debe ser capaz de disipar esa carga en su totalidad. Para este ejemplo, se asumirá que para cumplir con este requerimiento se implementó un disipador de calor pasivo. Siguiendo el proceso establecido:

1. **Planificación:** El proceso de análisis será una simulación de disipación de calor, para esto, se necesitará un software capaz de realizar este tipo de procesos, por ejemplo, Ansys o Comsol. El proceso puede ser llevado a cabo por la persona diseñadora del disipador, este, deberá ya existir como un modelo sólido en 3D con sus capacidades físicas.
2. **Preparación:** La persona que realiza la prueba deberá estar capacitada para hacer el uso correcto del software de simulación y obtener los resultados relevantes de la simulación. Esta persona deberá

planear el proceso de simulación y cuáles serán las variables y los diferentes entornos (basado en los otros requerimientos ambientales como temperatura y humedad) para los cuales se realizará la simulación.

3. **Ejecución:** Se realizará la simulación en el software con las variables y parámetros establecidos y se documentarán los resultados.
4. **Comprobación:** Los resultados de la simulación serán comparados con el requerimiento establecido, para este ejemplo, si la simulación indica que el disipador es capaz de disipar los 350 W habrá pasado la prueba, si no, se debe realizar un rediseño del disipador.
5. **Documentación:** Todo el proceso de análisis se documentará en un archivo de texto que especifique cada uno de los pasos seguidos, los resultados obtenidos de la simulación de adjuntarán al documento y se anotará si el criterio de aprobación se cumplió o no.

5.6. Demostración

La demostración es un método para mostrar que un producto o componente puede realizar su función prevista bajo condiciones específicas. Esto implica configurar un entorno controlado, ejecutar el producto y observar su comportamiento. Las demostraciones pueden ser útiles para confirmar que el producto cumple con sus requisitos y para obtener comentarios de las partes interesadas. A menudo se utilizan junto con otras actividades de verificación, como pruebas y análisis. En este caso, usaremos de ejemplo el requerimiento SyRS-133 de la tabla de requerimientos de mantenimiento [4.13](#) que especifica que cada módulo deberá tener un tiempo promedio de reparación menor a 1 hora.

1. **Planificación:** El proceso de demostración será realizar un proceso de reparación cronometrado en uno de los módulos. Se deberán identificar las herramientas necesarias para el ensamble y desensamble del módulo y un cronómetro para medir el tiempo elapsado desde el inicio de la acción de reparación hasta su final.

2. **Preparación:** La persona que realiza la prueba deberá tener a mano las herramientas necesarias para realizar el proceso, así como el componente a reemplazar y el módulo físico que lo contiene. Esta persona deberá conocer la arquitectura interna del sistema y los mecanismos para su ensamble y desensamble.
3. **Ejecución:** La persona reemplazará el componente empezando con un módulo completamente ensamblado, la prueba terminará una vez que el módulo se encuentre ensamblado nuevamente.

La prueba debe repetirse varias veces y para diferentes componentes.
4. **Comprobación:** : Se compararán los tiempos medios que duró la persona reemplazando el componente con el tiempo establecido en el requerimiento, si el tiempo medio es menor a una hora el requerimiento se habrá cumplido, si no, se deberá rediseñar.
5. **Documentación:** Todo el proceso de demostración se documentará en un archivo de texto que especifique cada uno de los pasos seguidos, los resultados obtenidos y se anotará si el criterio de aprobación se cumplió o no.

5.7. Pruebas

Las pruebas implican ejecutar el producto o sus componentes en condiciones controladas para identificar defectos y evaluar el cumplimiento de los requisitos. Las pruebas pueden realizarse a diferentes niveles, como pruebas unitarias, pruebas de integración, pruebas de sistema y pruebas de aceptación. También se pueden clasificar como pruebas funcionales o no funcionales, según el enfoque de la prueba. Las técnicas de prueba comunes incluyen pruebas de caja negra, pruebas de caja blanca y pruebas de caja gris. Las pruebas pueden ser manuales o automatizadas, según la complejidad del producto y los recursos disponibles. Para este ejemplo volveremos a utilizar el requerimiento SyRS-105 de la tabla de requerimientos de interfaz de los módulos de testeo 4.10 que dicta: "Los módulos VELM, BTM y SAM deberán proveer una interfaz para comunicaciones con el ICM usando el controlador STM32, permitiéndole recibir comandos

y enviar datos de telemetría usando el protocolo de comunicación estándar SPI". Esta prueba consistirá en enviar un comando desde el ICM hacia uno de los módulos y recibir datos de vuelta.

1. **Planificación:** Para la prueba, estarán presentes los miembros de los equipos de cada uno de los módulos de pruebas, del ICM y los ingenieros de sistemas e integración. Se analizará la recepción de comando y envío de datos por parte de los módulos. Para pasar el criterio de aceptación será recibir de forma exitosa el dato esperado para una batería de datos que se solicitarán.
2. **Preparación:** Se deberán realizar las conexiones correspondientes entre los módulos y el ICM, así como entre los módulos y sus respectivos elementos a testear. Se deberá tener un documento de entradas y salidas del sistema, así como una lista de verificación de estas.
3. **Ejecución:** Se enviarán comandos uno por uno a los módulos y se documentará la respuesta del módulo (si la hubo) o si no hubo respuesta.

La prueba debe repetirse varias veces y para diferentes comandos.
4. **Comprobación:** Se compararán las entradas y salidas del sistema con las entradas y salidas esperadas en la lista de verificación. Si se cumplen todos los procesos el requerimiento estará aprobado, si no, se deberá revisar si hay algo que esté afectando la prueba (por ejemplo, una mala conexión), si no hay algo afectando la prueba se debe revisar el software o rediseñar.
5. **Documentación:** Todo el proceso de la prueba se documentará en un archivo de texto que especifique cada uno de los pasos seguidos, los resultados obtenidos y se anotará si el criterio de aprobación se cumplió o no.

Capítulo 6

Conclusiones y Recomendaciones

6.1. Conclusiones

1. Se estableció una primera versión del concepto de operaciones del IPTC.
2. Se estableció la arquitectura funcional del IPTC.
3. Se estableció la arquitectura funcional de cada uno de los subsistemas del IPTC.
4. Se redactó un documento de Especificación de Requerimientos de Socios siguiendo lo establecido por la norma ISO 29148:2018 para el IPTC.
5. Se redactó un documento de Especificación de Requerimientos de Sistemas siguiendo lo establecido por la norma ISO 29148:2018 para el IPTC.
6. Se determinó una metodología para verificación haciendo uso de lo establecido en el estándar IEEE 1012-2016.
7. Se creó una hoja de Excel que compila todos los requerimientos del IPTC, el razonamiento del criterio y el método de verificación del requerimiento.

8. Se elaboró una primera versión del documento de archivo de los comandos del IPTC utilizando el protocolo SCPI.

6.2. Recomendaciones

1. Conforme avance el diseño y desarrollo del proyecto se deben revisar los requerimientos establecidos y se deben actualizar y profundizar según se necesite.
2. Se recomienda hacer un mejor uso de los canales de comunicación existentes para el proyecto, donde se pueda centralizar toda la información generada y se establezcan reuniones periódicas para comentar avances, así como para asegurarse que todas las personas involucradas estén al tanto del sistema como un todo y no como subsistemas o proyectos separados.
3. Los documentos de interfaces y de comandos deben ser actualizados conforme el proyecto avance para asegurarse que la información sea la más actual al finalizar el desarrollo del IPTC.
4. Se debe ahondar en los aspectos de normativas de calidad del proyecto, para garantizar que el producto final cumpla con todos los estándares requeridos para ser utilizado en la industria aeroespacial.
5. Se recomienda elaborar un diagrama Gantt del proyecto tomando como referencia los requerimientos obtenidos para asegurar que el proyecto pueda ser cumplido dentro del tiempo esperado para la ejecución de este.

Anexo A

Documento de comandos IPTC

Instituto Tecnológico de Costa Rica

COMMAND SYSTEM

Manual

Author:
Ronald Ríos Pineda

May 2023

Contents

Common commands	2
*IDN?	2
*RST	2
*CL	2
INSTRument commands	3
INSTrument:CATalog?	3
INSTrument:SElect	3
INSTrument:NSElect	4
INSTrument:INITiate[:ALL]	4
Configuration instructions	5
CONFigure:TIME	5
CONFigure:TINterval	5
CONFigure:TINterval:END	5
CONFigure:FREQuency	6
CONFigure:MODE	6
CONFigure:CURRent	7
CONFigure:VOLTagE	7
CONFigure:POWer	7
CONFigure:COUNT	8
CONFigure:ANGLE	8
Measurement instructions	8
MEASure:CURRent?	8
MEASure:VOLTagE?	9
MEASure:POWer?	9
MEASure:RESistance?	9
System instructions	10
SYSTem:ERRor?	10
Memory instructions	10
MEMory:CATalog[:ALL]?	10
MEMory:CATalog:MACRo?	10
MEMory:DElete <string>	11
MEMory:DElete:ALL	11

Common commands

*IDN?

Syntax *IDN?

Description Request instrument information.

Return Format Returns the instrument information in string, which includes four parts: manufacturer, model, serial number and version. The four parts are separated by commas.

Example *IDN?

*RST

Syntax *RST

Description Restores the factory default settings and clears the error and log queue.

Example *RST

*CLS

Syntax *CLS

Description Clears all event registers.

Example *CLS

INSTrument commands

INSTrument:CATalog?

Syntax INSTrument:CATalog?

Description Checks the instrument interface and returns all available instruments.

Return Format Returns a comma-separated list of strings which contains the names of all available instruments: ["BTM", "VELM", "SAM"]

Example INST:CAT?

INSTrument:SElect <identifier>

Syntax :INSTrument:SElect <BTM|VELM|SAM>

Description This command selects a instrument as the current instrument. When a instrument is selected, all other instruments are unavailable for programming until another is selected.

Parameter

- BTM: Battery Testing Module.
- VELM: Variable Electronic Load Module.
- SAM: Solar Array Module.

Remarks

- Only one identifier can be entered at a time.
- Case-insensitive identifiers.

Example INST:SEL BTM

Related Command INSTrument:NSElect

INSTrument:NSElect <numeric_value>

Syntax :INSTrument:NSElect <8|7|6>

Description This command selects a instrument as the current instrument. When a instrument is selected, all other instruments are unavailable for programming until another is selected.

- Parameter**
- 8: Battery Testing Module.
 - 7: Variable Electronic Load Module.
 - 6: Solar Array Module.

Remarks

- Only one integer can be entered at a time.

Example INST:SEL 8

Related Command INSTrument:SElect

INSTrument:INITiate[:ALL] [<identifier>], [<identifier>], [<identifier>]

Syntax INSTrument:INITiate[:ALL]

Description Initiate the instrument with the current configuration.

- Parameter**
- BTM: Battery Testing Module.
 - VELM: Variable Electronic Load Module.
 - SAM: Solar Array Module.

Remarks

- ALL is default.

- Example**
- INST:INIT
 - INST:INIT:ALL
 - INST:INIT BTM,VELM,SAM
 - INST:INIT BTM

Configuration instructions

CONFigure:TIME <numeric_value>

Syntax CONFigure:TIME <integer>

Description Sets the test time.

Parameter Integer greater than 0.

Remarks • This value is a reference to the scale time.

Example CONF:TIME 60

Related Command CONFigure:TINterval

CONFigure:TINterval <numeric_value>

Syntax CONFigure:TINterval <integer>

Description Sets the time interval between parameters.

Parameter Integer greater than 0.

Remarks • This value is a reference to the scale time.

Example CONF:TINT 30

Related Command CONFigure:TIME

CONFigure:TINterval:END

Syntax CONFigure:TINterval:END

Description Sets the end of the time interval.

Remarks • This command is available when an interval has been set.

Example CONF:TINT:END

Related Command CONFigure:TINT

CONFigure:FREQuency <numeric_value >

Syntax CONFigure:FREQuency <integer >

Description Sets the frequency for measurement.

Parameter

- Integer greater than 0.

Remarks

- This command is useful for measurements.

Example CONF:FREQ 2

CONFigure:MODE <numeric_value>

Syntax CONFigure:MODE <0|1|2|3|4>

Description Sets th mode for the instrument.

Parameter When BTM is selected:

- 0: Cycle.
- 1: Charge.
- 2: Discharge.
- 3: Waiting times.
- 4: Internal resistance.

When VELM is selected:

- 0: Simulate electronic load.
- 1: Read electronic load.
- 2: Not used.
- 3: Not used.
- 4: Not used.

When SAM is selected:

- 0: Maximum power parameters.
- 1: SC and OC parameters.
- 2: Solar simulator.
- 3: Read solar simulator.
- 4: Not used.

Remarks

- Avoid selecting unused modes.

Example CONF:MODE 0

CONFigure:CURRent <numeric_value>

Syntax CONFigure:CURRent <0 – 255>

Description Sets the current value.

Parameter • Numeric value between 0 and 255.

Remarks • This value is a reference to the current, each numerical value means a level in the resolution of the instrument.

Example CONF:CURR 2

Related Command • CONFigure:VOLTagE
• CONFigure:POWer

CONFigure:VOLTagE <numeric_value>

Syntax CONFigure:VOLTagE <0–255>

Description Sets the voltage value.

Parameter • Numeric value between 0 and 255.

Remarks • This value is a reference to the current, each numerical value means a level in the resolution of the instrument.

Example CONF:VOLT 30

Related Command • CONFigure:CURRent
• CONFigure:POWer

CONFigure:POWer <numeric_value>

Syntax CONFigure:POWer <0 – 255>

Description Sets the power value.

Parameter • Numeric value between 0 and 255.

Remarks • This value is a reference to the current, each numerical value means a level in the resolution of the instrument.

Example CONF:POW 60

Related Command • CONFigure:CURRent
• CONFigure:VOLTagE

CONFigure:COUNT <numeric_value>

Syntax CONFigure:COUNT <integer >

Description Sets cycles count for BTM.

Parameter • Integer greater than 0.

Remarks • Only available when BTM is selected.

Example CONF:COUN 10

CONFigure:ANGLE <numeric_value>

Syntax CONFigure:ANGLE <0 – 90 >

Description Sets the angle for SAM.

Parameter • Integer between 0 and 180.

Remarks • Only available when SAM is selected.

Example CONF:SAM 45

Measurement instructions

MEASure:CURRent?

Syntax MEASure:CURRent?

Description Reads the current of the instrument.

Return Format Returns the measurement of current as a function of time.

Example MEAS:CURR?

Related Command • MEASure:VOLTage?
 • MEASure:POWer?

MEASure:VOLTage?

Syntax MEASure:VOLTage?

Description Reads the voltage of the instrument.

Return Format Returns the measurement of voltage as a function of time.

Example MEAS:VOLT?

Related Command

- MEASure:CURRent?
- MEASure:POWer?

MEASure:POWer?

Syntax MEASure:POWer?

Description Reads the power of the instrument.

Return Format Returns the measurement of power as a function of time.

Example MEAS:POW?

Related Command

- MEASure:CURRent?
- MEASure:VOLTage?

MEASure:RESistance?

Syntax MEASure:RESistance?

Description Reads the internal resistance when BTM is selected.

Remarks

- Only available when BTM is selected.

Return Format Returns the measurement of internal resistance.

Example MEAS:RES?

System instructions

SYSTem:ERRor?

Syntax SYSTem:ERRor?

Description Queries the last error message in the error queue and clears the error message.

Return Format The query returns the contents of the error message.

Example SYST:ERR?

Memory instructions

MEMory:CATalog[:ALL]?

Syntax MEMory:CATalog[:ALL]?

Description Returns the name of the current files saved in memory.

Return Format The returned data shall be in the following form: <file_name>,<type_name>

Example MEM:CAT:ALL?

MEMory:CATalog:MACRo?

Syntax MEMory:CATalog:MACRo?

Description Returns the name of the current macro files saved in memory.

Return Format The returned data shall be in the following form: <file_name>,<type_name>

Example MEM:CAT:MACR?

Apéndice A

IPTC Stakeholder Requirement Specification (STRS)

IPTC: Stakeholder Requirement Specification (StRS)

1. Introduction

The purpose of this document is to specify the stakeholder requirements for the Integrated Power Testing Module for CubeSats (IPTC) that will be developed by the Space Systems Laboratory of the Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC), from the perspective of the stakeholders. This document is intended to ensure that the IPTC meets the needs of its stakeholders and is fit for purpose.

1.1. Stakeholder purpose

The joint venture for this project is comprised of SETEC Lab and Delta Lab from the Costa Rica Institute of Technology (TEC), the Kyushu Institute of Technology, and Anhalt University of Applied Sciences. These academic institutions share a common goal of conducting research and advancing knowledge. However, they also recognize an opportunity to develop a product that can generate revenue to support further research and lab activities. To this end, an open-source platform will be developed and made available online, allowing anyone to build their own device. Additionally, the labs will offer a service to construct and ship the product to interested parties.

The primary objective of this project is to create a reliable tester for CubeSat Power Subsystems. These subsystems are often the cause of critical failures in CubeSats, which are small satellites that have become increasingly popular in recent years. By developing this tester, the project team aims to provide CubeSat developers with a way to test their systems before launching them into space. This will help reduce avoidable failures and contribute to the advancement of science and technology.

1.2. Stakeholder scope

The business domain under consideration for this project is the development of testing devices for CubeSat power subsystems.

a) The business domain is named as the development of testing devices for CubeSat power subsystems.

b) The range of business activities included in the business domain are the design, development, and manufacturing of testing devices for CubeSat power subsystems. The scope includes the organizational divisions involved in these activities, such as engineering, research and development, and manufacturing. The scope also includes external entities that directly relate to the business, such as suppliers and customers who purchase the testing devices. The scope does not include environmental entities outside of the CubeSat power subsystem testing industry.

c) The system being developed will support the testing of CubeSat power subsystems. The scope of the system includes the assumption that it will support the business activities of engineering, research and development, and manufacturing. The system will be designed to meet the needs of CubeSat developers who require reliable testing devices for their power subsystems before launching them into space. This tester will specifically conduct test as a: Solar Array Simulator (SAS), Variable Power Load Simulator and a Battery Charge and Discharge Cycle Simulator.

1.3. Overview

The business domain concerned with the development of testing devices for CubeSat power subsystems involves several major internal divisions and external entities that are interrelated.

Internal divisions include:

Engineering: responsible for designing and developing the testing devices and ensuring they meet the required specifications.

Research and development: responsible for conducting research on CubeSat power subsystems and identifying potential areas for improvement in the testing devices.

Manufacturing: responsible for manufacturing the testing devices and ensuring they comply with the quality assurance needed.

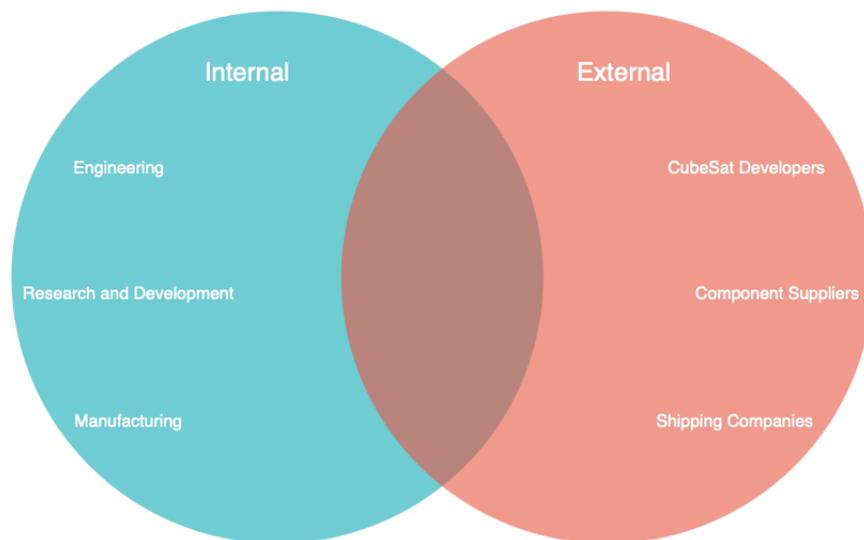
External entities include:

CubeSat developers: customers who purchase the testing devices for use in their CubeSat projects.

Suppliers: provide the necessary components and materials needed for manufacturing the testing devices.

Shipping companies: responsible for transporting the testing devices to customers.

Testing devices for CubeSat power subsystems



1.4. Stakeholders

List the stakeholders or the classes of stakeholders and describe how they are related to the development and operation of the system.

Stakeholder	Description	Contact Information
Developers		
SETEC Lab	Johan Carvajal Godinez	johcarvajal@itcr.ac.cr
Delta Lab	Juan José Rojas	juan.rojas@tec.ac.cr

Kyushu Institute of Technology	Pooja Lepcha	lepcha.pooja586@mail.kyutech.jp
Anhalt University of Applied Sciences	Hugo Sánchez	husanchez@itcr.ac.cr
Clients		
National University (Mongolia)	Turtogtokh Tumenjargal	turtogtox@gmail.com
Nepal Ministry of Technology	Abhas Maskey	editor@madeinepal.com
Agencia Espacial de Paraguay	Adolfo Jara	javier.jara-cespedes758@mail.kyutech.jp
National Astronomical Research Institute of Thailand	Phongsakorn Meemak	phongsakornmyart@gmail.com
Philippines Space Agency	Izrael Bautista	izrael.bautista@philsa.gov.ph
California Polytechnic Institute	Pauline Faure	pfaure@calpoly.edu
Honduras National Autonomus University	Reinel Galindo	rosales.reynel-josue457@mail.kyutech.jp
Buthan Telecommunications Ministry	Kiran Pradhan	kkpradhan@dit.gov.bt

1.5. Definitions

CubeSat: Small satellite measured in units of 10x10x10 cm.

Tester: A device that tests the functioning of something.

Solar Array: Array of solar panels connected and working in conjunction to convert solar energy into electrical energy.

Electronic Load: A device designed to provide a load to the outputs of a power supply, usually capable of dynamic loading, and frequently programmable or computer controlled.

Open source: denoting software for which the original source code is made freely available and may be redistributed and modified. This principle also applies to hardware, where the materials engineering drawings and assembly instructions are also made publicly available.

1.6. Acronyms and abbreviations

IPTC: Integrated Power Testing module for CubeSats

VELM: Variable Electronic Load Module

BTM: Battery Testing Module

SAM: Solar Array Module

CPM: Configurable Power Module

CIM: Control and Interface Module

GUI: Graphic User Interface

UX: User Experience
PC: Personal Computer
V: Volts
VC: Variable Current
CC: Continuous Current
TEC: Costa Rica Institute of Technology
Kyutech: Kyushu Institute of Technology
SETEC Lab: Space Systems Laboratory of the Costa Rica Institute of Technology
1U: 1 Unit

2. Business management requirements

2.1. Business environment

In order to understand the business environment of the testing devices for CubeSat power subsystems, both internal and external factors need to be taken into consideration. These factors will help in eliciting stakeholder requirements for the system to be developed or changed.

External environmental factors include:

Market trends: The market for CubeSat power subsystems testing devices is rapidly growing, with more CubeSat projects being launched every year. The demand for reliable and accurate testing devices is increasing. This, added to the fact that there are no specialized testers for CubeSats make the market a “blue ocean” for this product.

Technology base: The technology used in CubeSat power subsystems testing devices is constantly evolving. New technologies such as artificial intelligence and machine learning can potentially improve the accuracy and reliability of testing devices.

Internal environmental factors include:

Organizational culture: The organizational culture of SETEC Lab and Delta Lab, the Kyushu Institute of Technology, and Anhalt University of applied sciences will influence the development of testing devices for CubeSat power subsystems.

Business strategy: The business strategy of the organizations involved will also affect the development of the testing devices. In this case, the product will be developed to be an open-source product with an occasional order from a client.

Available resources: The resources available, such as funding and personnel, will affect the development and manufacturing of the testing devices. As this project will be developed by academic entities, expectations must be adjusted to the timelines pertaining manufacturing and development in this context.

These factors should be taken into consideration when eliciting stakeholder requirements for the system to be developed or changed.

2.2. Mission, goals, and objectives

The IPTC project seeks to create an open-source testing platform for the power systems of CubeSats ranging from 1U to 3U. Delta Lab and SETEC Lab are developing this product to provide CubeSat developers worldwide with a useful tool for testing their technology that will help scientific and technological advancement. The documentation on how to produce the IPTC will be free of charge, however, if a client wishes so, SETEC Lab and Delta Lab could charge a fee for producing and shipping an IPTC.

The defined objectives of the project, as presented to the Research and Development Office of TEC are:

General Objective:

- Develop an integrated and modular testing system for power systems in CubeSats.

Specific Objectives:

- Develop a Configurable Power Module (CPM) that can operate as a solar array simulator, battery charger, battery discharger, or electronic load, as required.
- Develop a Control and Interface Module (ICM) that is responsible for user interaction, communication, and control of the CPMs.
- Develop a suitable chassis to integrate the devices that make up the system.
- Integrate the testing system for power systems in CubeSats.

Additionally, it must be noted that even if these are the only objectives presented officially to TEC, as stated before, the motive of this project is to make a usable tester that will be able to solve the necessities of the stakeholders. As such, after these objectives are met, a testing phase should also take place and a documentation process to let others understand how this testing modules were developed and integrated, letting them build their own or have Delta Lab and SETEC Lab assemble the tester and ship it to them. Which is why, two more specific objectives will be considered:

- Test the integrated IPTC on normal and extreme conditions to ensure it works as expected and is safe to use, following the ISO testing standard 17025:2005.
- Compile and document all the necessary information for the assembly and operation of the IPTC in the form of a user manual.

2.3. Business model

The business model for the testing devices for CubeSat power subsystems project involves the development of an open-source platform that can be used by anyone who wants to build their own testing devices. In addition, the lab will offer the service of constructing and shipping the product to interested parties.

The product and services offered by the project include the open-source platform and the testing devices themselves. The project aims to target CubeSat developers and manufacturers, as well as universities and research institutions that are involved in CubeSat projects.

The geographies and locales targeted by the project include countries with a strong presence in the CubeSat industry, such as the United States, Japan, and Europe. In addition to these countries, this product will also see a strong push on developing space nations and regions such as Latin America, Asia-Pacific and Africa, who are all developing their own CubeSats.

Distribution channels for the testing devices include established b2b relationships with academic institutions working in these kinds of projects as well as the publication of scientific papers detailing the research that will be available to the public and the industry.

The project aims to build alliances and partnerships with other academic institutions and industry players involved in the CubeSat industry, while also strengthening existing relationships between TEC and other institutions. This will help to build a strong network and increase the visibility of the testing devices.

The finance and revenue model for the project includes revenue from the sale of testing devices, as well as revenue from the service of constructing and shipping the devices. The project aims to generate an additional revenue for the laboratories to fund their research activities.

2.4. Information environment

a) Project portfolio - The testing devices for CubeSat power subsystems project is part of the overall research and development portfolio of SETEC Lab and Delta Lab, both from the Costa Rica Institute of Technology (TEC), the Kyushu Institute of Technology, and Anhalt University of applied sciences. The priority and positioning of this project in the portfolio are determined by its potential to contribute to the generation of knowledge and the advancement of science and technology.

b) Long-term system plan - The testing devices for CubeSat power subsystems project aligns with the long-term system plan of the labs involved. The project will follow the established system infrastructure and architecture guidelines, and the constraints will be considered when making design decisions. The project will be carried out mostly by students working on their graduation thesis as well as assistants under the guidance of the laboratories professors.

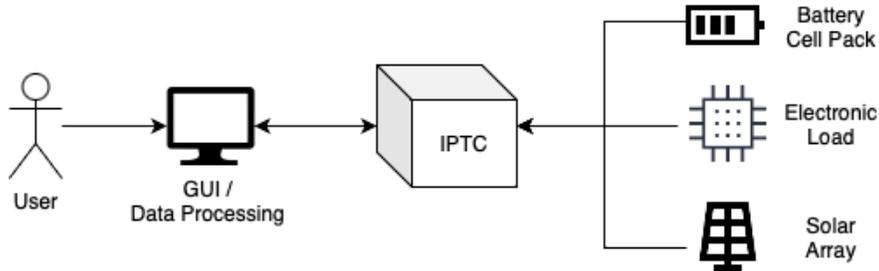
c) Database configuration – This project follows work previously done by Ph.D. Juan José Rojas at Kyutech, as such, his findings and research will be instrumental in the development of the project. There are also some graduation theses made by assistants of the laboratories addressing the early prototypes of some of the modules that will integrate the final product. Additionally, much information is available on the internet. Constraints on the availability and accessibility of this data have been identified and will be taken into consideration during the development of the system.

Overall, the information environment for the IPTC is guided by the larger strategic goals of the academic institutions involved. The project will align with the long-term system plan. The project portfolio management strategy will guide the prioritization and positioning of the project within the larger portfolio of research and development projects.

3. System operational requirements

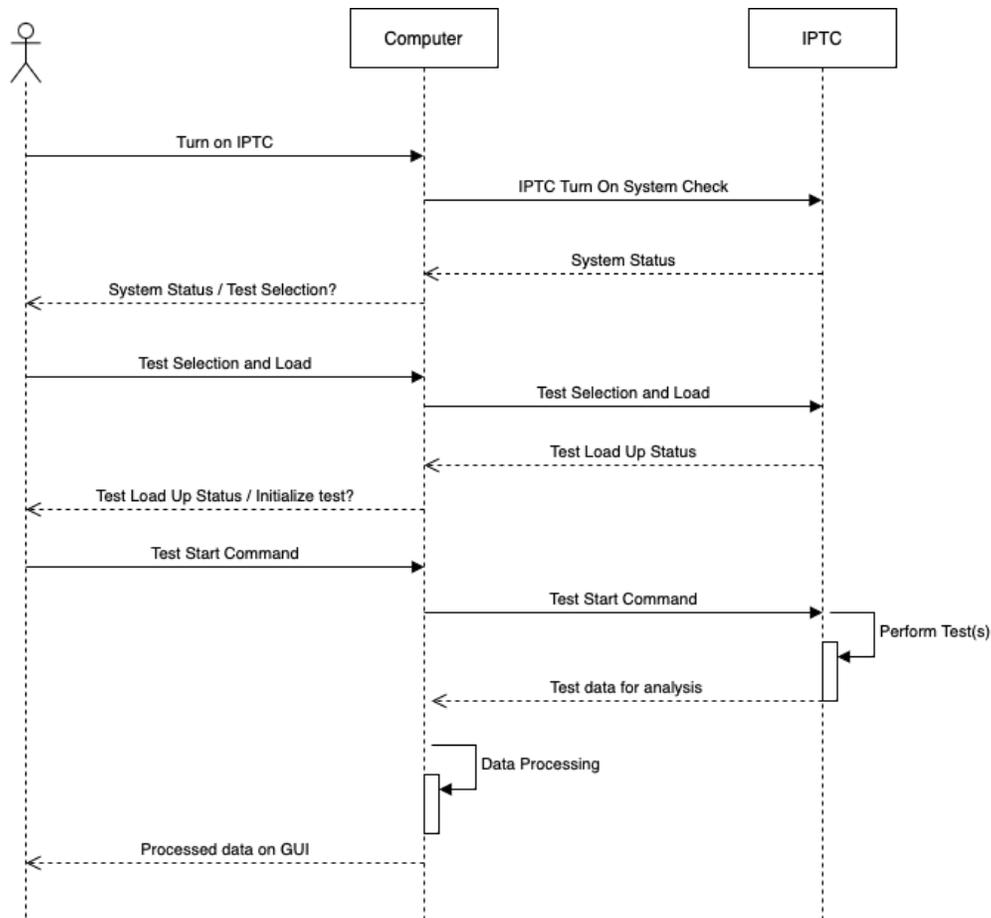
3.1. System process

The IPTC is an integrated small satellites power systems tester. As such, in its most high-level conceptualization, it serves as an interface between a component of the power subsystem of a CubeSat and the user. The IPTC has the capacity of measuring different variables, storing them, and communicating with a computer that will analyze the data.



At the business level, the system must be capable of:

1. Let the user select different types of tests (Battery Screening Test, Variable Electronic Load Test and Solar Array Simulation Test) for CubeSats power subsystems (P1).
2. Act in conjunction or as single test modules (P2).
3. Process and analyze the test data (P3).
4. Hand the processed data to the user by using an intuitive GUI coupled with UX techniques (P4).



3.2. System operational policies and rules

In this case, the regulatory and operational policy requirements will follow the standard set by the International Electrotechnical Commission (IEC) Guide 116:2018, which provides guidelines for safety risk assessment and risk reduction for low-voltage equipment. This guide specifies various risk management strategies for equipment operating at voltage levels below 1000 VAC and 1500 VDC.

3.3. Operational Constraints

Some of the operational constraints that can be devised thus far, and which will be addressed and expanded upon on the SyRS document are:

- Usage policy: This system cannot directly or indirectly be used for any illegal or military applications.
- Data Privacy: All the data generated while using the IPTC will be solely accessible to the person using the device. There must not exist any way to get the information without the user's knowledge.

- Intellectual Property Policy: This device will be open source and can be used freely by any party interested. However, the device's intellectual property belongs to SETEC and Delta Lab and the device cannot be replicated for profit by any third party.
- Safety Policy: The system documentation will include a user's manual, SETEC and Delta Lab will not be responsible for any accident related to use outside of the user's manual instructions.

3.4. System operational modes and states

- Normal mode: This is the default mode of operation for the system, where it is functioning normally and performing its intended functions.
- Maintenance mode: This mode is used when the system requires maintenance or updates and may involve shutting down certain functions or components temporarily.
- Emergency mode: This mode is activated in the event of a critical failure or emergency and may involve prioritizing certain functions or actions to ensure safety and minimize damage.
- Validation and calibration mode: This mode is used for testing and validation purposes and may involve running the system in a simulated environment or with limited functionality.

3.5. System operational quality

Regarding the system operational quality, a number of factors have been identified to let the IPTC perform as desired by the users. These factors are listed in order of priority.

1. Reliability: The IPTC system should be able to handle a large volume of data and transactions with minimal latency.
2. Accuracy: The readings of the IPTC must be reliable with one another, the system should be able to provide accurate measures and be calibrated to ensure the quality of these measurements.
3. Compatibility: the system should be designed to work seamlessly with different hardware configurations and be able to interact with different devices under test.
4. Security: The system should be protected from unauthorized access or malicious attacks.
5. Maintainability: The IPTC system should have established maintenance routines to ensure the system keeps working as intended. It should be easily serviced and upgraded when necessary both hardware and software wise.
6. User friendly GUI: The system must have a user friendly and intuitive GUI that enables the researchers to focus on the data and not on having to configure the computer to show what they want to see. It must be easy to navigate and show different screens of interest.
7. Portability: The system must be portable; it should be possible to move it around inside the lab and to different laboratories.
8. Mobile App Connection/ Built-in Screen: The system should be able to display data when disconnected from a computer, for example with a mobile app or a built-in screen.

4. User requirements

To understand the user requirements a survey was filled out by the stakeholders presented on 1.4. These requirements were compiled on a survey findings document, later, they were processed and summarized on this section to enable a better understanding of the user requirements for the IPTC.

Quality criteria:

- **Measurements:** The measurements performed by the tester must be precise and accurate. The system shall be able to be calibrated and produce data that is valid for meeting the launch requirements provided by the different launch entities such as space agencies and launch providers and integrators.
- **Reliability:** The system must be able to handle a large volume of data and transactions with minimal latency. The system must be able to operate for hours on end without any decrease in its performance.
- **Security:** The system should be protected from unauthorized access or malicious attacks. The system shall also be safe to operate within the system operational boundaries without posing a threat to the user.
- **Pricing:** The system must be priced in a manner that makes it affordable for users with restrictive budgets in research laboratories in developing space nations.

Interaction requirements:

- **Software preferences:** The system shall be able to be integrated with both, Python or other open-source options, and LabView.
- **Data and communications:** The system shall be able to seamlessly handle different types of data and convert them to the internal code of the system allowing it to function with different types of data sources.
- **Test selection, load up and data:** The test selection, load up and data visualization of the system shall be intuitive and seamlessly integrated to the software of the system.
- **Testing interfaces:** The testing interface between the IPTC and the testing devices must be easy to use, the tester must account for easy and safe connections using industry standard connectors for the intended measurements.
- **Portability:** The system shall be designed with portability in mind. The whole system must have mechanical elements that allow movement from one place to another, the whole ensemble must have a volume equal to or less than 1 cubic meter.
- **Maintainability:** The system must have established maintenance routines to ensure the system keeps working as intended. It should be easily serviced and upgraded when necessary both hardware and software wise. All the internal elements must be correctly labeled to allow for easy identification. The system must also be designed with maintenance in mind, ensuring that each individual component must be reasonably easy to reach, measure, test and if needed, changed for a new one.

Context of use:

- **Users:** The IPTC will be used by professionals in the aerospace sector. Specifically, CubeSat developers, project managers and researchers. All of these have technical backgrounds and have a basic knowledge of how to operate power system testers.

- Facilities: This tester will be mostly used on research facilities and clean room facilities. The system must be able to withstand everyday use on a research laboratory environment.
- Region: These facilities will be in Latin America, North America, Europe, and the Asia-Pacific region. The tester must have instructions that all these users can understand, as such, it must be completely developed and documented in English.

These regions have different power outputs, and the system shall account for these differences in voltage, frequency and type of power socket to be able to be used on the different regions.

Given the fact that these regions have vastly different climates, and most of them will be installed in research facilities, the IPTC system must be able to operate in different temperature and humidity ranges. The conditions to be accounted for are room temperatures without any active weather control in the stated above regions.

Operational scenarios:

- Solar Array Simulator: This mode of operation is conducted by the Solar Array Module (SAM). The module must be able to simulate both, a single face of a 1 to 3U CubeSat solar array, or the whole solar array for CubeSats of the volume stated above.

The module should be able to operate as triple junction panels. It must be able to receive the open circuit voltage curve parameters, maximum power voltage, maximum power current, short-circuit current and angle as inputs and generate an operational curve for the user as an output.

- Variable Electronic Load Module: The VELM of the IPTC will simulate an electronic load for the power system that is being tested. The VELM must let the user select between constant voltage, current or power modes. It must be able to measure voltage, current and power from the power system bus. It must also be able to change duty cycles depending on the read values.
- Battery Testing Module (BTM): The Battery Testing Module must be able to charge and discharge batteries, it must also be able to interact with the user to define the number of cycles for charge and discharge, as well as define variable current and continues current parameters with a maximum of 30V in VC and 5-10 V in CC.

The BTM must gather the necessary data to generate a CC charge and discharge graph with the CC and Voltage measurements. The system must be able to provide the state of charge of the cell packs at any given time of the test to the user. Finally, the BTM must be able to perform battery screening tests.

- Multiple module linkup: The modules of the IPTC must be able to operate in stand-alone mode, however, they must also be able to connect with each other to simulate more complete power systems. The integration between modules must be easy to achieve and work with the included system components. The module integration must not impact the performance of the tester.
- Tester without computer mode: The tester must be able to operate without the use of a computer for simple tests, in a stand-alone mode, however, the specific use cases of the stand-alone mode must be limited to a specific subset of the systems capabilities unless paired with another terminal such as a mobile app.

- Connection: The tester must be able to connect with the internet for data storage and transmission, however, the IPTC must also be able to store data internally and download it to a computer terminal when the user wants to.

Usability requirements:

- GUI: The system must have a user-friendly GUI that allows for easy operation and data visualization.
- Buttons and outside elements: The tester must have correctly labeled buttons and outside elements such as connections, sockets, etc. As well as security indications to allow for a safe operation.
- Load up and operation times: The system must be able to operate and provide data in a quick manner. The load up times and communication times must be optimized to allow for a good user experience.
- User manuals and documentation: The IPTC must be bundled with complete and detailed documentation and user manuals, for its operation, construction, and maintenance.

5. Detailed life cycle concepts of proposed system

5.1. Operational Concept

This section describes the desired operational concept of the IPTC as well as information that must be considered during the design process.

a) Operational policies and constraints:

- The system must have intended use policies written, to ensure the safety of the users. These include operational conditions, correct handling and connections, test variable ranges, amongst any other relevant data.
- Maintenance guides and policies will ensure the safety of the person doing maintenance activities on the system as well as ascertain the integrity of the system and release the stakeholders from any possible damage incurred while correctly undertaking these activities.

b) Description of the proposed system:

The IPTC system works as a data collection and processing tool between the user and the CubeSat power system component to be tested. The IPTC is an integrated system composed of three testing modules that can operate in conjunction or as stand-alone elements. These modules are the Solar Array Module (SAM), the Variable Electronic Load Module (VELM) and the Battery Testing Module (BTM). These modules allow for testing of different power system components in CubeSats, the system then processes and analyzes the data and gives it back to the user through a user-friendly GUI.

c) Modes of system operation:

The IPTC can operate as a SAM, BTM or VELM individually or can have multiple modules interacting with each other to simulate complex power systems of the CubeSat. The operational mode will be selected by the user through the GUI and the tests that will be performed must be loaded up by the user through the computer.

d) User classes and other involved personnel:

The IPTC will be used by:

- The client: which includes CubeSat developers, researchers, and Project Managers.

- Maintenance personnel: The maintenance must be performed by qualified personnel or clients with the according technical knowledge to perform these activities.

e) Support environment:

The IPTC will operate in research laboratories and clean room facilities. These facilities will not necessarily be controlled environments. As such, the device shall be resistant to different weather conditions and the outer shell shall be made of a resistant material for everyday use.

The IPTC will be used around the globe, as such, it must consider the different power standards of each region, as well as have instructions that can be understood by the users on these regions.

Lastly, the IPTC will mostly be used in conjunction with a computer and should have the connections necessary to interface with these devices as well as with the broad range of devices that will be tested with the equipment.

5.2. Operational Scenarios

a) Testing:

For testing, first the user will have to prepare the device that will be tested. This involves physically connecting it to the IPTC through the module that wants to be used using the connectors selected for this task.

Then, the user will interact with the IPTC through a GUI that will enable the user to select the module or modules they want to use for testing as well as specifying test parameters before loading up the test to the IPTC. If the test parameters are correct, the user will initialize the test and the system will start recording the test data, which will then be processed by the computer and displayed on the GUI.

b) Maintenance:

The system will have a maintenance mode that will enable the user to troubleshoot and find errors and problems that might affect the IPTC. These problems will be displayed to the user through the GUI under the maintenance mode option. If the user finds a problem, they must look for the problem inside of the maintenance manual that will be included in the documentation of the system. Once the problem is identified, the system will enable the user to fix the issue through the GUI if it is a software issue or by turning off the system, disassembling it and fixing the issue if it is a hardware problem.

Since the system will be able to connect to the internet, patches and software updates will be possible and will be implemented through a GUI prompt.

6. Other detailed concepts of proposed system

Acquisition: The IPTC will be an open-source device. As such, anyone in the world can find the documents needed to make their own through a website (i.e., GitHub). Once they obtain the

documents, they can source the required parts themselves and download the software to make the system work.

SETEC Lab and Delta Lab will also offer the service of building and shipping the IPTC directly to customers that may want one but do not want to build it themselves. This service will have a price and generate revenue.

Deployment: The device will have instruction manuals detailing how to build it and use it so that users can easily start doing tests with it.

Support: Documentation will be made readily available through the web. Also, being an open-source project, any additions, fixes, etc. That different users from around the world implement will be available to the user community so that the system can continue to operate in the best way possible through its life cycle.

Retirement: The IPTC will have a recommended lifetime, after which, some of the components may fail. Which is why, the users must dispose of it when it is no longer serviceable.

7. Project constraints

Timeline: The design and development of the IPTC must take place on the next two years (2023-2024).

Budget: The project will have a limited budget that must be accounted for in a case-to-case basis as the budget will come from the research and development department of TEC.

8. References

Rojas, J., Carvajal, J. (2021). Project Proposal *“Desarrollo de un sistema integrado para la prueba de sistemas de potencia en CubeSats”*

International Standard Organization. (2018). Systems and software engineering — Life cycle processes — Requirements engineering (Norm num. 29148).

Apéndice B

IPTC System Requirements Specification (SyRS)

IPTC: System Requirement Specification (SyRS)

1. Introduction

The Integrated Power System Tester for CubeSats (IPTC) is a system designed to test the power subsystem of CubeSat spacecraft. The IPTC is intended to be used during the testing and validation phases of the spacecraft development lifecycle, providing engineers with a reliable tool to ensure the performance and functionality of the power system.

The IPTC is a complex system composed of multiple hardware and software components, each with specific functionalities and requirements. The system will be able to function as a modular tester, allowing it to function in stand-alone mode or in conjunction with the different modules of the tester. It will be able to perform as a solar array simulator, as a variable electronic load and perform battery screening tests. The purpose of this System Requirements Specification (SyRS) is to define the functional and non-functional requirements that the IPTC system should satisfy in order to meet the needs of its users and stakeholders.

This SyRS is based on ISO 29148:2018, which provides guidelines for the specification of the system requirements. The document is organized into several chapters, each covering a different aspect of the IPTC system. Chapter 1 describes the overall characteristics of the system. Chapter 2, describes the overall system architecture and identifies the main components and interfaces. It also specifies the functional requirements, defining the main use cases and scenarios that the system should support. Finally, Chapter 3 defines the verification processes for the established requirements in order to allow the developers of the system to check for the compliance of their solutions against the specifications of this document.

1.1. System purpose

The Integrated Power System Tester for CubeSats (IPTC) is being developed to provide a reliable and efficient tool for testing the power subsystem of CubeSat spacecraft. The purpose of the IPTC is to ensure that the power system of CubeSat spacecraft is functioning properly and meets the requirements of its intended mission.

The IPTC is designed to be used during the testing and validation phases of the spacecraft development lifecycle. The system will provide engineers with a comprehensive set of tests and analysis tools to assess the performance and functionality of the power system. The IPTC is also intended to simplify the testing process by providing an integrated testing solution that reduces the need for multiple test instruments.

The system will include several key components, including power supply units, load banks, data acquisition devices, and a software interface on a computer for controlling and monitoring the test process. The system will be designed to support a wide range of CubeSat spacecraft (1-3U) and power system configurations, allowing engineers to easily adapt the IPTC to their specific needs.

The IPTC will be developed with the following objectives in mind:

General Objective:

- Develop an integrated and modular testing system for power systems in CubeSats.

Specific Objectives:

- Develop a Configurable Power Module (CPM) that can operate as a solar array simulator, battery charger, battery discharger, or electronic load, as required.
- Develop a Control and Interface Module (ICM) that is responsible for user interaction, communication, and control of the CPMs.
- Develop a suitable chassis to integrate the devices that make up the system.
- Integrate the testing system for power systems in CubeSats.

The IPTC is being developed in response to the need for a reliable and efficient tool for testing CubeSat power systems. The system will be designed to meet the needs and expectations of spacecraft engineers and developers, ensuring that the power system of CubeSat spacecraft is functioning properly and meets the requirements of its intended mission and will play a critical role in ensuring the success of CubeSat missions by providing engineers with the necessary tools to evaluate and optimize the performance of the power system.

1.2. System scope

a) The system being produced is the Integrated Power System Tester for CubeSats (IPTC). It is a testing tool designed to evaluate the performance and functionality of the power subsystem of CubeSat spacecraft.

b) The needs analysis conducted earlier identified the following problems faced by spacecraft engineers when testing the power subsystem of CubeSat spacecraft:

- Lack of a comprehensive and reliable testing tool specifically designed for CubeSat power systems.
- Difficulty in performing accurate and efficient testing using multiple test instruments.
- Inability to easily adapt testing tools to different CubeSat power system configurations.
- Risk of damage to the CubeSat power system during testing.

The IPTC will address these problems by providing engineers with a comprehensive and reliable testing tool specifically designed for CubeSat power systems. The IPTC will provide a simplified testing process that reduces the need for multiple test instruments, and it will support a wide range of CubeSat power system configurations. The IPTC will also ensure the safety of the test environment and the integrity of the CubeSat power system.

c) The IPTC will provide several top-level benefits, objectives, and goals, including:

- Improved reliability and performance of CubeSat power systems through accurate and efficient testing.
- Increased efficiency in the testing process using a comprehensive and integrated testing tool.
- Enhanced flexibility and adaptability through support for a wide range of CubeSat power system configurations.
- Improved safety and reduced risk of damage to the CubeSat power system during testing.
- Improved data collection and analysis to inform engineering decisions and ensure mission success.

The IPTC will be a critical tool in the development and testing of CubeSat power systems. The system will be designed to meet the needs and expectations of spacecraft engineers and developers, ensuring that the power system of CubeSat spacecraft is functioning properly and meets the requirements of its intended mission.

1.3. System overview

1.3.1. System context

The IPTC system interacts with several external entities. These entities include the CubeSat power system being tested, the test environment, the operator using the IPTC system, and the computer running the IPTC Graphical User Interface (GUI).

The CubeSat power system is the primary element that the IPTC system interacts with. The power system may include solar panels, batteries, power management circuitry, and other components required to generate, store, and distribute power within the spacecraft. The IPTC system will interface with the CubeSat power system through a set of standard interfaces, such as power input/output ports, communication protocols, and power system control signals.

The test environment is another external entity that the IPTC system interacts with. This includes the physical environment in which the CubeSat is placed during testing, as well as any other equipment or infrastructure required to support the testing process. The IPTC system will interface with the test environment through passive components such as the system's case and the temperature regulation devices the system will have on its components.

The operator is a human element that interacts with the IPTC system during the testing process. The operator will use the IPTC system to initiate and monitor the testing process, as well as to collect and analyze data generated during the testing. The IPTC system will provide a user interface that is intuitive and easy to use, allowing the operator to perform testing tasks efficiently and accurately.

The computer running the IPTC GUI is another external entity that interacts with the IPTC system. The GUI will provide a visual representation of the data generated during testing, as well as controls for initiating and monitoring the testing process. The IPTC system will interface with the GUI through a software interface, allowing data to be transferred between the IPTC system and the GUI.

1.3.2. System functions

The IPTC system is designed to provide comprehensive testing capabilities for CubeSat power systems. The system functions are categorized into the following major areas:

- Test Setup and Configuration: The IPTC system allows the operator to select the appropriate test parameters, configure the system for the specific test being performed, and set up the test environment.

- Test Execution: Once the test has been configured, the IPTC system initiates the test process and monitors the performance of the CubeSat power system during the test.
- Data Acquisition and Analysis: During the test, the IPTC system collects data from various sensors and instruments, including voltage probes, current sensors, and temperature sensors. The IPTC system processes this data and generates graphical and numerical representations of the data for the operator to analyze.
- Test Reporting: Once the test is complete, the IPTC system generates a comprehensive test report that includes detailed information about the test parameters, the performance of the CubeSat power system during the test, and the results of the data analysis.

The IPTC system consists of three main modules: the Variable Electronic Load Module (VELM), the Solar Array Module (SAM), and the Battery Testing Module (BTM). Each of these modules can operate independently in stand-alone mode or in conjunction with the other modules to provide a comprehensive test environment.

The VELM is used to simulate the load that the CubeSat power system is expected to provide, while the SAM is used to simulate the solar radiation that the CubeSat solar cells are expected to receive. The SAM simulates the current the solar panels will receive, allowing the operator to test the performance of the power management and distribution systems under different solar conditions. The BTM is used to simulate the battery that the CubeSat power system is expected to use.

The IPTC system is designed to operate under a variety of conditions and constraints, including:

- Power Requirements: The IPTC system is designed to operate from a standard AC power source, with a nominal voltage range of 110V to 240V and a frequency of 50Hz or 60Hz. It must be able to be ensembled with the corresponding type of power plug for the socket corresponding to the region it will operate on.
- Environmental Requirements: The IPTC system is designed to operate in a temperature range of 0°C to 40°C, with a humidity range of 20% to 80% non-condensing.
- Safety Requirements: The IPTC system is designed to comply with relevant safety standards, including those related to electrical safety and environmental protection.
- Software Requirements: The IPTC system software is designed to run on a standard computer running a supported operating system.
- The system must be supported at least in Windows operating system and Linux based operating systems.
- Software preferences: The system shall be able to be integrated with both, Python or other open-source options, and LabView.
- Testing requirements: The system must be able to run tests on CubeSat volumes of 1-3U.
- Measurements: The measurements performed by the tester must be precise and accurate. The system shall be able to be calibrated and produce data that is valid for meeting the launch requirements provided by the different launch entities such as space agencies and launch providers and integrators.
- Reliability: The system must be able to handle a large volume of data and transactions with minimal latency. The system must be able to operate for hours on end without any decrease in its performance.

- Security: The system should be protected from unauthorized access or malicious attacks. The system shall also be safe to operate within the system operational boundaries without posing a threat to the user.
- Pricing: The system must be priced in a manner that makes it affordable for users with restrictive budgets in research laboratories in developing space nations.
- Data and communications: The system shall be able to seamlessly handle different types of data and convert them to the internal code of the system allowing it to function with different types of data sources.
- Test selection, load up and data: The test selection, load up and data visualization of the system shall be intuitive and seamlessly integrated to the software of the system.
- Testing interfaces: The testing interface between the IPTC and the testing devices must be easy to use, the tester must account for easy and safe connections using industry standard connectors for the intended measurements.
- Portability: The system shall be designed with portability in mind. The whole system must have mechanical elements that allow movement from one place to another, the whole ensemble must have a volume equal to or less than 1 cubic meter.
- Maintainability: The system must have established maintenance routines to ensure the system keeps working as intended. It should be easily serviced and upgraded when necessary both hardware and software wise. All the internal elements must be correctly labeled to allow for easy identification. The system must also be designed with maintenance in mind, ensuring that each individual component must be reasonably easy to reach, measure, test and if needed, changed for a new one.

1.3.3. User characteristics

The IPTC system is designed for use by a variety of users, including engineers and technicians involved in the development and testing of CubeSats or other small satellites. The system may also be used by researchers or students involved in satellite testing and research.

Users of the IPTC system should have a basic understanding of power systems and electronics, including knowledge of electrical circuits, power distribution, and power management. They should also have experience in using test equipment such as oscilloscopes, multimeters, and power supplies.

In addition, users should have basic computer skills to operate the system's graphical user interface (GUI). They should be able to navigate menus and perform basic operations such as starting and stopping tests, configuring test parameters, and viewing test results.

The number of users of the IPTC system may vary depending on the specific application and testing requirements. For maintenance, similar profiles to the described earlier (excepting students) are expected.

1.4. Assumptions and dependencies

The following assumptions and dependencies apply to the IPTC system requirements:

1. Assumption: The IPTC system will be used in a laboratory environment with access to necessary equipment and resources.

Dependency: The availability of necessary equipment and resources, such as power supplies and testing fixtures, is assumed in the development and operation of the IPTC system.

2. Assumption: The IPTC system will be connected to a computer with the required processing capabilities and sufficient memory.

Dependency: The IPTC system relies on a computer to run the graphical user interface (GUI) and process data collected during testing.

3. Assumption: The IPTC system will be used by personnel with a basic understanding of power systems and electronics.

Dependency: The successful operation and interpretation of the IPTC system requires users to have a certain level of knowledge and training in power systems and electronics.

4. Assumption: The IPTC system will be tested and validated under controlled laboratory conditions.

Dependency: The IPTC system's performance may be affected by external factors such as temperature, humidity, and other environmental factors. It is assumed that testing and validation will be conducted under controlled laboratory conditions to minimize the impact of external factors.

5. Assumption: The IPTC system modules can work together in a coordinated manner.

Dependency: The IPTC system modules are designed to work in conjunction with each other, and successful operation of the system relies on the proper integration and coordination of the VELM, SAM, and BTM modules.

6. Assumption: The IPTC system will meet all relevant safety and regulatory requirements.

Dependency: The IPTC system must comply with all relevant safety and regulatory requirements to ensure safe and proper operation. It is assumed that all necessary safety and regulatory measures will be taken during the development and operation of the system.

1.5. Definitions

Integrated Power System Tester for CubeSats (IPTC): A testing system designed to test and validate the power system of CubeSats, small satellites that typically weigh no more than a few kilograms and are often used for scientific or technological research.

CubeSat: A small satellite, typically with a standardized size of 10 cm x 10 cm x 10 cm, that is often used for scientific or technological research.

ISO 29148:2018: A standard for the development of software and systems engineering requirements that provides guidelines for the entire requirements engineering process, from elicitation to validation and management.

System: A collection of components that work together to achieve a common goal.

System boundary: The physical or conceptual boundary that separates the system from its environment.

System context: The external elements that interact with the system, including users, other systems, and the environment.

System functions: The capabilities and actions that the system is designed to perform.

Usability requirements: Requirements related to the ease of use and learnability of the system, including effectiveness, efficiency, and user satisfaction.

Performance requirements: Requirements related to the speed, accuracy, and reliability of the system, including environmental conditions, endurance capabilities, and operational session duration and utilization rate.

Safety requirements: Requirements related to the prevention of harm to users, maintainers, or the environment, including circuit protection, emergency stop buttons, and regular inspections and maintenance.

Human system integration (HSI): The process of designing and developing systems that optimize the integration of human operators and maintainers into the system.

Operator: The person who interacts with the IPTC system to perform various tasks and functions.

User: A broader term that encompasses all stakeholders who interact with the IPTC system, including operators, maintainers, and other users.

Maintainer: The person responsible for maintaining and repairing the IPTC system.

Interface: The point of interaction between the IPTC system and its users, including hardware and software components.

Solar Array Module (SAM): A module of the IPTC system that simulates the current that solar panels will receive.

Variable Electronic Load Module (VELM): A module of the IPTC system that simulates the loads that the power system of the CubeSat will encounter during operation.

Battery Testing Module (BTM): A module of the IPTC system that tests the battery capacity and performance of the CubeSat power system.

Environmental conditions: The physical conditions in which the IPTC system and CubeSat power system will operate, including temperature, humidity, and radiation levels.

Endurance capabilities: The ability of the IPTC system and CubeSat power system to operate under specified environmental and other conditions, including minimum total life expectancy.

Operational session duration: The length of time that the IPTC system and CubeSat power system are expected to operate during each session.

Error checking mechanisms: Tools and techniques used to detect and prevent errors in the IPTC system and CubeSat power system, such as range checking and format checking.

Error messages: Messages displayed to users when errors are detected in the IPTC system or CubeSat power system, providing information about the nature of the error and suggesting corrective actions.

Undo and redo functions: Capabilities that allow users to undo or redo previous actions, helping to prevent or correct errors.

Accessibility: The degree to which the IPTC system and CubeSat power system are accessible to users with varying physical abilities, including support for alternative input methods and features that aid users with visual or hearing impairments.

Communication protocols: Standardized methods for communicating between the IPTC system and other systems or devices, such as RS-232 or USB.

Task allocation: The process of assigning tasks and responsibilities to operators and maintainers, taking into account their capabilities and limitations.

Circuit protection: Features designed to protect users and equipment from electrical hazards, such as overcurrent or overvoltage protection.

Emergency stop buttons: Buttons or other mechanisms that allow users to quickly halt system operation in case of emergencies.

Inspections and maintenance: Regular procedures performed to ensure the safe and reliable operation of the IPTC system and CubeSat power system, including scheduled maintenance and inspections.

1.6. Acronyms and abbreviations

IPTC: Integrated Power System Tester for CubeSats

CubeSat: Cube-shaped satellite usually 10x10x10 cm

ISO: International Organization for Standardization

SAM: Solar Array Module

VELM: Variable Electronic Load Module

BTM: Battery Testing Module

HSI: Human System Integration

RS-232: Recommended Standard 232

USB: Universal Serial Bus

GUI: Graphical User Interface

PCB: Printed Circuit Board

CPU: Central Processing Unit

BDC: Bidirectional Converter

SPI: Serial Peripheral Interface

UART: Universal Asynchronous Receiver-Transmitter

PIC: Programmable Integrated Circuit

IEC: International Electrotechnical Commission

SCPI: Standard Commands for Programmable Instruments

UX: User Experience

2. System requirements

2.1. System functional requirements

The following functional requirements apply to the IPTC system and subsystems:

IPTC System Requirements:

- The IPTC system shall provide real-time data acquisition and monitoring of system performance.
- The IPTC system shall be capable of operating in standalone mode or in conjunction with other modules.
- The IPTC system shall be capable of generating test reports and data logs.
- The IPTC system shall be capable of handling multiple test scenarios and configurations.
- The IPTC system shall be capable of supporting a range of CubeSat power system testing needs.
- The IPTC system shall have the ability to configure and control the system under test, including the VELM, SAM, and BTM modules.
- The IPTC system shall be capable of supporting multiple users and sessions simultaneously.
- The IPTC system shall be capable of providing traceability and documentation of test results for quality control purposes.
- The IPTC system shall be designed to be scalable and adaptable to support future advancements in CubeSat power systems technology.

- The IPTC system shall provide the capability to set up and run automated test scripts for repetitive testing and data collection.
- The IPTC system shall provide the capability to save and recall test configurations and test results for future reference and comparison.
- The IPTC system shall be capable of generating test reports in a standardized format for easy documentation and sharing.
- The IPTC system shall be designed to be compact and lightweight for easy transportation and integration with CubeSat testing facilities.
- The IPTC system shall be capable of performing diagnostic tests and self-checks to ensure its own operational readiness and identify any potential issues or problems.
- The IPTC must be able to support power systems of CubeSats with a volume of 1-3U.
- The IPTC system shall be designed to minimize the time and resources required for testing, without compromising the quality or thoroughness of the testing process.
- The IPTC system shall be capable of providing real-time feedback and monitoring of test results, allowing for quick identification and resolution of any issues or problems that arise during testing.
- The IPTC system shall be capable of performing the following specific functions:
 - a) Controlling the VELM, SAM, and BTM modules independently or in combination.
 - b) Providing constant or variable loads to the power system under test.
 - c) Simulating different solar irradiance levels and sun angles to test the performance of the solar panels.
 - d) Monitoring and recording the power system performance parameters such as voltage, current, power, and efficiency.
 - e) Providing real-time feedback to the user on the status of the test and the system performance.
 - f) Generating test reports and data files for post-processing and analysis.
- The IPTC system shall provide the following test modes:
 - a) Open circuit test mode for measuring the open circuit voltage and short circuit current of the power system.
 - b) Constant current mode for measuring the maximum power point of the solar panels.
 - c) Constant voltage mode for measuring the power output of the power system under different loads.
 - d) Dynamic load mode for simulating different load conditions and testing the power system response.
 - e) For reach of the subsystems, we have:

Interface Configuration Module (ICM)

Functions:

Interface Management:

- Configure interfaces.
- Select interface to use for communication.

Command Management:

- Receive Macro Commands from PC.

- Send Macro Commands to PC
- Decompose macro command into smaller commands.
- Compose smaller commands into macro commands.
- Sequence the decomposed commands.
- Send commands to testing modules.

Telemetry Management:

- Register activity on log file.
- Consolidate module telemetry information.
- Store consolidated telemetry data.

Error Management:

- Register Errors in Error Log
- Show Errors

Variable Electronic Load Module (VELM)

Functions:

- Simulate power consumption of variable electronic loads over a defined period of time.
- Read power consumption of actual electronic loads over a period.

Command Management:

- The module must be able to receive binary commands from the ICM.
- The module must be able to interpret the commands sent by the ICM.
-

Error Management:

- The module must be able to Register Errors in Error Log
- The module must be able to communicate Errors to the ICM

Data Management:

- The module must be able to send binary data to the ICM.
- The module must be able to store data locally in a log file.

Battery Testing Module (BTM)

Functions:

- Battery Charge (Output Voltage and Current at set values)
- Battery Discharge (Demand voltage and current at set values)
- The user can define the number of cycles of charge and discharge.

- The user can define the Variable Current and Continuous Current Parameters, with a maximum of 30V in VC and 5-10 V in CC. **
- The system must be able to provide the data necessary to generate a CC charge and discharge graph with the CC and Voltage measurements.
- System must be able to provide state of charge of the cell packs at any given time of the test (as long as it is consistent with the measurement frequency).
- It must be able to calculate the internal resistance of the battery.

Command Management:

- The module must be able to receive binary commands from the ICM.
- The module must be able to interpret the commands sent by the ICM.

Error Management:

- The module must be able to Register Errors in Error Log
- The module must be able to communicate Errors to the ICM

Data Management:

- The module must be able to send binary data to the ICM.
- The module must be able to store data locally in a log file.

Solar Array Module (SAM)

Functions:

- Simulate Solar Array power delivery by generating a power curve of the solar panels that varies over time depending on the angle inputs set by the user.
- Read power consumption and angles of incidence of actual solar arrays over a period of time.

Command Management:

- The module must be able to receive binary commands from the ICM.
- The module must be able to interpret the commands sent by the ICM.

Error Management:

- The module must be able to Register Errors in Error Log
- The module must be able to communicate Errors to the ICM

Data Management:

- The module must be able to send binary data to the ICM.
- The module must be able to store data locally in a log file.

GUI/Software

Functions:

Interface management

- The GUI must be able to interact with the user through a computer.
- The user must be able to select the mode of operation of each module on the software.
- The user must be able to feed data to the system.
- The system must be able to connect to the internet for updates and to databases for storage.

Software operations:

- Create a test profile and send it to the ICM using SCPI commands.

Data management and processing:

- The system must be able to store test data in a local disk or on a cloud-based solution as defined by the user
- The system must be able to process data and present it to the user in a useful format (graphics, tables, etc.)

Command management:

- The system must be able to transform the data inputs of the user into a macro command that will be sent to the ICM.
- The system must be able to receive macro commands and turn them into data for processing.

Security:

- The system must have means to only allow the users to have access to the data.
- The system must have protections such as firewalls to protect its data from outside attacks.

Error Management:

- The system must be able to Register Errors in Error Log
- The system must be able to receive Errors from the ICM
- The system must be able to identify the received errors and communicate them to the user.

Mechanical System

Housing:

- The mechanical system shall house all the IPTC components.

Maintenance:

- Easy disassemble and component reach for maintenance.

Thermal dissipation:

- Dissipate the heat generated by the system in a safe manner for the user.

Portability:

- The system must enable easy transport of the IPTC.

2.2. Usability requirements

Usability refers to the extent to which a system can be used by specified users to achieve specified goals with effectiveness, efficiency, and satisfaction in a specified context of use. Quality in use refers to the effectiveness, efficiency, and satisfaction with which specified users achieve specified goals in particular environments. The following usability and quality in use requirements and objectives have been defined for the IPTC system:

Effectiveness:

- The IPTC system shall allow users to complete 95% of their tasks without encountering critical errors or needing to seek assistance.
- The IPTC system shall provide accurate test results, with a maximum error rate of less than 1% when compared to reference measurements.
- The IPTC system shall enable users to complete test setup and execution within an average time of 10 minutes per test.

Efficiency:

- The IPTC system shall allow users to complete at least 90% of their tasks within the specified timeframes, minimizing the time spent on system configuration and test execution.

Satisfaction:

- The IPTC system shall provide context-sensitive help and clear, concise documentation, ensuring users can quickly and easily access information needed to use the system effectively. These documents include the user's manual, specifications manual, assembly guide, maintenance guide, interface document, command document, security manual.

Avoidance of Harm:

- The IPTC system shall include safety features and warnings to prevent users from causing damage to the equipment under test or harm to themselves due to incorrect operation or configuration.
- The IPTC system shall include clear instructions and guidelines for safe operation and troubleshooting to minimize the potential for harm in various cont use.

To measure the usability and quality in use of the IPTC system, the following criteria have been established:

- Performance metrics: Quantitative metrics, such as task completion time, error rates, and the number of steps or clicks required, will be collected, and analyzed to assess system efficiency and effectiveness.

- User feedback: Surveys, interviews, and focus groups will be conducted to gather user feedback on their experiences using the IPTC system, helping to identify areas for improvement and assessing overall satisfaction.

2.3. Performance requirements

The performance requirements for the IPTC system are defined as follows:

a) Dynamic actions or changes:

- The system shall be able to handle changes in load and current draw in real-time and be able to respond to changes within a maximum of 0.5 seconds.
- The system shall have a minimum data collection rate of 2 Hz.
- The device shall not surpass 40 dB when operating at maximum capacity.

b) Endurance capabilities:

- The system shall be able to operate continuously indefinitely. The minimum total life expectancy of the system shall be 10 years or 70 000 operational hours.

c) Operational phases and modes: The system shall have the following modes of operation:

- Stand-alone mode: Each module (VELM, SAM, and BTM) can operate independently.
- Combined mode: All modules can operate together and communicate with each other.
- Calibration mode: The system shall have a calibration mode to ensure accuracy and consistency of measurements.
- Maintenance mode: The system must have a maintenance mode to ensure that the integrity of the system is maintained, and the lifetime of the equipment is met.

2.4. System interface requirements

The IPTC system and its modules (VELM, SAM, BTM) shall have specific interface requirements to ensure seamless communication and interaction among system elements and with external entities, including other systems and the human element. Each module will receive commands from the Interface Control Module (ICM) through an STM32 microcontroller chip. The IPTC shall provide an interface with each module to allow integration and coordination with the VELM, SAM and BTM modules for more comprehensive testing. This interface will be managed by the ICM subsystem and will facilitate communication between the modules.

The following detailed requirements apply to each module:

VELM Interface Requirements:

- The VELM shall support a user-friendly graphical interface for configuring and controlling the load conditions, enabling users to monitor and adjust test parameters easily. This interface will be developed using software tools compatible with the STM32 microcontroller to ensure seamless communication with the ICM.
- The VELM shall provide an interface for communication with the ICM using the STM32 microcontroller, allowing it to receive commands and send telemetry data using the SPI standard communication protocol.
- The VELM shall support standard electrical connectors and wiring for connecting to the power system under test, ensuring compatibility with a wide range of CubeSat power systems. The STM32 microcontroller will be responsible for managing the connections and monitoring the power system parameters.

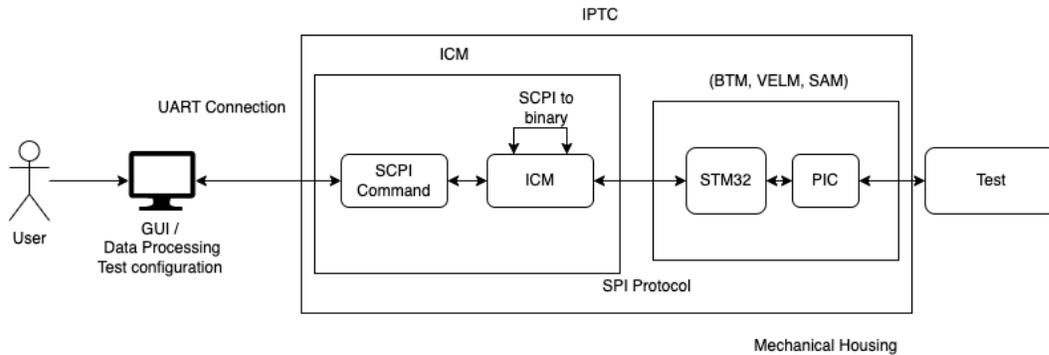
SAM Interface Requirements:

- The SAM shall support a user-friendly graphical interface for configuring and controlling the solar panel output simulations, enabling users to monitor and adjust test parameters easily. This interface will be developed using software tools compatible with the STM32 microcontroller to ensure seamless communication with the ICM.
- The SAM shall provide an interface for communication with the ICM using the STM32 microcontroller, allowing it to receive commands and send telemetry data using the SPI standard communication protocol.
- The SAM shall support standard electrical connectors and wiring for connecting to the solar panel inputs of the power system under test, ensuring compatibility with a wide range of CubeSat solar panels. The STM32 microcontroller will be responsible for managing the connections and monitoring the solar panel performance.

BTM Interface Requirements:

- The BTM shall support a user-friendly graphical interface for configuring and controlling the battery simulations, enabling users to monitor and adjust test parameters easily. This interface will be developed using software tools compatible with the STM32 microcontroller to ensure seamless communication with the ICM.
- The BTM shall provide an interface for communication with the ICM using the STM32 microcontroller, allowing it to receive commands and send telemetry data using the SPI standard communication protocol.
- The BTM shall support standard electrical connectors and wiring for connecting to the battery inputs of the power system under test, ensuring compatibility with a wide range of CubeSat batteries. The STM32 microcontroller will be responsible for managing the connections and monitoring the battery performance.

The following is the diagram of interfaces for the IPTC System:



Mechanical Housing Interface Requirements:

- The mechanical housing will allow for standardized connection ports, such as RS-232 or USB, to enable integration of the ICM with the computer.
- The mechanical housing will allow for four banana type connectors per test module for testing purposes.
- The mechanical housing will have an integrated power dissipation unit to allow for correct operation of the system.
- The mechanical housing will have buttons and handles to allow movement and operation of the IPTC.

2.5. System operations

2.5.1. Human system integration requirements

a) Operator Training:

- Comprehensive documentation, including user manuals and tutorials, shall be provided to guide operators in using the IPTC system and its modules.
- Online resources must be made available for operators on how to use the device when the documentation is sent out to the public.
- Clear instructions and guidelines for troubleshooting common issues should be provided, enabling operators to resolve problems independently. This can be done through forums so that users can post their own solutions.

b) User Interface:

- The user interface should be consistent across the IPTC system and its modules, promoting familiarity and ease of use.
- Clear labels, icons, and tooltips should be used to help operators understand the purpose of each interface element and control.
- Visual feedback, such as progress bars or status indicators, should be provided to inform operators of ongoing processes or system states.
- The user interface should allow for customization of display preferences, including text size, color schemes, and other visual elements to accommodate various operator needs.

c) Error Prevention and Management:

- The IPTC system and its modules should incorporate input validation and error checking mechanisms to prevent data entry errors.
- Clear and concise error messages should be displayed to inform operators of any issues and suggest appropriate corrective actions.
- Undo and redo functions should be provided to allow operators to easily revert changes or correct mistakes.
- Automatic backups and recovery features should be implemented to safeguard against data loss and minimize the impact of operator errors.

d) Communication:

- The IPTC system and its modules should support standardized communication protocols, such as RS-232 or USB, to enable seamless integration with external systems and devices.
- Clear and concise documentation should be provided for each supported communication protocol, detailing its implementation and usage as well as the commands document for the system.
- Communication interfaces should be designed with robust error handling and data integrity checks to ensure reliable data transmission.

e) Task Allocation:

- The IPTC system and its modules should employ automation where appropriate to reduce operator workload and minimize the potential for human error.
- Clear and well-documented procedures should be in place for manual tasks, ensuring that operators understand their roles and responsibilities.

f) Safety:

- The IPTC system and its modules should incorporate safety features, such as circuit protection, insulation, and grounding, to minimize the risk of electrical hazards.
- Emergency stop buttons or other safety mechanisms should be provided to allow operators to quickly halt system operation in case of emergencies.
- Regular maintenance and inspections should be conducted to ensure the safe and reliable operation of the IPTC system and its modules.
- The system must be designed following the directives given by IEC's Guidelines for safety related risk assessment and risk reduction for low voltage equipment (IEC 116:2018(E))

2.5.2. Maintainability requirements

The following detailed maintainability requirements apply to the IPTC system and its individual modules: VELM, SAM, and BTM.

a) Time:

- Mean downtime: Each module (VELM, SAM, and BTM) shall have a mean downtime of no more than 1 hour per maintenance action.
- Maximum downtime: Each module shall have a maximum downtime of no more than 2 hours for any single maintenance action.
- Mean time to repair (MTTR): The average time to repair each module (VELM, SAM, and BTM) shall not exceed 1 hour.
- The average time to assemble the IPTC once all its parts have been sourced shall not exceed 10 hours, for two people.

b) Rate:

- Frequency of preventative maintenance: Preventative maintenance actions shall be performed on each module every 6 months or 2000 operating hours, whichever comes first.

c) Maintenance complexity:

Number of people and skill levels:

- Maintenance of each module (VELM, SAM, and BTM) shall require no more than 1 person with training in the module's operation and components.

Variety of support equipment:

- Maintenance of each module shall require a limited set of standard tools and diagnostic equipment to minimize complexity and streamline the maintenance process.

Removing/replacing/repairing components:

- Each module (VELM, SAM, and BTM) shall be designed with modularity and ease of maintenance in mind, allowing for quick removal, replacement, or repair of components with minimal disruption to the overall system.

d) Accessibility to components within systems and to parts within components:

- Each module (VELM, SAM, and BTM) shall be designed with easily accessible components and parts to facilitate maintenance tasks.
- Components and parts within each module shall be organized and labeled to expedite identification and replacement.
- Cable management and routing within each module shall be optimized to prevent entanglement and ensure easy access to connectors and components.
- Fasteners and connectors used in each module should be standardized wherever possible to simplify maintenance tasks and reduce the need for specialized tools.

e) Calibration:

- The IPTC must be calibrated according to the established procedures of the norm ISO/IEC 17025:2017 or the most recent version of the norm.

2.5.3. Reliability requirements

The following detailed reliability requirements apply to the IPTC system and its individual modules: VELM, SAM, and BTM.

a) Conditions for Reliability Requirements:

The reliability requirements for the IPTC system and its individual modules shall be met under the following conditions:

- Normal operating temperature range: 0°C to 40°C
- Humidity: 20% to 80% non-condensing
- Altitude: Up to 4,500 meters above sea level
- Electromagnetic compatibility (EMC): In accordance with IEC 61000-4

2.5.4. Other quality requirements

For each of the IPTC modules (VELM, SAM, and BTM), the following quality requirements related to compatibility and portability should be considered:

Portability:

- The IPTC should be designed with compactness and lightweight materials to facilitate easy transportation and integration into different testing environments.

For each of the IPTC modules (VELM, SAM, and BTM), the following quality requirements should be considered:

VELM (Variable Electronic Load Module):

Compatibility:

- VELM should be compatible with various CubeSat power systems to ensure seamless integration during testing.

SAM (Solar Array Simulator):

Compatibility:

- SAM should be compatible with different solar panel technologies used in CubeSat power systems.

BTM (Battery Test Module):

Compatibility:

- BTM should be compatible with various battery types and chemistries used in CubeSat power systems.

2.6. System modes and states

Normal operation mode:

In this mode, the system is capable of working as a stand-alone or with two or more of its modules working together, the system must be able to perform all of its intended operations.

Maintenance mode:

In this mode, the system can be connected to the internet to look for firmware updates, patches, etc. It can also be disconnected and taken apart to allow for cleaning or changing of components.

2.7. Physical characteristics

2.7.1. Physical requirements

IPTC System:

Weight, volume, and dimensions:

- The IPTC system should be designed with a lightweight and compact form factor to minimize weight and volume, making it easier to transport and integrate with CubeSat testing facilities.
- The IPTC volume shall not exceed 1 cubic meter.

Construction characteristics and materials:

- The IPTC system should be built with materials that are durable, corrosion-resistant, and suitable for use in laboratory and testing environments.
- The construction should adhere to industry standards for quality and workmanship to ensure reliable and consistent performance.

Nameplates, system markings, and interchangeability:

- Each module within the IPTC system should have clear nameplates and system markings to facilitate easy identification and use.
- The modules should be designed with standard interfaces to enable interchangeability within the IPTC system.

Testing modules (VELM, SAM, BTM):

Weight, volume, and dimensions:

- The dimensions of each of the testing modules should be such that it can be easily integrated with the IPTC system and other modules without obstructing their operation.

2.7.2. Adaptability requirements

IPTC System:

Growth and expansion:

- The IPTC system should be designed with scalability and modularity in mind, allowing for seamless integration of additional modules or components as needed to support the evolving CubeSat power system testing requirements.
- The system should be capable of adapting to new testing methodologies and configurations as they emerge.

Capability:

- The IPTC system should be able to accommodate advancements in CubeSat power systems technology and support new capabilities as they become relevant.
- The system should provide the flexibility to work with different power systems, battery chemistries, and solar array configurations.

Contraction:

- The IPTC system should be designed to allow for the removal or replacement of modules or components as needed, without affecting the overall system's performance or functionality.

BTM (Battery Test Module):

Growth and expansion:

- The BTM should be designed to support different battery types and chemistries that may emerge in the future, ensuring its continued relevance in CubeSat power system testing.

SAM (Solar Array Simulator):

Growth and expansion:

- The SAM should be designed to simulate various solar panel outputs and configurations, allowing for adaptability as new solar technologies and CubeSat power system designs become available.

2.8. Environmental conditions

IPTC System:

The IPTC system should be designed to operate under various environmental conditions to ensure its robustness, reliability, and adaptability. The following environmental conditions need to be addressed:

Natural Environment:

Temperature:

- The system should operate within a temperature range of 0°C to 40°C.

Humidity:

- The system should be capable of operating under humidity levels from 20% to 80% non-condensing.

Dust and particulates:

- The IPTC system should be resistant to dust and particulate ingress.

Radiation:

- The system should be designed to withstand typical levels of radiation encountered in a lab or testing environment.

Induced Environment:

Shock and Vibration:

- The IPTC system should be designed to withstand shock and vibration during transportation and normal operation.

Electromagnetic Compatibility (EMC):

- The system should comply with EMC standards and should not be adversely affected by external electromagnetic interference, nor should it generate excessive electromagnetic emissions. It shall be compliant with IEC 61000-4.

Thermal:

- The system should be able to handle any self-induced thermal loads during operation and maintain a stable temperature to ensure accurate testing results. A 100% power dissipation must be assumed (i.e., if the maximum electrical power input of the system is 350 W, it should be able to dissipate the whole 350 W load).

Electromagnetic Compatibility (EMC):

- The VELM, SAM and BTM should comply with EMC standards and should not be adversely affected by external electromagnetic interference or generate excessive electromagnetic emissions.

Legal/Regulatory, Political, Economic, Social, and Business Environments:

- The IPTC system should be designed and operated in compliance with relevant legal and regulatory requirements, including safety standards, and environmental regulations according to each country's regulations.
- The IPTC system should be developed with a focus on minimizing environmental impact and promoting sustainability in its operation and disposal.

2.9. System security requirements

The system security requirements for the IPTC system should address both the physical security of the facility housing the system and the operational security of the system itself. The following security requirements should be considered:

IPTC System:

Access Control:

- The system should have secure log-on procedures with username and password authentication to restrict unauthorized access.

User Privileges:

- Different levels of user privileges should be implemented to ensure that users only have access to the necessary features and functions based on their role.

Data Protection:

- Sensitive data and test results should be encrypted and securely stored to prevent unauthorized access, modification, or disclosure.

Data Recovery:

- The system should have data backup and recovery methods in place to ensure the availability and integrity of the data in the event of hardware failure or security breaches.

Network Security:

- The IPTC system should have secure communication protocols and firewall protection to prevent unauthorized access to the system over the network.

Security Updates and Patches:

- The system must be able to be patched and updated, either from the manufacturer or by solutions made by the user community. These community updates must be disclaimed as not supported in any way as to stay away of any liability from the developer's standpoint.

All of the above must be conducted in accordance to the ISO 27040:2015 standard.

Physical Security:

Secure Storage:

- Sensitive equipment and data storage devices should be stored in secure locations, such as locked cabinets or rooms, to prevent unauthorized access or theft.

By addressing these system security requirements, the IPTC system can ensure the protection of sensitive data and maintain the integrity and confidentiality of the testing process, while minimizing the risk of accidental or malicious access, use, modification, destruction, or disclosure.

2.10. Information management requirements

IPTC System:

Data Types:

- The system should be capable of receiving, processing, and storing various types of data, including test configurations, test results, performance parameters, logs, and user information. Some of these include: JSON files, CSV files, binary data and SCPI protocol data.

Data Storage:

- The system should have sufficient storage capacity to handle the data generated during testing and store it securely for future reference and analysis. It should have at least 2 GB of local storage to secure any information used when not connected to a computer.

Data Access:

- Authorized users should be able to access the stored data and information according to their privileges and roles within the system.

Proprietary and Sensitive Information:

- The system should be capable of handling proprietary and sensitive information by applying appropriate security measures, such as encryption and access control.

Data Backup and Archiving:

- The system should regularly back up the data and archive it in a secure location to ensure its availability and integrity, even in the event of hardware failure or security breaches. It must backup the data after each use, when the user closes the software.

Data Export:

- The system should be able to export data in standardized formats, such as CSV or JSON, to facilitate sharing and collaboration with other systems or users.

Data Retention:

- The system should adhere to data retention policies and requirements, including the duration for which data must be stored and the conditions under which it should be deleted or archived.

Test Data Management:

- The VELM, SAM and BTM should be able to process, store, and export the test data generated during testing, including voltage, current, power, and efficiency parameters.

2.11. Policy regulation requirements

The IPTC system must adhere to organizational policies, business practices, and external regulations that affect its operation or performance. The following policy regulation requirements should be considered for the system and its modules:

VELM (Variable Electronic Load Module), BTM (Battery Test Module), and SAM (Solar Array Simulator):

Health and Safety Criteria:

- The design of the VELM, BTM, and SAM modules should prioritize health and safety by incorporating appropriate equipment characteristics, methods of operation, and environmental influences. This includes, but is not limited to, protection against electric shock, overheating, or exposure to hazardous materials (International Electrotechnical Commission Guide 116:2018).

Electromagnetic Compatibility (EMC):

- The modules should comply with electromagnetic compatibility requirements, minimizing interference with other electronic devices and systems, and ensuring that they operate within the acceptable limits of electromagnetic radiation.

Toxic Substances:

- The modules should be designed and manufactured in accordance with relevant regulations regarding the use and disposal of toxic substances, such as the Restriction of Hazardous Substances (RoHS) Directive.

2.12. System lifecycle sustainment requirements

To ensure the longevity and maintainability of the IPTC system and its modules (VELM, BTM, and SAM), various lifecycle sustainment requirements must be outlined. These requirements encompass quality activities, facility provisions, and support services.

IPTC System:

Quality Activities:

- Implement regular system checkups to identify any potential issues on the system. Also, the system must be calibrated every 2000 hours of operation or every 6 months, whichever comes first.

Spares, Sourcing, and Supply:

- Develop a comprehensive BOM list that considers the availability of spare parts and consumables throughout the system's lifecycle. This includes identifying reliable suppliers and establishing efficient procurement processes.

Technical Documentation and Data:

- Provide comprehensive technical documentation, including user manuals, maintenance guides, and troubleshooting resources, to facilitate the operation, maintenance, and repair of the IPTC system and its modules.

2.13. Packaging, handling, shipping, and transportation requirements

The developers of the IPTC must ship the system to the users in case they become a client and decide not to build the IPTC themselves. To ensure the IPTC system and its modules (VELM, BTM, and SAM) can be safely and efficiently packaged, handled, shipped, transported, and stored within their intended operational context, the following requirements must be followed:

IPTC System:

Packaging:

- Design protective packaging for the IPTC system to prevent damage during shipping and transportation. The packaging should be robust, shock-absorbent, and resistant to environmental factors such as moisture and temperature changes.

Handling:

- Provide clear instructions and guidelines for safely handling the IPTC system during transportation, installation, and maintenance. This includes specifying lifting points, necessary equipment, and any precautions to avoid damage or injury.

Shipping and Transportation:

- Identify suitable shipping and transportation methods for the IPTC system, considering factors such as size, weight, and fragility. Ensure that the selected methods meet relevant regulations and industry standards.

3. Verification

The verification approaches and methods outlined in this section are intended to qualify the IPTC system and its modules (VELM, BTM, and SAM) based on the requirements detailed in sections 2.1 to 2.13. Verification will be conducted in accordance with the IEEE std 1012-2016.

IPTC System:

Functional Requirements: Verify system functionality through a combination of simulation, test cases, and use case scenarios. Ensure that the system operates according to specified requirements and intended operational context.

Usability Requirements: Conduct usability testing with target users to ensure the system meets effectiveness, efficiency, and satisfaction criteria. Evaluate user feedback and iterate on the design to address any identified issues.

Performance Requirements: Perform stress, load, and performance tests to validate the system's ability to meet defined performance criteria under various operating conditions.

System Interface Requirements: Verify system interfaces through integration testing, ensuring proper communication and data exchange between system elements and external entities.

System Operations: Assess human-system integration requirements, maintainability, reliability, and other quality requirements through operational testing, simulated real-world scenarios, and maintenance exercises.

Physical Characteristics: Verify compliance with physical requirements and adaptability requirements through inspections, measurements, and functional testing in various configurations and growth scenarios.

Environmental Conditions: Conduct environmental testing, including exposure to natural and induced environments, to validate the system's ability to operate under the specified conditions.

System Security Requirements: Perform security assessments, penetration testing, and vulnerability analysis to ensure the system meets security and privacy requirements.

Information Management Requirements: Verify the system's information management capabilities through data management, backup, and archiving tests.

Policy Regulation Requirements: Assess the system's compliance with organizational policies, business practices, and external regulations through audits and reviews.

System Lifecycle Sustainment Requirements: Evaluate the system's lifecycle sustainment plan through reviews, analysis of supportability, and training exercises.

Packaging, Handling, Shipping, and Transportation Requirements: Verify the system's compliance with these requirements through packaging tests, handling demonstrations, and simulated shipping and transportation scenarios.

For each module (VELM, BTM, and SAM), repeat the verification steps outlined above, focusing on the specific requirements and characteristics of each module. This will ensure that each module operates as intended and meets its unique set of requirements.

By following these verification approaches and methods in accordance with the IEEE std 1012-2016, the IPTC system and its modules will be thoroughly qualified, ensuring they meet all defined requirements and operate effectively within their intended contexts.

4. References

Rojas, J., Carvajal, J. (2021). Project Proposal *“Desarrollo de un sistema integrado para la prueba de sistemas de potencia en CubeSats”*

International Standard Organization. (2018). Systems and software engineering — Life cycle processes — Requirements engineering (Norm num. 29148).

J. Rojas, M. Cho, and Y. Takashi, “A digitally controlled bi-directional dc-dc converter for nanosatellite power systems,” 11 2018.

International Electrotechnical Commission. (2018). “Guidelines for safety related risk assessment and risk reduction for low voltage equipment,” IEC 116:2018(E), pp. 1–41.

Organización de las Naciones Unidas. (1967). “Tratado sobre los principios que deben regir las actividades de los estados en la exploración y utilización del espacio ultraterrestre, incluso la luna y otros cuerpos celestes,” [Online]. Available: <https://www.unoosa.org/pdf/publications/STSPACE11S.pdf>

R. H. SALCEDO. (2013). “Modelado y caracterización de paneles fotovoltaicos,”

Center for Disease Control and Prevention, ¿“What noises cause hearing loss?” https://www.cdc.gov/nceh/hearing_loss/what_noises_cause_hearing_loss.html

NASA Earth Observatory, “Land Surface Temperature and Emissivity,” https://earthobservatory.nasa.gov/global-maps/MOD_LSTD_M

International Organization for Standardization. (2015). “ISO/IEC 27040:2015 Information technology – Security techniques – Storage security,” <https://www.iso.org/standard/61931.html>

Apéndice C

Ejemplo de Revisión Funcional para el MCI

ICM Functional Review

Test description:

This test will verify the system functions of the ICM. It is a preliminary test to ensure that all the core capabilities of the system are integrated on the first functional version of the ICM.

On this test, the ICM will be connected to one the STM32 boards which will simulate one of the testing modules. This board will be fed with data relevant to one of the modes of operation of the module and the ICM will be asked to read the data stored on the STM32, interpret it, and send the data to the PC.

Test steps:

1. The ICM will be connected to the PC through one of the allowed means of communication (SSH, UART)
2. The ICM will be connected to the STM32
3. The system will be checked to ensure that it can select which module to connect and that it can connect to a single module or multiple modules
4. The system will be asked to read the data stored on the STM32 board from the computer
5. The system must return the read data on a csv file to the user
6. The STM32 will be disconnected from the system
7. The system will be asked to read the data again and must return an error for a not connected module to the user

ICM Functions Checklist

Interface management

- The ICM can configure the module interfaces
- The ICM can select to which module(s) it has to connect

Command Management

- The ICM receives macro commands from the PC
- The ICM decomposes the macro commands to smaller commands
- The ICM composes smaller commands into macro commands
- The ICM sequences the decomposed commands
- The ICM sends the commands to the testing modules
- The ICM receives the data from the testing modules

Telemetry Management

- The ICM registers the activity on a log file
- The ICM consolidates module telemetry information
- The ICM stores consolidated telemetry data
- The ICM must communicate with the module through SCPI protocol
- The ICM must generate a .csv file with the gathered data

Error Management

- The ICM registers errors in error log
- The ICM can show errors to the user

Performance checklist

- Sample rate must be 2Hz or higher
- The data obtained must coincide with the data fed to the testing module

Bibliografía

- [1] M. Langer and J. Bouwmeester, “Reliability of cubesats – statistical data, developers’ beliefs and the way forward,” 08 2016.
- [2] “Iso/iec/ieee international standard - systems and software engineering – life cycle processes – requirements engineering,” *ISO/IEC/IEEE 29148:2018(E)*, pp. 1–104, 2018.
- [3] A. Edpuganti, V. Khadkikar, M. S. E. Moursi, H. Zeineldin, N. Al-Sayari, and K. Al Hosani, “A comprehensive review on cubesat electrical power system architectures,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 37, no. 3, pp. 3161–3177, 2022.
- [4] J. Rojas and J. Carvajal, “Propuesta de proyecto: Desarrollo de un sistema integrado para la prueba de sistemas de potencia en cubesats,” 2021.
- [5] Copernicus Climate Change Service, “Monthly summaries of precipitation, relative humidity, and soil moisture,” <https://climate.copernicus.eu/monthly-summaries-precipitation-relative-humidity-and-soil-moisture>, 2021, [Online; accesado 26-Abril-2023].
- [6] “Laboratorio de sistemas espaciales.” [Online]. Available: <https://www.tec.ac.cr/unidades/laboratorio-sistemas-espaciales>
- [7] M. Jenkins, A. Chaves Jiménez, J. Carvajal-Godínez, and J. Kolbeck, “Setec lab’s small satellite program for environmental monitoring,” 10 2018.

- [8] M. Weisgerber, M. Langer, F. Schummer, and S. Neumann, “Reliability prediction of student-built cubesats,” in *Proceedings of the 69th International Astronautical Congress*, 2018.
- [9] PMI, “Pmi’s pulse of the profession: The high cost of low performance,” 2014. [Online]. Available: <http://www.pmi.org/-/media/pmi/documents/public/pdf/learning/thought-leadership/pulse/pulse-of-the-profession-2014.pdf>
- [10] P. Luan, “How to avoid project train wrecks,” *Oil and Gas Facilities*, vol. 5, pp. 24–28, 04 2016.
- [11] J. J. Carr, “Requirements engineering and management: the key to designing quality complex systems,” *The TQM Magazine*, vol. 12, no. 6, pp. 400–407, 2000.
- [12] B. Blanchard and W. Fabrycky, “Systems engineering and analysis: International edition (5e),” 2010.
- [13] A. Kossiakoff, S. M. Biemer, S. J. Seymour, and D. A. Flanigan, *Systems engineering principles and practice*. John Wiley & Sons, 2020.
- [14] P. Fortescue, G. Swinerd, and J. Stark, *Spacecraft systems engineering*. John Wiley & Sons, 2011.
- [15] J. Puig-Suari, C. Turner, and R. Twiggs, “Cubesat: the development and launch support infrastructure for eighteen different satellite customers on one launch,” 2001.
- [16] M. Swartwout, “The first one hundred cubesats: A statistical look,” *Journal of small Satellites*, vol. 2, no. 2, pp. 213–233, 2013.
- [17] J. Bouwmeester and J. Guo, “Survey of worldwide pico-and nanosatellite missions, distributions and subsystem technology,” *Acta Astronautica*, vol. 67, no. 7-8, pp. 854–862, 2010.
- [18] C. Cappelletti and D. Robson, “Cubesat missions and applications,” in *Cubesat Handbook*. Elsevier, 2021, pp. 53–65.
- [19] J. Rojas, Y. Takashi, and M. Cho, “Proposal for a modular electrical power system for nanosatellites,” 10 2018.
- [20] J. A. Díaz, “Tecnología fotovoltaica,” *Boletín Instituto de Investigaciones electricas*, 2008.

- [21] D. Hernandez, “Design of a Low-Cost Flight Control System for a Small Remotely Piloted Aircraft,” <https://www.sjsu.edu/ae/docs/project-thesis/Daniel.Hernandez%20S15.pdf>, San Jose State University, 2015, [En línea; acceso el 3 de mayo de 2023].
- [22] A. Pandey, A. K. Jha, A. Kottantharayil, and J. Akhtar, “Investigating the Effect of Series Resistance on Solar Cell Efficiency,” <https://443.ece.illinois.edu/files/2019/05/SolarCellReportPandeyWaterMarked.pdf>, 2019, [En línea; acceso el 3 de mayo de 2023].
- [23] X. Jia, X. Fang, C. Xia, Y. Wang, Y. He, X. Zhang, and J. Su, “Research on Short-Term Load Forecasting of Micro-Grid Based on Deep Learning and KNN Algorithm,” https://res-mdpi-com.webpkgcache.com/doc/-/s/res.mdpi.com/d_attachment/energies/energies-13-04097/article_deploy/energies-13-04097-v2.pdf, p. 4097, 2020, [En línea; acceso el 3 de mayo de 2023].
- [24] A. Edpuganti, V. Khadkikar, M. S. Elmoursi, H. Zeineldin, and M. Al Hosani, “A novel eps architecture for 1u/2u cubesats with enhanced fault-tolerant capability,” in *2020 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*. IEEE, 2020, pp. 1–6.
- [25] V. Knap, L. K. Vestergaard, and D.-I. Stroe, “A review of battery technology in cubesats and small satellite solutions,” *Energies*, vol. 13, no. 16, p. 4097, 2020.
- [26] S. Acharya, F. Alshehhi, A. Tsoupos, O. Khan, M. Elmoursi, V. Khadkikar, H. Zeineldin, and M. Al Hosani, “Modeling and design of electrical power subsystem for cubesats,” in *2019 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*. IEEE, 2019, pp. 1–6.
- [27] Straits-Research, “Cubesat market: Information by size (0.25u to 1u, 1u to 3u), application (space observation), subsystem (payloads, structures), end-users, and region — forecast till 2030,” in *Market Research Report*, 2021.
- [28] A. C. Jimenez and J. C. Godinez, “Introducing space engineering to engineering undergraduates: Design of a “introduction to space engineering” course for non-aerospace engineering students in costa rica.”

- [29] S. Solórzano, “Sistema de control y monitoreo hídrico, basado en lorawan™, para el acueducto principal de la asociación administradora del acueducto rural de playa sámara de nicoya,” *TEC*, jun 2021.
- [30] “Guidelines for safety related risk assessment and risk reduction for low voltage equipment,” *IEC 116:2018(E)*, pp. 1–41, 2018.
- [31] O. de-las Naciones-Unidas, “Tratado sobre los principios que deben regir las actividades de los estados en la exploración y utilización del espacio ultraterrestre, incluso la luna y otros cuerpos celestes,” 1967. [Online]. Available: <https://www.unoosa.org/pdf/publications/STSPACE11S.pdf>
- [32] “DI3000 series programmable dc electronic load, user’s guide,” *Rigol, INC.*, 2016.
- [33] R. H. SALCEDO, “Modelado y caracterización de paneles fotovoltaicos,” 2013.
- [34] “DI3000 series programmable dc electronic load, specifications,” *Rigol, INC.*, 2016. [Online]. Available: https://beyondmeasure.rigoltech.com/acton/attachment/1579/f-0782/1/-/-/-/-/DL3000_specs.pdf
- [35] A. Rubin, “Life expectancy of electronic equipment post-loss,” 2020.
- [36] C. for Disease Control and Prevention, “What noises cause hearing loss?” https://www.cdc.gov/nceh/hearing_loss/what_noises_cause_hearing_loss.html, Accesado el 15 de Abril, 2023.
- [37] J. Rojas, M. Cho, and Y. Takashi, “A digitally controlled bi-directional dc-dc converter for nanosatellite power systems,” 11 2018.
- [38] R. Hartson and P. S. Pyla, *The UX Book: Process and guidelines for ensuring a quality user experience*. Elsevier, 2012.
- [39] Organización Internacional de Normalización, “ISO/IEC 17025:2017 Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración,” <https://www.iso.org/obp/ui/es/#iso:std:iso-iec:17025:ed-3:v1:es>, 2017, [En línea; acceso el 3 de mayo de 2023].
- [40] NASA Earth Observatory, “Land Surface Temperature and Emissivity,” https://earthobservatory.nasa.gov/global-maps/MOD_LSTD_M, 2021, [Online; accessado 26-Abril-2023].

- [41] International Organization for Standardization, “ISO/IEC 27040:2015 Information technology – Security techniques – Storage security,” <https://www.iso.org/standard/61931.html>, 2015, [En línea; acceso el 3 de mayo de 2023].
- [42] “Directiva de Restricción de Sustancias Peligrosas (RoHS),” <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/HTML/?uri=CELEX:32011L0065&from=ES>, Unión Europea, 2011, [En línea; acceso el 3 de mayo de 2023].
- [43] Institute of Electrical and Electronics Engineers, *IEEE Std 1012-2016: IEEE Standard for System, Software, and Hardware Verification and Validation*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2016.