



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA MECÁNICA – DISEÑO MECÁNICO

PROYECTO QUETZAL
COMPARACIÓN METODOLÓGICA ENTRE:
ANÁLISIS Y DISEÑO DE MISIONES ESPACIALES
(SPACE MISSION ANALYSIS AND DESIGN)
Y
COOPERACIÓN EUROPEA PARA LA ESTANDARIZACIÓN DEL ESPACIO
(EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARDIZATION)

PROPUESTA DE DISEÑO DE MISIONES ESPACIALES

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ERIKA PATRICIA CASTRUITA YSCAPA

TUTOR PRINCIPAL
DR. SAÚL DANIEL SANTILLÁN GUTIÉRREZ
FACULTAD DE INGENIERÍA

QUERÉTARO, QUERÉTARO ABRIL 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Jesús Manuel Dorador González

Secretario: Dr. Gabriel Ascanio Gasca

Vocal: Dr. Saúl Daniel Santillán Gutiérrez

1 er. Suplente: Dr. Carlos Romo Fuentes

2 do. Suplente: Dr. José Alberto Ramírez Aguilar

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: UAT, UNAM Juriquilla.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Saúl Daniel Santillán Gutiérrez

FIRMA

Agradecimientos

Resumen

El propósito de esta tesis de maestría es el de brindar una descripción y comparación detallada de dos metodologías internacionales que son actualmente utilizadas como referencias para el diseño, análisis e implementación de misiones espaciales.

Las metodologías estudiadas dentro de este documento son:

1. Análisis y Diseño de Misiones Espaciales (Space Mission Analysis and Design SMAD). Metodología utilizada en los Estados Unidos de América.

2. Cooperación Europea para la Estandarización del Espacio (European Cooperation for Space Standardization standards ECSS). Metodología de la Agencia Espacial Europea.

Éste documento guía al lector a través de cada una de las metodologías, mostrando sus fases, revisiones, pasos y tareas que deben de ser ejecutadas a lo largo del ciclo de vida de las misiones espaciales.

La comparación entre metodologías se centra en el proceso de diseño de misiones espaciales. Durante la comparación se busca la identificación de las fases, pasos, tareas, revisiones y requerimientos comunes entre las dos metodologías. La unión de ambas metodologías da como resultado una propuesta de la metodología para el diseño y análisis de misiones espaciales, enfocándose en micro satélites; esta propuesta cual cumple con los requerimientos establecidos por las metodologías predecesoras.

La propuesta metodología contenida en esta tesis de maestría utiliza como caso de estudio al Microsatélite Quetzal.

La intención de este documento es establecer una metodología para el diseño de misiones espaciales base, la cual, en el futuro, podrá ser comparada con otras metodologías utilizadas en el mundo actualmente, por ejemplo: la metodología rusa.

Tabla de contenidos

INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Objetivos de la tesis	1
1.2. Contenido de la tesis.....	2
MISIONES OBJETIVO	7
2.1. Introducción.....	7
2.2. Pequeños Satélites	8
2.3. Microsatélite Quetzal	9
2.3.1. Metodología Actual del Microsatélite Quetzal	12
2.3.2. Segmentos: Terrestre y Espacial	15
2.3.3. Segmento espacial del Microsatélite Quetzal.....	18
METODOLOGÍAS DE ESTUDIO.....	33
3.1. Análisis y Diseño de Misiones Espaciales (Space Mission Analysis and Design)	33
3.1.1. Ciclo de vida de la misión espacial	35
3.1.2. Proceso Análisis y Diseño de Misiones Espaciales (SMAD)	38
3.1.3. Conceptos, información de subsistemas y análisis de la misión	52
3.2. Metodología europea.....	60
3.2.1. Fases del Proyecto	62
Áreas del sistema de Estándares ECSS	69
3.2.2. Área de Gestión de Proyectos	71
3.2.3. Área de Ingeniería	73
3.2.4. Área de Certeza de Operación para el Producto	77
3.2.5. Área de Sustentabilidad (Sustainability branch)	84
COMPARACIÓN DE METODOLOGÍAS	86
4.1. Proceso de Análisis y Diseño para Misiones Espaciales.....	87
4.2. Estándares de la Cooperación Europea para la Estandarización del Espacio.....	105
4.3. Introducción a la comparación del proceso de diseño	124
4.3.1. Configuración de tablas de comparación	127
4.4. Comparación del proceso de diseño	128
PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE MISIONES ESPACIALES.....	149
5.1. Revisiones durante el ciclo de vida de la misión espacial	163
APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE DISEÑO PROPUESTA AL CASO DE ESTUDIO: MICROSATÉLITE QUETZAL.....	165

CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO	168
7.1. Conclusiones	168
7.2. Trabajo Futuro	169
REFERENCIAS	172

Índice de figuras

Figura 2-1 Etapas generales para el desarrollo del proyecto satelital Quetzal.....	12
Figura 2-2 Segmento terrestre mínimo básico para Telemetría y Comando.....	16
Figura 2-3 Comparación de estándares de designación de banda de radio.....	17
Figura 2-4 Vista de detalle del Microsatélite Quetzal.....	21
Figura 3-1 Etapas de Desarrollo Programas Espaciales.....	37
Figura 3-2 Disciplinas de sistema ECSS.....	70
Figura 3-3 Estándares ECSS del área de Gestión de Proyecto	71
Figura 3-4 Estándares ECSS del área de Ingeniería. Parte I.....	74
Figura 3-5 Estándares ECSS del área de Ingeniería. Parte II.....	75
Figura 3-6 Estándares ECSS del área de Certeza de Operación para el Producto. Parte I	79
Figura 3-7 Estándares ECSS del área de Certeza de Operación para el Producto. Parte II	80
Figura 3-8 Estándares ECSS del área de Certeza de Operación para el Producto. Parte III....	81
Figura 3-9 Estándares ECSS del área de Sostenibilidad.....	85
Figura 4-1 Estructura del proceso SMAD. Propuesta por la autora.....	88
Figura 4-2 SMAD Fase: Definición de objetivos. Propuesta por la autora.....	91
Figura 4-3 SMAD Fase: Caracterización de la misión. Propuesta por la autora.	98
Figura 4-4 SMAD Fase: Evaluación de la misión. Propuesta por la autora.....	101
Figura 4-5 SMAD Fase: Definición de requerimientos. Propuesta por la autora.	104
Figura 4-6 Estructura estándares ECSS. Propuesta por la autora.	106
Figura 4-7 ECSS Fase 0: Análisis de la misión/Identificación de necesidades. Propuesta por la autora.	108
Figura 4-8 ECSS Fase A: Factibilidad. Propuesta por la autora.	110
Figura 4-9 ECSS Fase B: Definición preliminar. Propuesta por la autora.....	113
Figura 4-10 ECSS Fase C: Definición detallada. Propuesta por la autora.	115
Figura 4-11 ECSS Fase D: Calificación y Producción. Propuesta por la autora.	118
Figura 4-12 ECSS Fase E: Operaciones/Utilización. Propuesta por la autora.....	121
Figura 4-13 ECSS Fase F: Retirada/Eliminación. Propuesta por la autora.....	123

Índice de tablas

Tabla 2-1 Bandas de frecuencia según el estándar IEEE	16
Tabla 2-2 Recopilación de Tesis. Parte I.....	23
Tabla 2-3 Recopilación de Tesis. Parte II	24
Tabla 2-4 Recopilación de Tesis. Parte III.....	25
Tabla 2-5 Recopilación de Tesis. Parte IV	26
Tabla 2-6 Recopilación de Tesis. Parte V	27
Tabla 2-7 Recopilación de Tesis. Parte VI.....	28
Tabla 2-8 Recopilación de Tesis. Parte VII	29
Tabla 2-9 Recopilación de Tesis. Parte VIII	30
Tabla 2-10 Recopilación de Tesis. Parte IX.....	31
Tabla 2-11 Recopilación de Tesis. Parte X	32
Tabla 4-1 Comparación 1. Estándares ECSS Fase 0 (Análisis de la mission/Identificación de necesidades) y Proceso SMAD Pasos:1, 2 y 3. Fase 1 (Definición de objetivos) y primera parte de la Fase 2 (Caracterización de la misión). Propuesta por la autora.....	131
Tabla 4-2 Comparación de Fase A (Factibilidad) Estándares ECSS y Fase 2 (Caracterización de la misión, pasos: 4, 5 y 6) proceso SMAD process. Parte I. Propuesta por la autora.	137
Tabla 4-3 Comparación de Fase A (Factibilidad) Estándares ECSS y Fase 3 (Evaluación de la misión, pasos 7 y 8) proceso SMAD. Parte II. Propuesta por la autora.	142
Tabla 4-4 Comparación de Fase B (Definición preliminar) Estándares ECSS y Fase 3 (Evaluación de la misión, paso 9) y Fase 4 (Definición de requerimientos, paso 10) proceso SMAD. Propuesta por la autora.	145
Tabla 4-5 Comparación de Fase B (Definición preliminar) Estándares ECSS y Fase 4 (Definición de requerimientos, paso 11) proceso SMAD. Propuesta por la autora.	146
Tabla 4-6 Fase C (Definición detallada), Fase D (Calificación y producción), Fase E (Operaciones/Utilización) y Fase F (Retirada/Eliminación) Estándares ECSS. Propuesta por la autora.	148

Introducción

El trabajo aquí presentado fue generado como una referencia para el lector involucrado en proyectos espaciales para conocer diferentes metodologías de diseño para misiones espaciales.

Los logros que ha tenido México a través de los años en este campo han sido limitados por decisiones políticas en el país que han cortado el apoyo del proyecto espacial mexicano. Siendo un país con una economía emergente podemos vislumbrar que el apoyo al proyecto espacial mexicano seguirá siendo corto e intermitente, por lo que es necesario que los desarrolladores de proyectos espaciales mexicanos continúen buscando soporte en entidades internacionales, universidades que persigan el mismo objetivo y en industria de capital privado a la cual le interese el desarrollo de proyectos espaciales, con la finalidad de obtener los recursos necesarios para la implementación de proyectos espaciales.

Este documento da pie a generar un marco estructurado de diseño de misiones espaciales, el cual puede ser utilizado para pedir apoyo a diferentes organizaciones e instituciones. El tener claros los objetivos de la misión es punto de partida básico para tener un proceso de diseño claro que asegure cumplir con todos los requerimientos identificados de la misión aumentando las posibilidades de tener una misión exitosa.

1.1. Objetivos de la tesis

Los objetivos de esta tesis de maestría pueden ser resumidos en tres:

1. Brindar una descripción y comparación detallada de dos metodologías internacionales que son actualmente utilizadas como referencias para el diseño, análisis e implementación de misiones espaciales:
 - a. Análisis y Diseño de Misiones Espaciales (Space Mission Analysis and Design SMAD). Metodología utilizada en los Estados Unidos de América.

- b. Cooperación Europea para la Estandarización del Espacio (European Cooperation for Space Standardization standards ECSS). Metodología de la Agencia Espacial Europea.
2. Proponer una metodología para el diseño de misiones espaciales en México, y
3. Analizar que etapas de la propuesta metodología de diseño de misiones espaciales mexicanas han sido cubiertas por el caso de estudio Microsatélite Quetzal.

La comparación entre metodologías se centra en el proceso de diseño de misiones espaciales. Durante la comparación se busca la identificación de las fases, pasos, tareas, revisiones y requerimientos comunes entre las dos metodologías. La unión de ambas metodologías da como resultado una propuesta de la metodología para el diseño y análisis de misiones espaciales, enfocándose en micro satélites; esta propuesta tiene como objetivos el cumplir con los requerimientos establecidos por sus metodologías predecesoras.

Esta propuesta busca ser una guía que ayude al desarrollador a generar la documentación necesaria del proyecto y del proceso de diseño de la misión espacial la cual permita establecer los requerimientos de esta, asignar las tareas que cada subsistema deberá desarrollar para cumplir con los requerimientos que les han sido asignados, realizar planeaciones de costos y de cronogramas. Esta información permite tener pláticas de alto nivel con las organizaciones que proveerán los recursos con información detallada de la misión y fácil de seguir por personal que no se encuentre familiarizado con el proyecto.

1.2. Contenido de la tesis

Esta tesis está compuesta de siete capítulos que guían al lector a través del proceso de investigación realizado en el transcurso de los estudios de maestría.

El primer capítulo, es una breve introducción al tema de investigación estableciendo los objetivos que persigue este trabajo de maestría, y dando una breve reseña de cada uno de los capítulos que dan forma al documento.

El segundo capítulo da marco a los antecedentes de esta tesis, cubriendo temas como qué son las misiones espaciales, el incremento de interés en el uso de satélites pequeños y constelaciones, la calificación de los satélites pequeños en función de su tamaño y masa, así como su expectativa de vida y los costos asociados estas misiones y los problemas más comunes ligados a este tipo de satélites.

En la segunda parte del capítulo segundo se describe el estado actual del proyecto Microsatélite Quetzal, la metodología que se ha seguido para desarrollar el proyecto, quiénes son los participantes en este proyecto, la declaración de la misión y sus objetivos, los requerimientos de la misión, y una breve descripción de los subsistemas que dan forma al Microsatélite Quetzal.

El capítulo tres brinda al lector una descripción detallada de las dos metodologías de diseño que son comparadas en esta tesis:

1. Análisis y Diseño de Misiones Espaciales (Space Mission Analysis and Design SMAD). Metodología utilizada en los Estados Unidos de América.
2. Cooperación Europea para la Estandarización del Espacio (European Cooperation for Space Standardization standards ECSS). Metodología de la Agencia Espacial Europea.

Este capítulo guía al lector a través de cada una de las metodologías, mostrando sus fases, revisiones, pasos y tareas que deben de ser ejecutadas a lo largo del ciclo de vida de las misiones espaciales.

El cuarto propone una lista de pasos y tareas asociadas a cada una de las metodologías de diseño con el fin de poder ser comparadas tarea por tarea. La primer parte del capítulo muestra el proceso SMAD a detalle y propone listas de pasos a realizar para cumplir con la etapa de diseño en el proceso. La segunda parte muestra a detallet cada una de las fases con sus tareas y revisiones que la metodología ECSS establece.

La última parte del cuarto capítulo realiza la comparación de metodologías, describiendo cuáles son los pasos comunes entre ambas y las aportaciones que no tienen espejo en la metodología con la que se compara. Se muestran tablas que facilitan al lector la comparación de tareas.

Para las fases que no están definidas como de diseño en la metodología ECSS se establecen las tareas que deben ser cumplidas para completar el ciclo de vida de una misión espacial. Al final de capítulo se muestra la tabla de dichas fases con sus respectivas tareas y revisiones, que podrán servir como guía al lector una vez concluido el proceso de diseño.

En el capítulo quinto se propone una metodología para el diseño de misiones espaciales, esta es una primera propuesta que busca fungir como base para la metodología de diseño de misiones espaciales en México. Al ser esta el punto de partida o primer bosquejo de la metodología mexicana para el diseño de misiones espaciales documentada, se entiende que este es un documento perfectible y vivo, que deberá estar sujeto a revisiones llevadas a cabo por los desarrolladores de misiones espaciales en México, con la finalidad de ser actualizado, mejorado y complementarlo.

La propuesta metodológica es un guía para el desarrollador de misiones espaciales; es imprescindible que se sumen a este esfuerzo equipos interdisciplinarios que aporten su experiencia para hacer crecer esta metodología y detallar las áreas de interés de los usuarios.

El capítulo sexto muestra el caso de estudio Microsatélite Quetzal. Se analiza que etapas de la propuesta metodológica han sido cubiertas por el caso de estudio.

El capítulo séptimo muestra las conclusiones de esta tesis de maestría, haciendo hincapié en la experiencia de la autora que ha laborado durante once años en el desarrollo de proyectos de turbinas para aviación dentro de la empresa General Electric, y las aportaciones de valor de cada una de las metodologías: Proceso SMAD y la metodología ECSS.

Finalmente, el capítulo séptimo describe proyectos identificados por la autora, que pueden ser llevados a cabo en el futuro utilizando esta tesis como referencia.

Misiones objetivo

2.1. Introducción

Las misiones espaciales son proyectos polifacéticos e interdisciplinarios que integran no solo la nave espacial o satélites, éstos proyectos también incluyen la misión científica, llamada “carga útil”, estaciones terrenas para procesar la información que será generada, control de posición (control of attitude), telemetría y comando, comunicaciones y sistemas de energía (potencia), infraestructura para pruebas y validación, infraestructura de los lanzadores, entre otros componentes que contribuirán al alto costo y la complejidad de éstos proyectos.

Actualmente el objetivo en las misiones espaciales es reducir los costos sin sacrificar el beneficio, la optimización de recursos conlleva al uso de naves espaciales y satélites más pequeños, mejores y de menor costo. Los satélites ligeros involucran poca masa, reducción de tamaño y por tanto la reducción en los costos. Al utilizar satélites más ligeros los costos de lanzamiento son los primeros en ser reducidos, también permite el uso de diseños de menor costo y procedimientos de ensamble más sencillos que pueden realizarse en infraestructuras de bajo costo.

Una de las principales ventajas de satélites pequeños es la posibilidad de crear constelaciones de ellos. Una constelación es un conjunto de 2 o más satélites que permiten tener un monitoreo más frecuente de puntos específicos de la Tierra. El uso de constelaciones permite la producción en masa de satélites, lo que se verá reflejado en un costo menor. Las constelaciones de pequeños satélites proveen una cobertura más amplia; por lo tanto, estas configuraciones pueden ser usadas para usos en comunicación y aplicaciones donde la transmisión de datos en tiempo real y una alta cobertura es requerida.

2.2. Pequeños Satélites

Nuevos tipos de satélites están siendo desarrollados para alcanzar la optimización que la industria espacial está buscando.

Los satélites pequeños abarcan cuatro principios: ser más rápidos, ser mejores, ser más pequeños y ser más baratos. Éstos satélites son normalmente desarrollados con un calendario que va de seis hasta treinta y seis meses. El uso de componentes comerciales (commercial off-the shelf COTS) es común en estos satélites como una alternativa para reducir costos.

El campo normalmente comprendido por el campo espacial comercial está enfocado en satélites geoestacionarios, cuyo peso está entre 1000 hasta 12000 kilogramos, su uso es la comunicación. La definición de satélites pequeños comprende satélites con un peso por debajo de los 500 kilogramos (Santillán, Romo, Ramírez, De la Rosa, Sánchez, Lozano, Sáenz-Otero, Grutter, Prado, 2012).

Existe una clasificación de los satélites científicos pequeños de acuerdo a su masa:

- Minisatélites: desde 100 kg hasta 500 kg. Vida Útil: 7-10 años.
Costo de una misión 100 millones \$US.
- Microsatélites: desde 10 kg hasta 100 kg. Vida Útil: 2-5 años.
Costo de una misión 5-10 millones \$US.
- Nanosatélites: desde 1 kg hasta 10 kg. Vida Útil: 4 meses – 1.5 años.
Costo de una misión 150-300 mil \$US.
- Picosatélites: desde 0.1 kg hasta 1 kg. Vida Útil: 4 meses – 1 año.
Costo de una misión 15-100 mil \$US.
- Femtosatélites: menores a 0.1 kg. Vida Útil: días – 3 meses.
Costo de una misión 10-100 mil \$US.

Debido al tamaño de las dos últimas divisiones, estos satélites normalmente trabajan con un satélite madre. El satélite madre es un satélite más grande que está enfocado en la comunicación con Tierra, el lanzamiento de funciones y/o el acoplamiento de los satélites.

Los satélites pequeños implican el uso de órbitas bajas o LEO por sus siglas en inglés (Low Earth Orbit), lo cual significa una buena resolución para la observación de la Tierra y bajos requerimientos energéticos para su comunicación.

De acuerdo con la altitud de las órbitas LEO, usualmente los satélites pequeños estarán localizados por debajo de los cinturones interiores de Van Allen de radiación, por lo tanto, los satélites estarán expuestos a radiaciones menores que los satélites ubicados en altitudes mayores.

El principal problema que enfrentan los satélites pequeños es que tienen una cobertura pobre de la Tierra, debido a esta limitada cobertura será necesario el uso de varias estaciones terrenas o una constelación satelital. Otro problema es que el espacio cercano a la Tierra, (LEO) se encuentra actualmente congestionado de basura espacial y la posibilidad de colisión es alta cuando se compara con órbitas más altas.

Debido al arrastre atmosférico, todos los satélites con una altitud menor a 1000 km eventualmente caerán a la superficie de la Tierra al final de su vida. La perturbación gravitacional de la Tierra también afectará a los satélites LEO y es importante analizar el impacto que tendrá en estas misiones. La perturbación gravitacional de la Tierra es causada por su achatamiento (Efecto J2) así como también por su densidad inconsistente.

2.3. Microsatélite Quetzal

La Universidad Nacional Autónoma de México se ha sumado al esfuerzo nacional que promueve la incursión en el espacio y el desarrollo tecnológico espacial. El objetivo que persigue la Universidad es la transferencia de tecnología sistemas específicos y desarrollo de

tecnología y capacidades y habilidades en el campo de las misiones espaciales, a través de la colaboración interinstitucional en proyectos espaciales en satélites.

El objetivo es desarrollar recursos científicos e intelectuales especializados en tecnología satelital, generar proyectos innovadores de alto impacto social y académico.

El proyecto “Microsatélite Quetzal” fue presentado en el año 2011 como una propuesta interinstitucional entre la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y el Instituto de Tecnología de Massachusetts (Institute of Technology of Massachusetts MIT) dentro del MIT International Science and Technology Initiatives (MISTI) Global Seed Funds (Santillán, Romo, Ramírez, De la Rosa, Sánchez, Lozano, Sáenz-Otero, Grutter & Prado, 2012).

La misión del proyecto Microsatélite Quetzal es el monitoreo de las concentraciones de contaminantes en el aire sobre zonas urbanas, como la ciudad de México y ciudades latinoamericanas, desde una órbita terrestre baja (Santillán, Romo, Ramírez, De la Rosa, Sánchez, Lozano, Sáenz-Otero, Grutter & Prado, 2012). Otros objetivos de la misión es obtener imágenes satelitales de la Tierra para el estudio de áreas forestales, distribuciones humanas, actividades industriales y volcánicas, y encontrar una correlación entre el ser humano y fuentes naturales de contaminación y su impacto. El estudio de contaminación atmosférica estará acotado a 6 tipos de contaminantes atmosféricos,

El Microsatélite Quetzal tiene como objetivos (Santillán, Romo, Ramírez, Chavez & Aparicio, 2016):

- Desarrollar la primera constelación de microsatélites para tomar fotografías de la Tierra, medición de contaminantes atmosféricos y prueba de sistemas de comunicación con integración de tecnología mexicana para uso científico e impacto social.
- Desarrollo de capacidades tecnológicas en centro de Investigación y Desarrollo (I&D), Universidades y empresas participantes.

- Elaborar una plataforma para microsátélites experimental con ingeniería desarrollada en México.
- Establecer un modelo de trabajo en las instituciones participantes para el desarrollo de misiones espaciales.
- Ofrecer la oportunidad de desarrollar, probar y validar tecnología nacional en una misión espacial completa.
- Establecer bases de colaboración con instituciones líderes en el campo como lo son MIT (Massachusetts Institute of Technology), Notre Dame, John Hopkins, Surrey University y el Instituto Aeronáutico de Moscú.
- Integrar estudiantes de licenciatura y posgrado en el desarrollo de tecnología satelital en el área de microsátélites, dentro de un programa formal de investigación y desarrollo.

Los institutos de la UNAM que han ofrecido su apoyo para la declaración de la misión y para la instrumentación requerida por los subsistemas del satélite son: la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, Space Propulsion Laboratory de Massachusetts Institute of Technology, Space Systems Laboratory de Massachusetts Institute of Technology, el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México, el Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México y la Unidad de Alta Tecnología (antes Centro de Alta Tecnología) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Actualmente existen muchos satélites que tienen misiones similares al Microsatélite Quetzal: AURA [2004] (Lynn, 2017), ADEOS-II: Midori-II (Akimasa, Teruyuki, Akira, Toshio, Humihiko, Sonoyo, Teruo, Joji, Ryutaro, Masahisa, Naoto, Masato, Motoya & Yasuhiro, 1999) y Envisat (European Space Agency, 2018). Pero éstos satélites con grandes, caros, complejos

y utilizan órbitas no adecuadas para monitorear las zonas de nuestro interés. Los costos de estos satélites están fuera del rango de satélites que países emergentes pueden costear.

Otra innovación que el Microsatélite Quetzal tiene planeada utilizar es el uso de componentes comerciales de estantería (COTS).

Actualmente para el Microsatélite Quetzal se analiza el uso de una constelación que nos permita obtener mayor información de las ciudades de interés y probar diferentes tecnologías, las cuales nos permitan determinar las concentraciones atmosféricas de contaminantes atmosféricos relevantes.

2.3.1. Metodología Actual del Microsatélite Quetzal

El caso de estudio Microsatélite Quetzal ha sido desarrollado utilizando los procedimientos descritos en el estándar ruso para proyectos espaciales: GOST 2.103-68 / ST SEV 208-75 (Romo, Ferrer, Santillán, Ramírez & Chávez, 2016) (Sistema general para la documentación de diseño) y la metodología para el Análisis y Diseño de Misiones Satelitales (SMAD). Cuatro etapas son identificadas en este proyecto: Concepción, Desarrollo, Implementación y Operación.

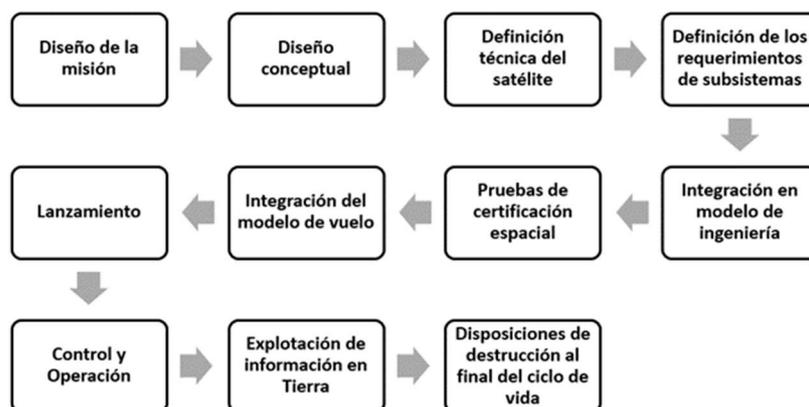


Figura 2-1 Etapas generales para el desarrollo del proyecto satelital Quetzal

(Romo & Santillán, 2017)

Las etapas de diseño del proyecto Microsatélite Quetzal son tres: La primera de ellas es el desarrollo **conceptual** del diseño, la segunda etapa es el diseño y desarrollo del **modelo de ingeniería** y la tercera etapa es el diseño y desarrollo del **modelo de vuelo**.

Primera etapa. Etapa del diseño conceptual incluye la planeación de la misión, establecer el equipo requerido, las dimensiones del satélite y la caracterización de la órbita. La investigación requerida en esta etapa se soporta por análisis asistido por computadora (CAD), estrategias alternativas y aplicaciones a elegir por los encargados de los sistemas que ayuden a determinar la posible configuración de estos sistemas. También es importante la investigación sobre los posibles componentes y equipos a utilizar. La infraestructura requerida en esta etapa es: Software y Hardware adecuado para el uso de simulaciones de CAD, manuales, acceso a internet y laboratorios. Las actividades principales en esta parte del proceso son el diseño y pruebas del diseño conceptual.

Segunda Etapa: En la etapa de diseño y desarrollo del diseño de ingeniería, el objetivo es el desarrollo de modelos y prototipos de los sistemas del satélite con sus componentes electrónicos. La investigación involucrada en esta segunda etapa gira en torno al diseño del sistema mismo buscando la producción de un modelo ingenieril del satélite. El modelo de ingeniería es un prototipo completo capaz de realizar las funciones del satélite en condiciones terrestres sin implicar que esa misma configuración o componentes serán incorporados al modelo de vuelo. La investigación también involucra las posibles pruebas para evaluar el rendimiento de los sistemas en el espacio, aunque no llegue en esta etapa a ser tan severo. Los prototipos serán probados por separado y también probados en conjunto en el satélite

La infraestructura necesaria en esta segunda etapa depende de los requerimientos de los laboratorios de ensamble de sistemas y los laboratorios para la prueba de las tareas para las que están diseñados; es por esto por lo que los componentes de esta infraestructura principales son: mesas vibratorias, laboratorios de electrónica, laboratorios de programación, tableros de

circuitos impresos y circuitos integrados, los cuales pueden requerir ser de calidad militar o incluso espacial. Las actividades involucradas en esta etapa son el diseño y desarrollo de prototipos de los sistemas y la producción del modelo de ingeniería, así como su evaluación a través de pruebas. Existen tres posibles opciones para poner a prueba el modelo completo de vuelo del satélite: globo estratosférico, vehículo no tripulado UAV por sus siglas en inglés (unmanned aerial vehicle UAV) y cohete.

Tercera etapa. Diseño y desarrollo del modelo de vuelo, el objetivo de esta etapa es desarrollar el modelo final que será lanzado al espacio y que tendrá las capacidades y cumplirá la misión espacial, este es el modelo de vuelo. La investigación durante esta etapa estará enfocada en el diseño, pruebas y validaciones del modelo final. Un punto importante en el desarrollo de esta etapa es evaluar la aplicación de COTS componente de uso comercial disponible que no necesariamente tiene aplicación espacial.

Los requerimientos de la infraestructura requerida durante la tercera etapa están orientados a las instalaciones y herramientas requeridas para el ensamble del modelo de vuelo: laboratorio de programación, cámara de vacío, instalación para análisis de radiación, tableros de circuitos impresos y circuitos integrados de calidad militar o espacial, mesas vibratorias, laboratorios de electrónica y un **cuarto limpio** donde será realizado en ensamble de todos los componentes del modelo de vuelo. Las actividades involucradas en esta etapa final consisten en el desarrollo, ensamble, pruebas y verificación del modelo de vuelo.

Los pasos que se han seguido para el diseño de una plataforma satelital consisten en (Romo, & Santillán, 2017):

1. Analizar la construcción de prototipos, incluyendo aspectos técnicos y económicos.
2. Realizar el análisis del programa en general (se analiza la probabilidad de cumplimiento del programa en un solo aparato y del volumen de equipo de vuelo)
3. Normalizar la esperanza y la distribución de masa por sistemas funcionales.

4. Realizar el análisis balístico que cumple el programa de vuelo por tiempo, se definen etapas del programa de vuelo.
5. Definir las tareas técnicas para cada sistema funcional. Se diseña el esquema de fuerzas basado en el análisis de cargas calculadas.
6. Realizar la síntesis de los sistemas en un solo complejo, en el cual se distribuyen de manera óptima los parámetros de restricción, se encuentra la combinación óptima de la esperanza de los sistemas por separado y la probabilidad de cumplimiento de las operaciones durante la trayectoria de vuelo.

Los pasos anteriormente señalados están sujetos a una constante retroalimentación y comunicación entre los diferentes subgrupos desarrolladores, los integrantes del proyecto estarán siempre presentes durante y al momento de la generación y presentación de propuestas que cubran las restricciones y requerimientos establecidos.

2.3.2. Segmentos: Terrestre y Espacial

Existen dos segmentos que dan forma al proyecto: segmento terrestre y segmento espacial.

El segmento terrestre es donde toda la información proveniente del satélite será procesada y donde las funciones de control terrestre serán llevadas a cabo. Ha sido determinado que dicho segmento será una instalación en México, localizado en el estado de Querétaro dentro de la Unidad de Alta Tecnología (UAT) de la UNAM campus Juriquilla. Este segmento terrestre estará compuesto de (Santillán, Romo, Ramírez, Chavez & Aparicio, 2016):

- a) Estación terrena para telemetría y comando con antenas para bandas VHF (2m) y UHF (70 cm),

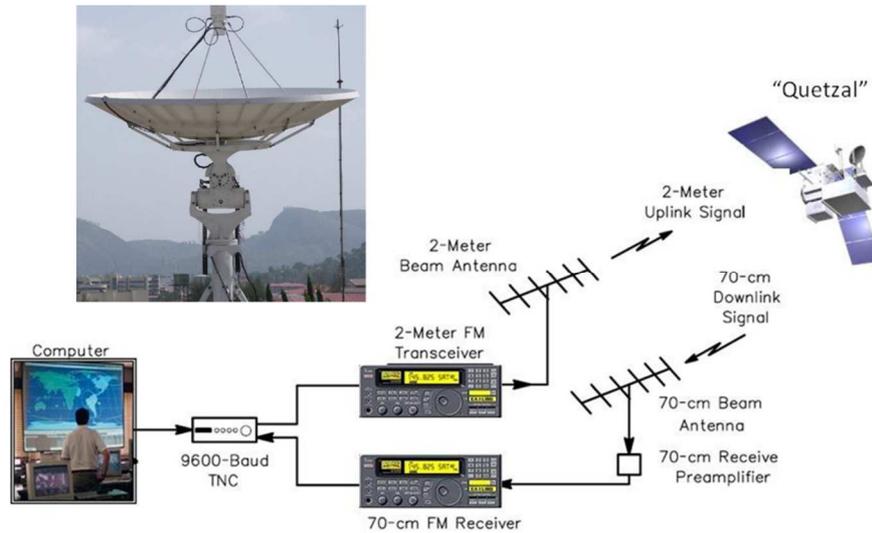


Figura 2-2 Segmento terrestre mínimo básico para Telemetría y Comando

(Santillán, Romo, Ramírez, Chavez & Aparicio, 2016)

- b) Estación terrena para bajar la información de la carga útil con antena que trabajará en la banda X o S,

Tabla 2-1 Bandas de frecuencia según el estándar IEEE

(IEEE Std 521-2002 Standard Letter Designations for Radar-Frequency Bands)

Band designation	Frequency range	
HF	0.003 to 0.03 GHz	High Frequency
VHF	0.03 to 0.3 GHz	Very High Frequency
UHF	0.3 to 1 GHz	Ultra High Frequency
L	1 to 2 GHz	Long wave
S	2 to 4 GHz	Short wave
C	4 to 8 GHz	Compromise between S and X
X	8 to 12 GHz	Used in WW II for fire control, X for cross (as in crosshair). Exotic.
Ku	12 to 18 GHz	Kurz-under
K	18 to 27 GHz	Kurz (German for "short")
Ka	27 to 40 GHz	Kurz-above
V	40 to 75 GHz	
W	75 to 110 GHz	W follows V in the alphabet
mm or G	110 to 300 GHz	Millimeter

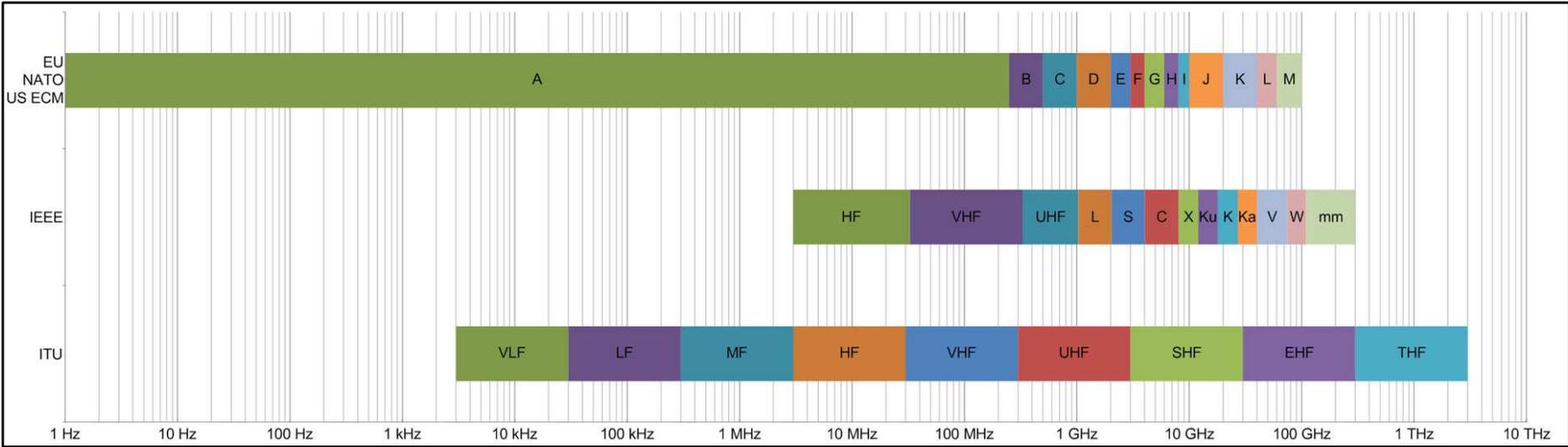


Figura 2-3 Comparación de estándares de designación de banda de radio

- c) Rotor (azimut, elevación),
- d) Transmisores,
- e) Receptores,
- f) Computadoras con el correspondiente software para despliegue, procesamiento y almacenamiento de la información recibida desde el satélite,
- g) Monitores y
- h) Red de distribución de información entre colegas participantes.

Existen actualmente dos propuestas para la órbita que el Microsatélite Quetzal utilizará, ambas propuestas son órbitas bajas (LEO), con una altitud de 686 km (Romo & Santillán, 2017):

- a) Propuesta Síncrona Solar: inclinación= 98°
- b) Propuesta Baja inclinación: inclinación= 28.5°

Estas características fueron seleccionadas en función a las necesidades de la misión: la capacidad de proveer un pasaje largo con la duración alta, lo que conlleva operaciones de telemetría, comando y transmisión de la información científica más simples: una segunda ventaja de utilizar una órbita baja es la posibilidad de lanzar el micro satélite como carga secundaria, finalmente las propuestas de inclinación garantizan la luminosidad de la zona de estudio, requerimiento de la cámara (instrumento de la carga útil) cuando está monitoreando.

2.3.3. Segmento espacial del Microsatélite Quetzal

El segmento espacial esté dividido en dos partes: la carga útil y la plataforma o carga de servicio) también conocida como plataforma o bus. La plataforma se considera el sistema estructural del satélite, mecanismos, sistema de potencia, sistema de control posición y órbita, sistemas de comando y telemetría, sistema térmico, procesamiento de información y sistema de propulsión.

El proyecto Microsatélite Quetzal está divide en once diferentes sistemas (Romo & Santillán, 2017):

1. Carga útil,
2. Subsistema de telecomunicaciones,
3. Subsistema de computadora de abordo,
4. Subsistema estructural,
5. Subsistema de control térmico,
6. Subsistema de suministro y administración de energía,
7. Subsistema de propulsión,
8. Subsistema de orientación y estabilización,
9. Subsistema de navegación,
10. Subsistema de telemetría,
11. Subsistema de acoplamiento a cohete lanzador.

Estos subsistemas están encargados de funciones o tareas específicas para la misión, por ejemplo: Análisis de compatibilidad electromagnética, Análisis de ciclado térmico, Análisis de vibraciones y esfuerzos, entre muchos otros.

Estudiantes universitarios de licenciatura y posgrado, investigadores y profesores están involucrados en cada uno de los sistemas de esta misión espacial, con esto se cumple dos de los objetivos del proyecto: 1. Desarrollo de capacidades tecnológicas en centro de Investigación y Desarrollo (I&D), Universidades y empresas participantes y 2. Integrar estudiantes de licenciatura y posgrado en el desarrollo de tecnología satelital en el área de microsatélites, dentro de un programa formal de investigación y desarrollo.

La carga útil del Microsatélite Quetzal está constituida por (Romo & Santillán, 2017):

- a) Dos espectrómetros Fabry Perot en el infrarrojo cercano (US o Noruega),

- b) Un espectrómetro UV combinando cámara multispectral de 30 a 50 mt/pixel (media resolución)

Existen dos propuestas posibles para la configuración de la estructura: rectangular y hexagonal. El peso aproximado será de 50 kilogramos, con una altura final de 50 centímetros. Utilizará una configuración modular compuesta por tres módulos. La base de estos módulos es una hoja de 5 milímetros que será unida mediante juntas atornilladas. El diseño y simulación del sistema estructural será desarrollado utilizando el método de elemento finito (FEM), poniendo énfasis en la simulación de vibraciones durante los ciclos de operación y térmicos.

La estructura mantendrá:

- Una caja para las tarjetas de la computadora de abordo (On Board Computer OBC), unidad de interface remota (Remote Interface Unit RIU), unidad de interface de la misión (Mission Interface Unit MIU) y el sistema de control. Las dimensiones de esta caja son: 32 cm x 30 cm x 20.5cm.
- Cuatro tarjetas con las siguientes dimensiones: 30 cm. x 20cm. x 3.3 cm. Con sus componentes.
- Dos cilindros de combustible para propulsión: 13 cm. x 10 cm. x 8.5 cm.
- Sistema de control y distribución: 19 cm. x 18 cm. x 10 cm.
- Dos tarjetas con sus componentes: 17 cm. x 9 cm. x 3.3 cm.
- Seis baterías con dimensiones: 6 cm. x 8 cm. x 7.5 cm.
- Una caja que contiene las ruedas (inertia wheels): 10 cm. x 10 cm. x 8 cm.
- Caja de la cámara: 20 cm. x 20 cm. x 10 cm.
- Transmisor: 14 cm. x 15 cm. x 3 cm.
- Receptor: 14 cm. x 15 cm. x 3 cm.
- Espectrómetro: 32 cm x 25 cm x 10 cm.

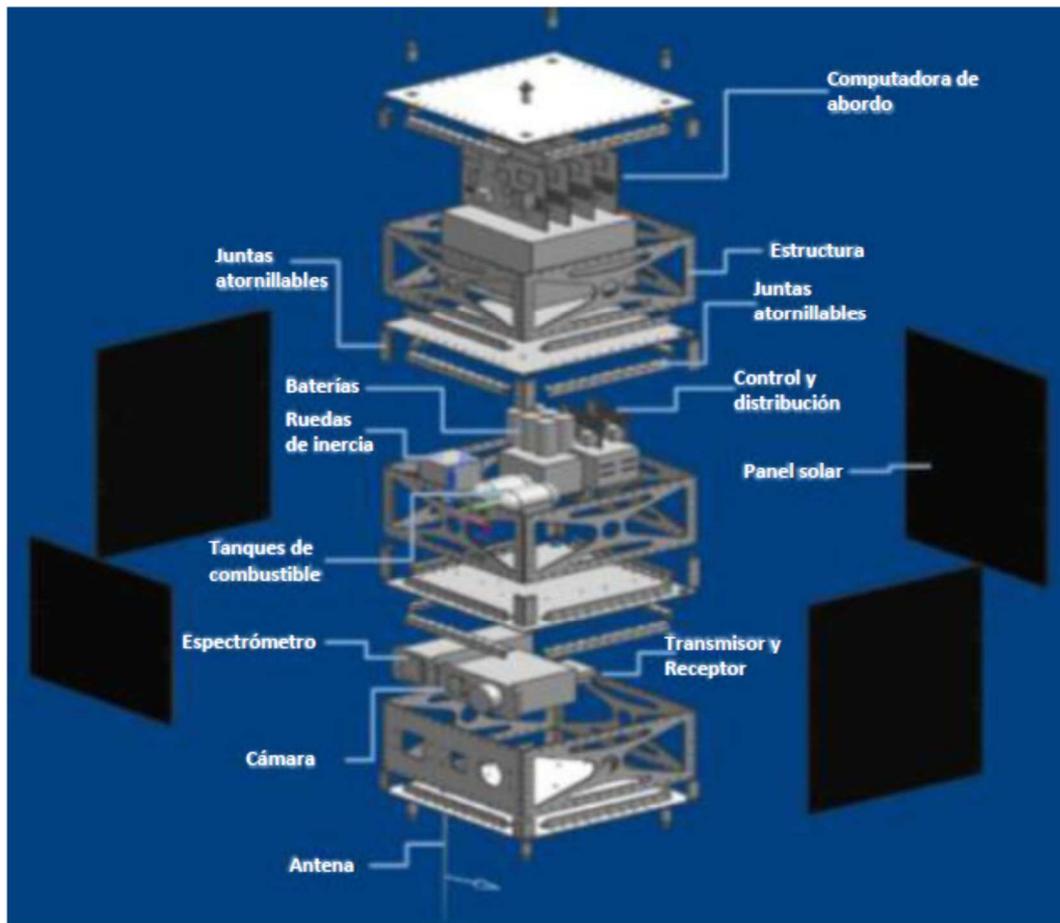


Figura 2-4 Vista de detalle del Microsatélite Quetzal

(Gaviria, 2014)

La función principal del sistema térmico es mantener y regular las temperaturas del satélite dentro de límites de operabilidad; la variación del ambiente térmico en el espacio afecta la eficiencia del hardware y la supervivencia de los satélites, por consecuencia tiene una repercusión en el éxito de la misión. El análisis de este sistema requiere de tres fases: modelo analítico, modelo numérico: el cual utilizará software específico para su análisis, y finalmente la validación experimental por medio de pruebas en una cámara de vacío.

Para estudiar el comportamiento térmico del satélite modelos de transferencia de calor será creados para diferentes casos de radiación. Dichos casos estarán definidos por los cambios de órbita, el ambiente espacial, así como las operaciones de los sistemas y subsistemas deben ser considerados en estos modelos.

El equipo de sistema de energía trabaja en conjunto con el diseño y construcción del prototipo que energizará las ruedas inerciales y también con el diseño del sistema de energía para las operaciones de servicio del Satélite. Un simulador será desarrollado a fin de analizar balances de energía y consumo de esta durante las diferentes etapas que serán observadas cuando el satélite se encuentre en operación. Otra tarea importante para el sistema de energía es el diseño de su telemetría.

El uso de ruedas inerciales es propuesto para las tareas de estabilización del satélite. El equipo a cargo del sistema de posición y control trabajará en el modelado y simulación basado en el uso de ruedas inerciales.

Los rangos de ancho de banda para los enlaces de comunicación de telemetría y comando han sido establecidos: 2 metros (VHF) y 70 centímetros (UHF). Una primera aproximación considera el uso de las bandas S o X como frecuencia de comunicación con la carga útil, pero la frecuencia final a utilizar será definida de acuerdo con la cantidad de información obtenida de los espectrómetros a utilizar.

Como ha sido mencionado anteriormente el Microsatélite Quetzal es un esfuerzo combinado de los alumnos de licenciatura y posgrado dirigidos por los investigadores y personal docente de la Universidad Nacional Autónoma de México. Las tablas 2-2 a 2-11 muestran el listado de trabajo documentado en tesis de licenciatura y posgrado que ha sido realizado para definición del Microsatélite Quetzal (hasta la fecha de publicación de esta tesis), también muestra trabajos que pueden ser utilizados como referencia para el desarrollo del proyecto.

Tabla 2-2 Recopilación de Tesis. Parte I

Autor	Tesis	Año	Resumen	Tesis	Asesor
Ortega Ontiveros, María Guadalupe	Diseño de la estructura del micro-satélite quetzal para la implementación de pruebas de vibraciones en tierra	2018	Desarrollar e implementar un sistema de prueba de vibraciones en tierra, con el objetivo de conocer el comportamiento del de este durante su lanzamiento y puesta en órbita.	Maestría	Ramírez Aguilar, José Alberto
Vilchis Martínez, Lothar José Carlos	Detección de orientación para un satélite a partir de sensores de sol y tierra	2018	Se presenta el desarrollo de un sistema de detección de orientación, que opera por medio de la información obtenida a partir de los sensores de Sol y Horizonte, con lo cual se obtienen dos mediciones, una correspondiente a las características del vector solar y otra relacionada a las características del vector de horizonte. Esta información es procesada mediante el algoritmo TRIAD (Determinación de Orientación en Tres Ejes), posteriormente es convertida a cuaterniones, esto con el fin de que estos datos sean utilizados en el sistema de control de orientación.	Maestría	Prado Molina, Jorge,
Chávez Moreno, Rafael Guadalupe	Diseño e implementación de un sistema de control de orientación para satélites	2018	Presenta el desarrollo de tres algoritmos de estimación de velocidad angular basado en la teoría de contracción con la característica de ser exponencialmente contrayentes y mas simples y transparentes en su implementación que utilizando la teoría de Lyapunov, así como su validación mediante el diseño y construcción de una banco de prueba tipo giroscópica. Se presenta el desarrollo de una Interfaz Máquina Usuario (HMI por sus siglas en ingles) en tres dimensiones bajo el ambiente de Simulink, permitiendo realizar simulaciones del proceso fuera de línea (Software in-the Loop), minimizando costos y evitando accidentes humanos.	Doctorado	Tang Xu, Yu Santillán Gutiérrez, Saúl Daniel

Tabla 2-3 Recopilación de Tesis. Parte II

Autor	Tesis	Año	Resumen	Tesis	Asesor
Salazar Díaz, Geraldo	Desarrollo de un modulador adaptativo para un sistema de telecomunicación a bordo de un microsatélite	2017	Desarrollo de un modulador adaptativo para un sistema de telecomunicaciones de a bordo de un microsatélite de órbita baja, sistema de radio con modulación adaptativa con el uso de técnicas de SDR implementado en FPGAs	Maestría	Rosa Nieves, Saúl de la
Irineo González, Elizabeth	Diseño de un sistema de control térmico pasivo para un nanosatélite	2017	Se presenta un cálculo analítico sencillo para obtener rangos de temperatura estimados en los casos extremos a los que se encontrará sometido el nanosatélite en el ambiente espacial, se realizó para conocer las temperaturas a las que se encontraría el nanosatélite y poder comenzar el diseño del control térmico. Se plantearon opciones para obtener el mejor control térmico. Se desarrolló un modelo para el análisis térmico mediante simulación de diferencias finitas en el software Thermal Desktop bajo condiciones de casos extremos y órbita definida.	Maestría	Santillán Gutiérrez, Saúl Daniel
Farah Simón, Lisette	Administración de tecnología con perspectiva sustentable en la industria espacial en México	2017	Analizar las características de la administración de tecnología que sirven de soporte a la toma de decisiones sobre los recursos tecnológicos de las organizaciones que conforman la industria espacial en México y sobre los desechos generados por los desarrollos satelitales	Doctorado	Adam Siade, Juan Alberto Santillán Gutiérrez, Saúl Daniel Romo Fuentes, Carlos

Tabla 2-4 Recopilación de Tesis. Parte III

Autor	Tesis	Año	Resumen	Tesis	Asesor
Hernández González, Manuel	Marco legal para el desarrollo de tecnología espacial en los proyectos del centro de alta tecnología de la FI en la UNAM	2016	<p>Descripción general sobre los requisitos, instancias, reglamentos, acuerdos, tratados, circulares y leyes involucradas para lograr un buen cumplimiento con el Marco Legal en el área de Desarrollo de Tecnología Espacial para los proyectos del CAT. Así como proporcionar a los responsables de los proyectos en el CAT, la lista de las Instancias que se encargan de llevar la legislación en México para el desarrollo de tecnología espacial, esto a través de la búsqueda, investigación y acercamiento a los principales representantes en el Derecho y Legislatura Espacial en México.</p> <p>Lo anterior tienen como propósito que los proyectos realizados en el Centro de Alta Tecnología de la FI-UNAM conozcan, cumplan y se apeguen al Marco Legal actual de México.</p>	Licenciatura	Romo Fuentes, Carlos
Reynoso Reyes, Ernesto	Caracterización de un propulsor tipo hall para un microsatélite	2016	Caracterizar un propulsor Hall para un microsatélite mexicano. Esta caracterización permitirá entender lo mejor posible, y de forma concreta, la física involucrada en el propulsor Hall.	Licenciatura	Ferrer Pérez, Jorge Alfredo
Mendes Gantes, Berenice	Propuesta de sistema estructural para satélites pequeños en estándar CUBESAT	2016		Maestría	Santillán Gutiérrez, Saúl Daniel
Morales Sánchez, Joel Edmundo	Diseño de un sistema de control para el propulsor Hall del micro satélite Quetzal	2015	Diseñar un sistema de control para un propulsor Hall que sea adaptativo, robusto y de fácil implementación.	Licenciatura	Ferrer Pérez, Jorge Alfredo Rosa Nieves, Saúl de la,

Tabla 2-5 Recopilación de Tesis. Parte IV

Autor	Tesis	Año	Resumen	Tesis	Asesor
Reyes Morales, Rigoberto	Diseño de un esquema de control para la orientación en 3 ejes de un micro-satélite de percepción remota con ruedas inerciales	2015	Se presenta el proceso de diseño de un esquema de control de la orientación basado en el controlador “Quaternion Feedback Regulator” que, en esencia, es un controlador de tipo ‘proporcional derivativo’, que hace uso del vector cuaternion error y la velocidad angular del satélite, para determinar el par de control que debe aplicarse al satélite para alcanzar la orientación deseada. El proceso de diseño presenta a detalle la obtención del modelo matemático, que describe la cinemática y dinámica del movimiento rotacional de un satélite, haciendo uso de la dinámica de cuerpo rígido y de los cuaterniones unitarios para la representación de la orientación. Así mismo, se describe la definición de las ganancias que conforman la ley de control, que cumple con los requerimientos de control, con lo cual se genera un esquema de control de la orientación. Finalmente se presentan los resultados de la evaluación del desempeño del esquema de control de la orientación en 3 ejes diseñado, la cual se realizó mediante simulaciones numéricas realizadas en “software” especializado.	Maestría	Romo Fuentes, Carlos
Tejada Malpica, Eric Adrián	Diseño y construcción de un propulsor espacial para un micro-satélite	2015	Diseño, caracterización y fabricación de un propulsor de efecto Hall destinado para un sistema de propulsión para un micro-satélite que está basado en los requerimientos de un proyecto satelital llamado “Quetzal”, realizado por el Centro de Alta Tecnología de la UNAM.	Maestría	Ferrer Pérez, Jorge Alfredo, Tang Xu, Yu

Tabla 2-6 Recopilación de Tesis. Parte V

Autor	Tesis	Año	Resumen	Tesis	Asesor
Aparicio Estrada, Mónica	Diseño conceptual de un sistema de gestión de energía en un microsatélite	2015	<p>Conocer los subsistemas que conforman una misión satelital desde un enfoque de funcionalidad y gasto energético.</p> <p>Proponer los arreglos de celdas y baterías, de acuerdo a la estructura de la misión y los requerimientos energéticos.</p> <p>Proponer los modos de operación en los que el satélite lleve a cabo su misión de manera óptima con el fin de obtener una adecuada gestión energética.</p>	Licenciatura	Santillán Gutiérrez, Saúl Daniel
Castañeda Alcala, Daniel Omar	Implementación de un modulador - demodulador digital QPSK en base a un FPGA como prototipo para un microsatélite	2015	Diseñar, implementar y validar un Modulador – Demodulador digital QPSK en FPGA funcional como prototipo para misiones espaciales en microsatélites.	Licenciatura	Rosa Nieves, Saúl de la, Alvarado Zaragoza, Miguel Ángel,

Tabla 2-7 Recopilación de Tesis. Parte VI

Autor	Tesis	Año	Resumen	Tesis	Asesor
Hernández Flores, Gerardo Abraham	Consideraciones para realizar un análisis de compatibilidad electromagnética en una plataforma satelital	2015	<p>1. Análisis del comportamiento electromagnético de los sistemas eléctricos y/o electrónicos que tiene una plataforma satelital.</p> <p>2. Determinación de la intensidad de campos electromagnéticos a través de los parámetros de diseño de los sistemas eléctricos y/o electrónicos contenidos en una plataforma satelital como, voltaje de operación, intensidad de corriente, frecuencia de operación, dimensiones del sistema (ancho, largo y altura), entre otros.</p> <p>3. Se propondrán técnicas de medición para las pruebas de Compatibilidad Electromagnética para emisiones radiadas, basado en mediciones en zona cercana, mismas que se aplicarán en un sistema que formará parte de una plataforma satelital.</p> <p>4. Generación de recomendaciones y consideraciones a partir de los resultados para reducir las fuentes de interferencia electromagnética.</p>	Licenciatura	Romo Fuentes, Carlos
Moctezuma Flores, Hazael Miguel	Implementación del prototipo del sistema de adquisición de datos para plataforma satelital utilizando raspberry pi	2015	Generar un prototipo capaz de adquirir datos de parámetros físicos: humedad y temperatura provenientes de cualquier ambiente, a través de sensores para poder transmitir los valores obtenidos de manera segura y eficaz por medio de una configuración de cables hacia una red LAN así como también vía una constelación satelital.	Licenciatura	Romo Fuentes, Carlos

Tabla 2-8 Recopilación de Tesis. Parte VII

Autor	Tesis	Año	Resumen	Tesis	Asesor
Escalante Alfonso, Rafael	Análisis de los parámetros de diseño de una red de datos institucional y su implementación considerando altas cantidades de información	2015	Plantear la base de la infraestructura de una Red de Datos de Distribución que permita interconectar diferentes Centros de Investigación y una estación terrena que adquiere datos de un satélite a un Centro de Datos que se encargará de procesar, almacenar y administrar principalmente imágenes satelitales.	Licenciatura	Romo Fuentes, Carlos Santillán Gutiérrez, Saúl Daniel Ferrer Pérez, Jorge Alfredo Ramírez Aguilar, José Alberto Serrano Miranda, Hugo
Domínguez Cruz, Mario Oscar	Diseño y construcción del prototipo del sistema de potencia del satélite Quetzal	2014	Diseñar y construir el primer prototipo del sistema de potencia del satélite Quetzal con componentes COTS. Diseñar y construir una fuente conmutada controlada mediante un microcontrolador PIC.	Licenciatura	Rosa Nieves, Saúl de la,
Gaviria Arcila, Dafne	Modelado térmico de un micro-satélite: caso quetzal	2014	Analizar el sistema de regulación térmica mediante análisis numérico y analítico. Modelar la transferencia de calor del micro-satélite Quetzal. Proponer un sistema de regulación térmica para el satélite y verificarlo mediante simulación por computadora.	Maestría	Santillán Gutiérrez, Saúl Daniel Vicente y Rodríguez, William Medina Tanco, Gustavo Adolfo
Mancilla Carrasco, Ángel	Implementación del algoritmo de control de posición y estabilización del satélite quetzal basado en una plataforma fpga	2014	Implementación de una propuesta de algoritmos de Determinación de Posición y Control del satélite Quetzal UNAM-MIT basado en una plataforma FPGA. El algoritmo será parte del Sistema de Comando y Manejo de Información (SCMI) que atienda al Subsistema de Determinación de Posición y Control (ADCS).	Licenciatura	Rosa Nieves, Saúl de la,

Tabla 2-9 Recopilación de Tesis. Parte VIII

Autor	Tesis	Año	Resumen	Tesis	Asesor
Serna Cuellar, Jesús Antonio Esteban	Diseño y construcción de un sistema de monitoreo de parámetros físicos para un micro-satélite	2014	<p>Diseñar y construir un sistema de monitoreo de parámetros físicos para un micro-satélite.</p> <p>El sistema deberá monitorear los parámetros físicos necesarios dentro del proyecto Pixqui y tener una fácil migración hacia las necesidades de monitoreo del satélite Quetzal.</p> <p>El trabajo deberá servir como base para el futuro desarrollo del sistema de telemetría de Quetzal.</p>	Licenciatura	Ramírez Aguilar, José Alberto,
Pérez Celis, Juan Andrés	Diseño del módulo de comando y manejo de información de la carga útil del Satélite Quetzal	2013	<p>Efectos que causa el ambiente espacial en los FPGAs. Propone un prototipo de arquitectura tolerante a fallas que en tierra será capaz de desarrollar las tareas y cumplir con los requerimientos impuestos por la carga útil.</p> <p>Se propone una metodología para analizar el desempeño de las técnicas de tolerancia a fallas aplicadas en el diseño por medio de software con aplicaciones probabilísticas.</p>	Licenciatura	Rosa Nieves, Saúl de la,
Buenrostro Dominguez, Lucero Monserrat	Fuente de energía eléctrica para un satélite pequeño	2013	<p>Se presenta el diseño y construcción de un subsistema eléctrico de potencia, que tiene como propósito proveer la energía necesaria para el correcto funcionamiento de un satélite pequeño en órbita terrestre baja. El sistema completo está formado por cuatro módulos: generación de energía, almacenamiento, regulación y distribución.</p>	Maestría	Prado Molina, Jorge, asesor.

Tabla 2-10 Recopilación de Tesis. Parte IX

Autor	Tesis	Año	Resumen	Tesis	Asesor
Ramírez Cruz, Ernesto	Aplicación de software en el análisis y diseño de sistemas de comunicación por satélite	2013	<p>Establecer un marco teórico sobre los sistemas de comunicación por satélite, en el cual se presenten aspectos históricos, regulatorios y exposición de los elementos involucrados. Así como la explicación de los diversos fenómenos de propagación atmosféricos, las consideraciones de ruido e interferencias.</p> <p>Presentar la formulación matemática a través del o que se conoce como cálculo de enlaces o presupuesto de potencia enfocado al estudio de este campo, en donde se definan las relaciones consideradas para la evaluación del rendimiento tanto individual (ascendente o descendente) y de manera conjunta.</p> <p>Haciendo uso de software específico para la experimentación en este medio, generar una serie de proyectos consistentes en simulaciones sobre diversos aspectos y exponiendo los principales parámetros técnicos a través de reportes gráficos y con datos estadísticos, entendiendo cual es su importancia en el desempeño final.</p> <p>Exponer una serie de comentarios sobre posibles mejoras que permitan perfeccionar el análisis y diseño de la parte de comunicaciones, adecuándose a las necesidades específicas de una situación particular que no sea considerada.</p>	Maestría	Landeros Ayala, Salvador
Zamora Torres, Antonio Francisco	Análisis estructural de un microsátélite	2013	Recomendar una configuración para el tipo de misión respecto a la respuesta térmica y de vibraciones de las diferentes configuraciones.	Maestría	Santillán Gutiérrez, Saúl Daniel Ramírez Aguilar, José Alberto,

Tabla 2-11 Recopilación de Tesis. Parte X

Autor	Tesis	Año	Resumen	Tesis	Asesor
Otero Montaudon, José Luis	Diseño conceptual del sistema de regulación térmica para un microsatélite	2013	El objetivo de este trabajo es realizar un análisis del comportamiento térmico del satélite QUETZAL, además de diseñar una primera propuesta de elementos de control térmico que garanticen el funcionamiento óptimo del satélite al mantener todos los subsistemas dentro del rango de temperatura operacional correspondiente.	Licenciatura	Santillán Gutiérrez, Saúl Daniel Ferrer Pérez, Jorge Alfredo,
Sánchez Navarrete, Miguel Ángel	Análisis mecánico de la estructura conceptual de un sistema de separación para microsatélites	2013	Realizar el análisis mecánico basado en las exigencias de los probables vehículos lanzadores (vibraciones sinusoidales, vibraciones aleatorias y aceleraciones), a la estructura del sistema de separación seleccionado, compatible con el microsatélite Quetzal.	Licenciatura	Ramírez Aguilar, José Alberto
Reyes Morales, Rigoberto	Sistema de orientación y estabilización para un satélite pequeño de percepción remota	2012	Generar una propuesta para un sistema de orientación y estabilización para un satélite pequeño de percepción remota en órbita baja y realizar simulación de su funcionamiento mediante software matemático.	Licenciatura	Santillán Gutiérrez, Saúl Daniel Prado Molina, Jorge
Rodríguez Álvarez, Karina Guadalupe	Imágenes de satélite : importancia y aplicaciones	2012	Esta investigación se realiza con el objetivo de dar a conocer a la comunidad geográfica y al público en general la importancia y utilidad que tiene para nuestro campo el uso y la aplicación de las imágenes de satélite, para la realización de muy diversas actividades representativas de la Geografía en México	Licenciatura	Morales, Jaime
Méndez Astudillo, Manuel	Diseño y construcción de un prototipo del sistema de potencia para propulsores eléctricos en micro satélites	2012	Diseñar y construir un prototipo cuya finalidad sea alimentar un propulsor coloidal para un microsatélite. Se usará el prototipo para obtener resultados experimentales del desempeño de dicho propulsor.	Licenciatura	Ramírez Aguilar, José Alberto

■ Metodologías de estudio

3.1. Análisis y Diseño de Misiones Espaciales (Space Mission Analysis and Design)

Análisis y Diseño de Misiones Espaciales (Space Mission Analysis and Design SMAD) (Larson & Wertz, 2005), es una guía escrita por la comunidad astronáutica de los Estados Unidos Americanos (EUA) principalmente, resultado del esfuerzo combinado entre el gobierno, la industria y la sociedad académica. El objetivo de este libro es el de proveer una referencia en el diseño de misiones espaciales desde el primer paso en el proceso de diseño. Se sugiere utilizar el libro SMAD como libro de texto en cursos avanzados de licenciatura, también se recomienda el uso de este texto como referencia para la comunidad involucrada en el área de tecnología espacial.

El libro se divide en 23 capítulos y 6 apéndices. Dentro de estos capítulos se encontrarán todos los temas a evaluar para el diseño y análisis de la misión espacial. El libro ha sido escrito para ser leído de manera secuencial, lo cual es altamente recomendado, pero también sugiere capítulos específicos de acuerdo con los intereses del lector:

- Análisis y diseño de la misión: capítulos 1 a 9 y 19 a 23.
- Diseño de la nave espacial y subsistemas: capítulos 1, 2, 4, 8 a 13 y 16 a 23.
- Definición de requerimientos, logística y cómo poner el sistema espacial en su lugar: capítulos 1 a 4, 7, 9, 10 y 18 a 23.
- Diseño de constelaciones y sistemas multi-satelitales: capítulos 1 a 9, 13 a 16 y 19 a 23.
- Misiones de reducción de costo y diseño de misiones de bajo costo: capítulos 1 a 3, 7 a 10, 12 y 20 a 23.

A continuación, se desarrollará una descripción de los temas que se encuentran en el SMAD, haciendo particular énfasis en los puntos más importantes del libro.

El SMAD está dividido en cuatro fases, cada una de estas fases contiene una serie de pasos que deben de ser cumplidos. Las fases con sus pasos son las siguientes:

1. Definición de Objetivos.

Paso 1. Definir objetivos y limitaciones.

Paso 2. Estimación cuantitativa de las necesidades y requerimientos de la misión.

2. Caracterización de la Misión.

Paso 3. Definición de conceptos alternativos de la misión.

Paso 4. Definición de arquitecturas alternativas de la misión.

Paso 5. Identificación de sistemas estratégicos de cada arquitectura.

Paso 6. Caracterización de conceptos y arquitecturas de la misión.

3. Evaluación de la Misión.

Paso 7. Identificación de requerimientos críticos.

Paso 8. Evaluación de la utilidad de la misión.

Paso 9. Definición del concepto de la misión (punto de referencia).

4. Definición de Requerimientos.

Paso 10. Definición de requerimientos del sistema.

Paso 11. Asignación de requerimientos a los elementos del sistema.

El libro resalta el hecho de que este es un proceso iterativo, por lo tanto, deberá ser repetido cuantas veces sea necesario. Para poder ejemplificar el proceso descrito en el SMAD, el texto presenta el caso de estudio llamado “FireSat Mission” y será desarrollado a través de los capítulos del libro. FireSat Mission será un sistema para EUA cuyo objetivo será la identificación y monitoreo de los fuegos forestales; el sistema también coleccionará información estadística sobre los brotes de fuego, propagación, velocidad y duración de los mismos.

3.1.1. Ciclo de vida de la misión espacial

Sin importar quien desarrolla las misiones espaciales, el cliente, usuario u operador de la misión, todas las misiones espaciales tienen un ciclo de vida común. Éste ciclo abarca desde la conceptualización de la idea de la misión, hasta el abandono de la órbita del satélite al final de la vida de la misión, pasando por todas las etapas comprendidas entre estos dos momentos. Es posible identificar cuatro etapas en la vida de la misión espacial:

1. **Exploración de Concepto.** Comienza con un análisis de las necesidades de la misión, con esta lista de necesidades se generan los requerimientos potenciales basados en los objetivos de la misión. La etapa de desarrollo de concepto comienza una vez que los requerimientos potenciales han sido establecidos y revisados. Conceptos alternativos de misión serán definidos y posteriormente evaluados. Una vez que un concepto pase la validación de requerimientos, esta primera etapa habrá terminado.

2. **Desarrollo Detallado.** Esta es la etapa de diseño donde las definiciones finales de los sistemas serán establecidas y donde se realizarán las pruebas necesarias de los sistemas.

3. **Producción y Desarrollo.** La etapa abarca desde la construcción de los segmentos terrestre y espacial hasta el primer lanzamiento

4. **Operación y Soporte.** Involucra las operaciones diarias, mantenimiento y soporte de la misión hasta la muerte del activo espacial y el abandono de su órbita.

Dependiendo de cuál sea la agencia espacial, organización internacional, o patrocinador responsable del proyecto espacial, el ciclo de vida de la misión espacial será llamado de diferentes maneras, sin embargo, en todos los casos es posible identificar las cuatro etapas principales descritas anteriormente. La Figura 3-1 muestra las etapas de desarrollo de proyectos espaciales en diferentes agencias: Agencia Espacial Europea (European Space Agency, ESA), Administración Aeronáutica y Espacial de la Nación (National Aeronautics and Space

Administration EUA, NASA) y Departamento de la Defensa (Department of Defense EUA, DoD).

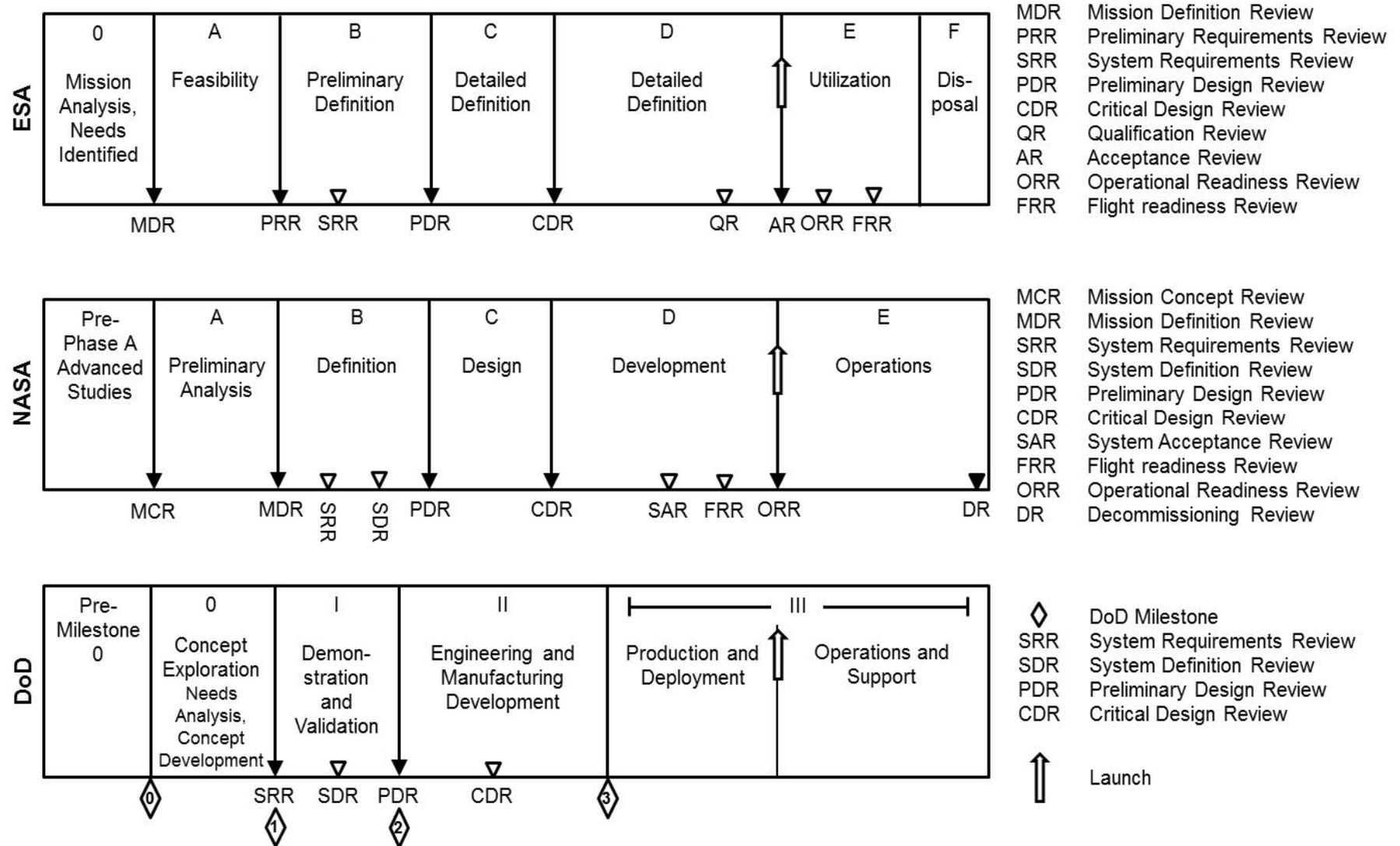


Figura 3-1 Etapas de Desarrollo Programas Espaciales

3.1.2. Proceso Análisis y Diseño de Misiones Espaciales (SMAD)

En el primer capítulo se da al lector una breve descripción de cada uno de los pasos que el proceso SMADI presenta. Sin embargo, en los capítulos 1, 2, 3 y 4 los pasos del 1 al 11 son detallados individualmente.

Un breve resumen de los pasos que conforman el proceso SMAD se presenta a continuación:

Definición de objetivos es la primera etapa y cubre los dos primeros pasos de la metodología. En el primer paso es: **Definición de objetivos y limitaciones de la misión**, teniendo como base la declaración de la misión (mission statement) se establecerán los objetivos generales para cumplir con la misión. Estos objetivos son cualitativos.

Existen muchos objetivos en una misión espacial. El objetivo primario es el propósito de la misión. La pregunta que nos hace encontrar el objetivo primario de la misión es: ¿Cuál es el principal objetivo de la misión?

Los objetivos secundarios son la respuesta a la pregunta: ¿Qué otras funciones sería bueno alcanzar con esta misión? Estos objetivos pueden ser alcanzados por el equipamiento establecido. Las misiones tienen agendas ocultas y objetivos que no son de origen técnico (políticos, sociales o culturales) y estos objetivos deben ser considerados como objetivos secundarios. Un objetivo común oculto en las misiones espaciales es mostrar al mundo la capacidad de un país de desarrollar proyectos de alta tecnología.

Objetivos adicionales pueden requerir equipamiento adicional, estos objetivos son encontrados dando respuesta a la siguiente pregunta: ¿Qué más podría ser logrado en esta misión, requiriendo pocas consideraciones adicionales?

Otra pregunta que debe ser respondida en este paso es: ¿Qué característica fundamental del espacio hace que esta misión espacial sea deseable? El espíritu de detrás de esta pregunta es evaluar las ventajas de realizar esta misión en el espacio y si el costo de la misión espacial está justificado. Las características comúnmente más utilizadas por las misiones espaciales son: la

perspectiva global, estar por encima de la atmósfera, el ambiente libre de gravedad, la abundancia de recursos y la exploración del espacio.

Segundo paso: **Estimación cuantitativa de las necesidades y requerimientos de la misión**, requiere la cuantificación de qué tanto o que tan bien los objetivos de la misión tienen que ser cumplidos, dependiendo de las necesidades de la misión, tecnologías disponibles y las limitaciones de costo. Esta cuantificación es una primera aproximación por lo que se entiende que no será la final, y que se espera que sea mejorada a través del proceso de diseño.

El objetivo principal de este segundo paso es transformar los objetivos ya definidos en el primer paso en requerimientos y limitaciones numéricas. Tres tipos de requerimientos son definidos para ir convertir los objetivos:

- **Requerimientos Funcionales:** Cuantificando que tan bien el sistema debe desempeñarse para alcanzar los objetivos de la misión.
- **Requerimientos Operacionales:** Cuantificando como debe operar el sistema y como deberá ser la interacción con el usuario.
- **Limitaciones:** Cuantificando los límites del proyecto en temas de costo, tiempo/agenda y tecnologías que serán aplicadas.

Para establecer el nivel superior de requerimientos es necesario iterar varias veces tomando en cuenta las necesidades de la misión, su complejidad y el costo que implica. Una buena primera aproximación es una evaluación de los objetivos de la misión y la factibilidad de alcanzarlos. Los requerimientos establecidos en este paso no solo deben conseguir los objetivos primarios y secundarios, si no que a su vez deben de conseguir los objetivos políticos y económicos, así como también las agendas ocultas de la misión. Un ejemplo de esto es el objetivo de la misión: Desarrollar la tecnología de un país otro podría ser: Desarrollar nuevos componentes localmente.

Generalmente, los objetivos definidos en el primer paso pueden ser modificados un poco durante la exploración de concepto, y los requerimientos definidos en el paso dos son normalmente se negocian durante todo el proceso. El proceso iterativo en el establecimiento de requerimientos es importante debido a que estos cambios conducirán a un diseño optimizado de la misión.

Una vez que el segundo paso concluye con los requerimientos y limitaciones de la misión, la fase de **caracterización de la misión** comienza. En esta fase la selección y definición de la misión espacial principia. Evaluando todas las combinaciones posibles entre sistemas lanzadores, órbitas, satélites o naves espaciales y conceptos de misión se determinan cuales combinaciones pueden resultar exitosas para caracterizar la misión.

El tercer paso: **Definición de conceptos alternativos de la misión** define y caracteriza misiones espaciales que cumplirían con los objetivos. El desarrollo de conceptos alternativos o funciones alternativas son elaborados.

El concepto de misión¹ es una declaración de cómo funcionará la misión. Para la definición del concepto de la misión se proponen cuatro elementos principales:

- Distribución y transmisión de datos,
- Arquitectura de las comunicaciones,
- Asignación de tareas y
- Programación y cronograma de la misión.

Definir un concepto de misión consiste en la definición de varias opciones de los cuatro elementos principales, dichas opciones podrían cumplir con los requerimientos de la misión.

La transmisión de datos se refiere a dos diferentes tipos de datos: datos científicos de la misión y datos de operación del sistema. Los datos generados, transmitidos o recibidos por la carga útil son los datos científicos de la misión. Los datos de operación del sistema es la

¹Concepto de misión: Declaración general de como funcionará la misión en la práctica.

información para mantener la misión misma: la órbita y posición de la nave espacial o satélite, las temperaturas y las condiciones de los sistemas. Las operaciones clave en la transmisión de datos son:

- Espacio vs. Tierra: ¿Cuánta y cuál información será procesada a bordo? ¿Cuánta y cuál información será procesada en las instalaciones terrestres y por los usuarios?
- Procesamiento central vs distribuido: ¿Cómo será comunicada la información? ¿El procesamiento será utilizando otras computadoras dentro de la nave espacial/satélite o todos los datos deberán de ser procesados en Tierra?
- Nivel de autonomía: ¿Cuánta gente intervendrá en la gestión y distribución de datos?

Las tareas por realizar, programación y control se refiere a cómo decidir qué información será suministrada, a quién enviarla y de qué recursos obtenerla.

El cronograma de la misión es la programación de la misión, desde la definición de concepto hasta el final del ciclo de vida, atravesando la etapa de producción, operaciones y reabastecimiento. Las principales etapas cubiertas en el cronograma de la misión son:

- Planeación y desarrollo,
- Producción,
- Lanzamiento inicial,
- Desarrollo de constelación,
- Operaciones normales de la misión,
- Reabastecimiento y/o reposicionamiento, y
- Fin de la vida y deshecho y/o recuperación.

Definición de arquitecturas² alternativas de la misión es el cuarto paso. Combinaciones alternativas de elementos de la misión o arquitecturas de la misión son definidas. La arquitectura de la misión espacial es un conjunto de elementos o componentes que dan forma

² Arquitectura de la misión: Es el concepto de la misión más una definición de cada uno de los elementos principales de la misión.

al arreglo de la misión espacial. Estos elementos incluyen elementos básicos comunes en todas las misiones espaciales:

- Sujeto de estudio,
- Carga útil,
- Plataforma o bus,
- Sistema de lanzamiento,
- Órbita y constelación,
- Sistema terrestre,
- Operaciones de la misión³ y
- Arquitectura del comando, control y las comunicaciones.

Aunque la arquitectura de la misión cubre los ocho elementos mencionados anteriormente, es posible definir la arquitectura de la misión especificando el sujeto de estudio, órbita, arquitectura de las comunicaciones y el sistema terrestre. Estos elementos son los que dan marco a otros componentes.

Para identificar arquitecturas de la misión alternativas los siguientes 5 pasos son propuestos:

- Paso A. Identificar los elementos de la misión que permitirían varias opciones: Analizar los ocho elementos de la misión y determinar cuales tienen más de una opción.
- Paso B. Identificar las opciones principales para cada uno de los elementos que pueden tener más de una opción: Evaluar cada uno de estos elementos y establecer una serie de opciones que cumplan con la función a realizar.
- Paso C. Construir un árbol con las posibles opciones viables: Una lista de las combinaciones posibles de la misión es creada.
- Paso D. Podar el árbol que contiene las posibles combinaciones, eliminando combinaciones no realistas. Sólo las combinaciones posibles se mantendrán.

³Operaciones de la misión: Declaración que brinda los detalles de cómo el personal operará y controlará la misión.

- Paso E. Buscar nuevas alternativas que pudieran influenciar substancialmente como hacer la misión. Nuevas alternativas que no hayan sido mencionadas antes y que pudieran innovar o mejorar la misión (costo, desempeño, simplicidad) son propuestas.

El quinto paso: **Identificar los sistemas estratégicos de cada arquitectura.** Define los parámetros principales que influenciarán el costo, desempeño, riesgo o cronograma para cada uno de los conceptos alternativos de misión, estos sistemas son conocidos como los sistemas estratégicos. Los sistemas estratégicos son los parámetros clave, o los componentes que tendrán una mayor repercusión en el costo total, desempeño o diseño de detalle de componentes. Posibles sistemas estratégicos son: número de satélites a utilizar, altitud, energía requerida, peso, tamaño, velocidad de transmisión de datos, comunicación, apuntamiento, cronograma y operaciones.

Es necesario identificar los principales puntos estratégicos para cada una de las áreas de interés: costo, desempeño, riesgo y programación. El libro recomienda los siguientes 5 pasos para identificarlos:

1. Identificar las áreas de interés,
2. Identificar cuáles son los parámetros que miden las áreas de interés,
3. Desarrollar algoritmos de primer orden,
4. Examinar los factores,
5. Buscar posibles puntos estratégicos ocultos.

La idea principal de estos pasos es identificar cuales parámetros miden la efectividad y desempeño de las áreas de interés. Una vez que estos parámetros de medición son identificados, se procede al desarrollo de algoritmos que muestren una regla de correspondencia entre los elementos, componentes o parámetros clave de la misión y los parámetros de medición. Estos algoritmos mostrarán la influencia de estos factores sobre la efectividad o desempeño de las

áreas de interés. Los factores que muestren las correspondencias más fuertes en los parámetros de medición serán definidos como los sistemas estratégicos.

Este paso no es una tarea sencilla, algunos factores podrían mostrar correlaciones ocultas implícitas entre otros factores.

Durante el sexto paso: **Caracterización de conceptos y arquitecturas de la misión** será definido que es el sistema y que hace el sistema. La energía, peso y presupuesto disponibles para ellos serán determinados. En este paso se decidirá qué información será procesada en el espacio y qué información en Tierra.

El objetivo de este paso es definir los conceptos de la misión con el detalle suficiente para permitir evaluaciones de eficiencia significativa. El proceso de caracterización de conceptos puede realizarse siguiendo los siguientes 10 pasos en orden secuencial:

- Paso A: Definición preliminar del concepto de la misión.
- Paso B: Definición de las características del sujeto.
- Paso C: Determinar la órbita o las características de la constelación
- Paso D: Determinar el tamaño de la carga útil y su desempeño.
- Paso E: Selección del enfoque de las operaciones de la misión:
 - Arquitectura de las comunicaciones,
 - Operaciones y
 - Sistema terrestre.
- Paso F: Diseño de la plataforma o bus de la nave espacial o satélite para cumplir con los requerimientos de la carga útil, órbita y comunicaciones.
 - Paso G: Selección del lanzador y órbita de transferencia del sistema.
 - Paso H: Determine el despliegue, logística y estrategias al final del ciclo de vida.
 - Paso I: Proporcionar soporte de costos.

- Paso J: Documentación e iteración.

Con el sexto paso se finaliza la fase de caracterización de la misión, a partir de este punto comienza la fase de **evaluación de la misión**. Esta tercera fase evaluará la capacidad de alcanzar los objetivos fundamentales de la misión de los conceptos de la misión y arquitecturas definidas anteriormente. Esta fase conducirá a la identificación de los requerimientos clave, la cuantificación del desempeño de la misión y finalmente la selección de uno o más conceptos de la misión espacial. Esta fase incluso puede conducir a tomar la decisión de que el cumplimiento de la misión no es posible debido a las limitaciones.

La fase de evaluación de la misión comienza con el séptimo paso en el proceso del SMAD: **Identificación de requerimientos críticos**. Los requerimientos críticos son los requerimientos clave que tienen mayor influencia en el costo y complejidad del sistema. Los requerimientos críticos más comunes son:

- Cobertura o tiempo de respuesta; estos requerimientos críticos normalmente afectan: número de satélites, altitud, inclinación, comunicaciones, arquitecturas, campo de visión de la carga útil, cronograma y requerimientos de personal.
- Resolución, influenciando: tamaño del instrumento, altitud y control de posición.
- Sensibilidad, afectando: control de posición, complejidad; control y procesamiento térmico; altitud.
- Exactitud de mapeo (Mapping), afectando: control de posición, órbita, conocimiento de altitud, alineación mecánica, precisión de la carga útil y procesamiento.
- Transmisión de potencia que influencia: tamaño de la carga útil y potencia, altitud.
- Tiempo de vida en órbita, afectando: redundancia, peso, presupuesto de potencia y propulsión, selección de componentes.

- Supervivencia influenciando: altitud, peso, potencia, selección de componentes, diseño del sistema espacial y terrestre, número de satélites, número de estaciones terrestres, arquitectura de comunicación.

El proceso SMAD en esta etapa señala una serie de cuatro pasos consecutivos, los cuales ayudarán en la identificación de los requerimientos críticos.

1. Observe los principales requerimientos de desempeño. Usualmente los requerimientos principales de desempeños son requerimientos críticos. Para encontrar más fácilmente los requerimientos críticos se debe formular la siguiente pregunta: ¿Qué tan bien el sistema tiene que alcanzar los requerimientos principales de desempeño?

2. Examine los requerimientos críticos más comunes e identifique cuáles de éstos impactan en mayor medida el diseño del sistema, el desempeño o costo.

3. Observe los requerimientos de nivel superior. Evalúe los requerimientos de nivel superior establecidos en el primer paso del procedimiento SMAD y determine que tan bien dichos requerimientos deben de ser alcanzados.

4. Observe requerimientos ocultos. Requerimientos ocultos de la misión, por ejemplo: el uso específico de cierta tecnología o sistemas, podrían implicar requerimientos críticos también.

Entender las relaciones entre los requerimientos críticos y los parámetros estratégicos de los sistemas es una de las tareas principales en este paso.

La diferencia entre los sistemas estratégicos y los requerimientos críticos son:

- Los sistemas estratégicos son los parámetros definitorios de la misión que más afectan el costo, desempeño y riesgo: tamaño, peso en órbita, potencia, velocidad de transmisión de datos, comunicaciones, apuntamiento, número de naves espaciales y/o satélites, altitud, cobertura, cronograma, operaciones, entre otras.

- Los requerimientos críticos son objetivos de la misión (necesidades de la misión cuantificadas en el paso 2) que más influyen el costo y la complejidad del sistema: cobertura

o tiempo de respuesta, resolución, sensibilidad, exactitud de mapeo (mapping), transmisión de potencia, tiempo de vida en órbita, supervivencia, entre otras.

El análisis de la misión es el proceso que cuantifica los parámetros del sistema y su rendimiento resultante. El proceso de análisis de la misión es donde los requerimientos de la misión son definidos y redefinidos para poder cumplir con los objetivos de la misión a un mínimo costo y riesgo.

La documentación de los resultados y razones es una tarea clave en este proceso. La documentación será la memoria del proyecto. Es importante no sólo resaltar las razones técnicas que llevaron a tomar una decisión, es igualmente importante la documentación de las razones políticas, económicas y de cualquier otra índole. Si no existe una razón particular, es importante documentar que la elección hecha no tiene una base, o que fue tomada por qué ser un buen punto de inicio para comenzar el diseño.

El proceso de análisis de la misión captura las relaciones funcionales entre los parámetros y las alternativas de misión y su rendimiento, efectividad, costo y riesgo. En este proceso determinar el efecto de un parámetro sobre los demás parámetros siempre será deseable. Para poder desarrollar este análisis se deben de considerar todas las alternativas posibles con la finalidad de entender como el sistema responde a las principales variaciones de las características de diseño.

Para obtener un nivel de detalle en los resultados del análisis acorde a la etapa del análisis de la misión actual, es necesario delimitar el alcance de los análisis. En otras palabras: utilizar la profundidad y detalle requeridos en el análisis para evaluar la misión: si el análisis es complicado puede obstruir futuros cambios, si el análisis es complejo requerirá mucho tiempo y recursos y ambas opciones nos conducirán a resultados sobre-detallados no requeridos en esta etapa, o análisis son demasiado simples que no concluirán con suficiente información para tomar una decisión.

Dos métodos para limitar la profundidad del análisis en cualquier área son propuestos:

1. Identificar los sistemas estratégicos en cada área. Concentrar la mayor parte del análisis de la misión en estos sistemas.
2. Identifique el objetivo del estudio del sistema y brinde un nivel apropiado para ese objetivo.

A medida que avanza la actividad de análisis de la misión, los estudios adquieren un nivel cada vez mayor de complejidad y detalle. Esto se conoce como jerarquía de análisis de la misión.

Para clasificar el nivel de complejidad, la metodología SMAD divide en dos bloques seis análisis. El primer bloque muestra un análisis rápido con detalles limitados, no tiene la intención de brindar resultados definitivos. El segundo bloque pretende ser más complejo y su intención es seleccionar una alternativa que proporcione el mejor rendimiento del sistema.

Los seis tipos de análisis abarcados en los dos bloques son:

1. Rápido, detalle limitado:

1. Evaluación de factibilidad, establece si un objetivo es alcanzable y su nivel aproximado de complejidad.
2. Estimación de tamaño, evaluar parámetros básicos como tamaño, peso, potencia o costo.
3. Punto de diseño, demuestra la factibilidad y establece la base para la comparación de alternativas.

2. Más detalle, comparaciones/evaluaciones complejas (Complex trades):

4. Estudio comparativo, establece las ventajas relativas de las alternativas u opciones.
5. Evaluación de rendimiento, cuantifica los parámetros del rendimiento (ejemplo: resolución, oportunidad) para un enfoque particular.
6. Evaluación de utilidad, cuantifica que tan bien el sistema puede cumplir los objetivos generales de la misión

La evaluación de factibilidad es el proceso más simple en la jerarquía del análisis de la misión, Se utiliza para establecer si un objetivo particular es alcanzable y establecer límites amplios en su nivel de complejidad. Las evaluaciones de factibilidad pueden ser realizadas haciendo comparaciones con los sistemas existentes, extrapolando de experiencias pasadas y analizando un diseño de sistema general, no tan detallado, de cómo la misión podría ser lograda.

El objetivo del análisis de estimación de tamaño es proporcionar un estimado de los parámetros básicos de la misión como: tamaño, peso, potencia o costo. Este análisis puede ser realizado al mismo tiempo que los análisis de factibilidad, por analogía con los sistemas existentes y escalando los parámetros de misiones o cargas útiles existentes.

El punto de diseño es un diseño completo del sistema capaz de alcanzar los objetivos de la misión. Este diseño no ha sido optimizado para maximizar el rendimiento ni minimizar peso, costo o riesgo. El punto de diseño demuestra que la misión es factible y puede usarse como base en la comparación de alternativas.

Los estudios comparativos consisten en analizar y seleccionar los sistemas estratégicos que determinan el rendimiento de la misión. El proceso de comparación de sistemas evalúa diferentes conceptos para establecer su viabilidad y su impacto en el rendimiento y costo. Comparaciones de sistemas claves son aquellas que definen como funciona el sistema y determinan el tamaño, costo y riesgo, normalmente estas comparaciones estarán en una de las áreas principales: requisitos críticos, concepto de la misión, objeto de estudio, tipo y complejidad de la carga útil y de órbita. El objetivo en este análisis es definir el efecto de las comparaciones y combinaciones en los parámetros.

Las evaluaciones de rendimiento cuantifican las demandas de rendimiento. Para calcular el rendimiento del sistema tres técnicas son utilizadas:

- Algoritmos del sistema: formulas físicas o geométricas básicas asociadas con un proceso particular del sistema. Muestra como el rendimiento varía en función de los parámetros clave.

Algoritmos típicos del sistema son: presupuesto de enlace (comunicaciones y velocidad de transmisión de datos), óptica de difracción limitada (tamaño de diafragma para óptica o antenas, determinando la resolución), sensibilidad de la carga útil (tamaño de la carga útil y estimaciones de rendimiento), ecuación de radar (tamaño del radar y estimaciones de rendimiento), tasas de búsqueda del área de cobertura terrestre (evaluación de cobertura, tamaño del sistema; estimaciones de rendimiento) y mapeo y presupuesto de apunte (geolocalización; instrumento y antena de apuntamiento; detección de imágenes).

- Analogía con sistemas existentes: comparación del diseño de estudio con los sistemas existentes.

- Simulación: Aplicable a los parámetros clave de rendimiento.

En el octavo paso: “**Evaluación de la utilidad de la misión**” será cuantificado que tan bien se cumplen los requerimientos y objetivos en función del costo o las opciones de diseño del sistema clave. La intención en este paso es entregar una tabla de rendimiento potencial contra costo. La evaluación de la utilidad de la misión cuantifica el rendimiento de la misión como función del diseño, costo, riesgo y cronograma.

Los objetivos del análisis de la misión son dos: cuantificar el rendimiento del sistema y cuantificar la capacidad del sistema para alcanzar los objetivos de la misión. Para expresar estos dos objetivos, dos diferentes tipos de cantidades son requeridas en este análisis:

- Parámetros de rendimiento que cuantifican que tan bien el sistema trabaja (Estadísticas, eficiencia de potencia y resolución de un instrumento en particular)
- Mediciones de efectividad o figuras de mérito que cuantifican que tan bien el sistema cumple con los objetivos de la misión. El objetivo es estimar medidas de efectividad como función de un parámetro clave.

El noveno paso: “**Definición del concepto de la misión (punto de referencia o base)**” comienza una vez que todas las alternativas de diseño han sido evaluadas. En este paso uno o

más diseños de referencia o base son seleccionados. El diseño de referencia o diseño base es el diseño que cumple con la mayoría de los objetivos de la misión. También es posible concretar una definición de sistema consistente, este es un conjunto de valores para todos los parámetros del sistema comunes para más de un sistema alternativo. El propósito del diseño de referencia es tener una meta temporal contra la cual medir el progreso. Un diseño de referencia es el punto inicial en el proceso iterativo de comparación, el cual conducirá a la definición del diseño final.

La etapa final: **definición de requerimientos** comenzará con el paso diez. El décimo paso: **“Definición de requerimientos del sistema”**, establece que todos los objetivos y limitaciones de la misión deberán ser transformados en requerimientos del sistema.

Un punto que destacar en este paso es la creación de equipos integrados del producto para comenzar el desarrollo de los requerimientos operacionales de la misión; estos equipos involucran usuarios/clientes y desarrolladores, cada uno de estos elementos tienen diferentes preocupaciones y la cooperación entre ambas partes del equipo en la definición de los requerimientos de la misión dará lugar a una definición de requerimientos completa y negociables.

La herramienta propuesta para desarrollar los requerimientos desde las necesidades del cliente y/o usuario es el despliegue de la función de calidad (Quality Function Deployment QFD). Esta herramienta utiliza una serie de matrices que conectan las necesidades del cliente con los atributos técnicos o requerimientos. En otras palabras, los que estamos tratando de lograr “¿Qué?”, y como lo alcanzaremos “¿Cómo?”. En estas matrices, las ponderaciones de los “¿Qué?” se aplican para priorizar las necesidades y sus atributos técnicos “¿Cómo?”.

En el onceavo paso es el paso final de la metodología: **“Asignación de requerimientos a los elementos del sistema”**. La asignación de requerimientos numéricos a los componentes de la misión deberá ser realizada. Los requerimientos del sistema establecidos en el paso número diez tienen que desglosarse en niveles inferiores de diseño.

Para el desarrollo de los requerimientos de referencia o base, el onceavo paso describe las actividades principales: establecer los requerimientos funcionales para el sistema y proporcionar la descomposición o desglose de los elementos, establecer el flujo funcional para realización de las funciones, traducir los atributos funcionales en características técnicas las cuales se convertirán en requisitos para el sistema físico, establecer requerimientos cuantificables, describir las interfaces y las relaciones hardware/software/datos a través del uso de diagramas de bloques; Estas actividades se basan en la arquitectura de referencia establecida en el noveno paso, se procede a descomponer los requerimientos funcionales y conjuntos de características en niveles inferiores para finalmente iterar en todas las actividades involucradas en la fase de definición de requerimientos

3.1.3. Conceptos, información de subsistemas y análisis de la misión

Una vez que las fases y pasos del SMAD han sido descritos en el primer capítulo, la bibliografía brinda información técnica detallada sobre los conceptos requeridos para la planeación de misiones espaciales.

El análisis del vuelo espacial requiere saber la posición y el movimiento de los objetos, por consecuencia la intención del quinto capítulo es explicar e introducir al lector en la geometría de la misión espacial. Los temas principales abordados en esta sección son: introducción a los sistemas coordenados enfocados en el uso de la esfera celeste para representar direcciones en el espacio, determinar la geometría relativa de los objetos en la superficie de la Tierra, vista desde la nave espacial o satélite, el movimiento aparente de los satélites desde el punto de vista del observador en la Tierra y el desarrollo del presupuesto o estimación del mapeo y apuntamiento.

El sexto capítulo muestra una introducción a la astrodinámica, comienza con una descripción de las órbitas Keplerianas cubriendo las tres leyes Kepler sobre el movimiento planetario, las ecuaciones de movimiento del satélite, los elementos clásicos de las órbitas: eje semi-mayor,

excentricidad, inclinación, ascensión recta del nodo ascendente, argumento del perigeo y anomalía verdadera, trayectoria terrestre, tiempo de vuelo en una órbita elíptica y la determinación de la órbita. Más adelante el capítulo seis las perturbaciones de órbita son descritas abarcando perturbaciones de los tres cuerpos, perturbaciones debidas a la no esfericidad o asimetría de la Tierra, perturbaciones debidas a la fricción atmosférica y radiación solar. En este capítulo también se presentan las maniobras de la órbita, ventana de lanzamiento y el mantenimiento de la órbita.

Seleccionar o diseñar órbitas para cumplir con mayor cantidad de requisitos de la misión al menor costo posible, es un objetivo en el proceso de análisis y diseño de la misión espacial; el explicar cómo alcanzar este objetivo es el propósito del capítulo siete. En esta sección, el proceso de diseño de órbita es descrito en conjunto con los diferentes tipos de órbita: órbita de aparcamiento o estacionamiento, órbita de transferencia, órbita referenciada en el espacio y órbita referenciada en la Tierra.

El tema de cobertura terrestre se desarrolla en el capítulo siete, se refiere a la parte de la Tierra que el instrumento puede ver en un instante o durante un periodo de tiempo prolongado; las aproximaciones analíticas y simulaciones numéricas son utilizadas para proveer una evaluación rápida y sencilla de la cobertura terrestre, los resultados obtenidos evaluarán la calidad de la cobertura.

Para evaluar las diferentes órbitas que son requeridas en la vida del satélite, el concepto de ΔV (delta-v) es introducido para la evaluación de costo en cada uno de los escenarios de las órbitas de la misión. La estimación de ΔV es la suma de los cambios de velocidad requeridas a través de la vida de la misión espacial, una medida escalar para la cantidad de esfuerzo requerido para llevar a cabo las maniobras orbitales. El capítulo siete describe como seleccionar la órbita de la nave espacial o satélite referenciada en la Tierra: las órbitas más comunes son: Geo-síncrona, síncrona al sol, Molniya, órbitas congeladas u órbitas de repetición de trayectoria

terrestre. El capítulo también describe como seleccionar las órbitas de transferencia, aparcamiento o estacionamiento y órbita referenciada en el espacio. El diseño de constelaciones es también considerado dentro de este capítulo.

El ambiente espacial es un factor que debe estar siempre en la mente de los diseñadores de la misión espacial. El ambiente espacial influenciará el rendimiento y tiempo de vida de operación de los sistemas espaciales, es por lo que la bibliografía SMAD dedica el capítulo ocho a la descripción del ambiente espacial. Los temas principales por tratar en esta sección son: el ciclo solar, el campo gravitacional y micro-gravedad, la atmósfera superior, ionización o plasma, campo magnético, carga de la nave espacial, radiación y la degradación asociada a esta. El diseño del sistema que será colocado en el ambiente espacial debe tomar en cuenta todas las características mencionadas anteriormente, por lo tanto, en el capítulo ocho también se presentan los requerimientos de resistencia y capacidad de supervivencia para que el sistema realice sus funciones previstas después de haber estado expuesto a estas condiciones.

El noveno capítulo cubre el proceso de diseño y el dimensionamiento de la carga útil espacial. En la primera parte del capítulo el proceso de diseño y dimensionamiento de la carga útil espacial es descrito en diez pasos: 1. Seleccionar los objetivos de la carga útil, 2. Realizar comparaciones del sujeto, 3. Desarrollar el concepto de operaciones de la carga útil, 4. Determinar la capacidad requerida de la carga útil, 5. Identificar candidatos para carga útil, 6. Estimar las características de los candidatos de carga útil, 7. Evaluar los candidatos de carga útil y seleccionar un punto de referencia o punto base de partida, 8. Evaluar los costos del ciclo de vida y operabilidad, 9. Definir los requisitos derivados de la carga útil y 10. Documentar e iterar. Cada uno de los pasos del proceso de diseño y tamaño de la carga útil es descrito de manera individual a través del capítulo.

El capítulo nueve también contiene una sección de información general de la carga útil, donde se discuten temas importantes para su diseño, estos temas son: el espectro

electromagnético, la óptica básica del telescopio y la resolución limitada de la difracción. Debido a que el caso de estudio presentado en la bibliografía es un satélite de observación, se discuten temas como el diseño y dimensionamiento de la carga de observación, destacando el procesamiento de señal y la velocidad de transmisión de los datos. Cómo estimar el tamaño, peso y potencia es otro de los temas a discutir entre los diez pasos mencionados anteriormente en el proceso de diseño y dimensionamiento de la carga útil.

El capítulo diez se enfoca en el proceso de diseño y dimensionamiento de la nave espacial o satélite. Este proceso se resume en seis pasos: 1. Elaborar una lista de los requerimientos y restricciones del diseño, 2. Seleccionar el enfoque preliminar de diseño de la nave espacial o satélite y la configuración general, 3. Establecer los presupuestos o estimaciones para: el propulsor de la nave espacial o satélite, energía y peso, 4. Desarrollar el diseño preliminar del subsistema, 5. Desarrollar la configuración de la nave espacial o satélite de referencia, 6. Iterar, negociar y actualizar las restricciones de los requisitos y los presupuestos o estimaciones de diseño. Dentro de este capítulo se describen cada uno de estos pasos.

La nave espacial o satélite está formado por subsistemas; breves descripciones de estos subsistemas son presentadas en el capítulo, resaltando su influencia en el diseño y dimensionamiento de la nave espacial. Los subsistemas que definen una nave espacial o satélite son: propulsión, determinación y control de posición, comunicación, comando y manejo de datos, térmico, energía y estructura y mecanismos. La configuración de la nave espacial o satélite depende del diseño de estos subsistemas. El capítulo muestra algunos ejemplos de las estructuras más comunes, sus ventajas y sus usos.

Descripciones más extensas de los subsistemas de las naves espaciales o satélites son desarrolladas en el onceavo capítulo del SMAD. El propósito de esta sección es brindar información sobre el diseño del subsistema de bus o plataforma del satélite. Incluye aproximaciones de primer orden y descripciones del hardware, las cuales muestran cómo

trabajan los subsistemas y cómo estimar su tamaño, peso, energía, requerimientos y eventual costo.

Dentro del capítulo once se presentan siete subsistemas del satélite: 1. Determinación y control de posición, 2. Telemetría, rastreo y comando, 3. Comando y manejo de datos, 4. Energía, 5. Térmico, 6. Estructuras y mecanismos y 7. Orientación y navegación.

El capítulo se divide en secciones; cada una de las secciones cubre uno de los subsistemas comenzando con una descripción de que es el subsistema, lo que hace y cuáles son sus requerimientos, los diferentes tipos y clasificaciones dentro de los subsistemas, y algunos ejemplos de los diseños más comunes de los subsistemas. Después de una descripción introductoria del subsistema, el proceso de diseño se explica y algunas características y temas para el diseño del subsistema son cubiertas.

El capítulo doce se centra en la manufactura y prueba de la nave espacial o satélite. Este capítulo se divide en seis secciones, describiendo procesos generales de la manufactura, ensamble y prueba del satélite.

El proceso descrito en el capítulo comienza con la preparación de los datos de ingeniería, los cuales consisten en dibujos para cada componente, especificaciones de cada una de sus partes y procesos de manufactura, dibujos de ensamble y datos del equipo de prueba. Una vez que los datos de ingeniería han sido cubiertos, el paso de planeación de la manufactura comienza con una lista de adquisición y prueba de piezas, el ensamble de los componentes y las pruebas de aceptación de estos; el siguiente paso es calificar los componentes y comienza con una prueba funcional y exposición ambiental, terminando con la integración y prueba del satélite o nave espacial.

El capítulo resalta el tema de inspección y aseguramiento de la calidad, como establecer el programa de calificación, como se utiliza normalmente el flujo de prueba de calificación del satélite y las operaciones del sitio de lanzamiento con respecto a las actividades de prueba.

El capítulo trece cubre la disposición de los satélites y las estaciones terrestres en un sistema espacial y la red de enlaces de comunicación que transfieren información entre ambos; esto se conoce como la arquitectura de comunicación. La bibliografía describe la arquitectura de comunicaciones utilizando dos diferentes aproximaciones: cuando es definida por la geometría de las estaciones satélite-terrestre y cuando es definida por las funciones. El capítulo describe los criterios para seleccionar la arquitectura de comunicaciones.

Otros temas dentro de los capítulos son: velocidad de transmisión de datos, el diseño del enlace, como determinar las dimensiones de las cargas útiles de comunicaciones, entre otros temas espaciales como: enlaces ópticos, seguridad, técnicas de anti saturación de datos, técnicas de diversidad, cargas útiles con procesamiento a bordo y acceso múltiple, compartir enlaces de comunicaciones.

Las operaciones de la misión son cubiertas en el capítulo catorce; estas operaciones son realizadas por equipos de operaciones durante la fase de vuelo de la misión. Las operaciones de la misión se refieren a cómo hacemos operaciones para alcanzar los objetivos de la misión. El capítulo define trece funciones clave realizadas por las operaciones de la misión y analiza cómo se combinan para cumplir con el concepto de operación de la misión.

Las operaciones clave de la misión son: 1. Planificación de la misión, 2. Planificación y desarrollo de la actividad, 3. Control de la misión, 4. Transporte y transmisión de datos, 5. Navegación y control de órbita, 6. Operaciones de la nave espacial o satélite, 7. Operaciones de la carga útil, 8. Procesamiento de datos, 9. Archivado y mantenimiento de la base de datos de la misión, 10. Ingeniería del sistema, integración y prueba, 11. Soporte de computadoras y comunicaciones, 12. Desarrollo y mantenimiento de software y 13. Gestión de operaciones de la misión.

Dentro de este capítulo se presenta una descripción general de las funciones de la misión espacial; en esta sección se describe también cómo estimar el tamaño y costo de las operaciones

de la misión. En la última parte del capítulo se discutirá la automatización de las funciones de la nave espacial o satélite y de las operaciones en Tierra.

El diseño del sistema terrestre es tan importante como el diseño de la nave espacial o satélite, por lo tanto, en el quinceavo capítulo se cubre el tema de diseño y dimensionamiento del sistema terrestre. Primero se presenta una descripción del proceso de diseño de las estaciones terrestres, el cual incluye una serie de decisiones: el número y localización de estaciones terrestres, la velocidad transmisión de datos de espacio a Tierra, las relaciones de temperatura ganancia – ruido requeridas y la potencia isotrópica radiada equivalente (effective isotropic radiated power EIRP), las ubicaciones requeridas para el manejo de datos, la ubicación del centro de control para las operaciones de la nave espacial o satélite, centro de control de las operaciones de la carga útil y centro de control de la misión, los enlaces de comunicación, la evaluación del uso de los servicios provistos por el sistema terrestre y el proceso de iteración una vez que todas las decisiones han sido tomadas.

El capítulo no solo se centra en el proceso de diseño, también describe los elementos básicos en un sistema terrestre, los sistemas terrestres típicos con sus enlaces de comunicación, las funciones opcionales, la influencia de la autonomía de la nave espacial o satélite y finalmente describe consideraciones clave de diseño.

El capítulo dieciséis abarca los sistemas informáticos del satélite y se divide en tres secciones principales. La primera de estas secciones está enfocada en el las especificaciones del sistema informático y cubre la definición de requisitos, la arquitectura de procesamiento, los requerimientos del sistema informático, la expansión de la definición del punto de referencia y los métodos para tolerar fallas. La segunda sección trata sobre la estimación de recursos de la computadora e involucra temas como la definición de tareas de procesamiento, la estimación del tamaño y el rendimiento del software, las pautas de selección de computadoras, la

integración y prueba y el soporte del ciclo de vida. La tercera sección ilustra todos los temas incluidos en este capítulo con el caso de estudio FireSat.

El capítulo décimo séptimo se centra en los sistemas espaciales de propulsión, dentro de este capítulo se presenta una detallada descripción del proceso para la selección y dimensionamiento del sistema de propulsión. El capítulo contiene un resumen de los conceptos básicos de la propulsión de cohetes, introduciendo los términos de empuje e impulso específico. Se discute una visión general de los diferentes tipos de cohetes, su clasificación, ventajas, desventajas, peligros y usos. La selección de componentes y dimensionamiento es uno de los últimos puntos en el capítulo junto con el tema de cohetes multi-etapa.

El proceso de lanzamiento afecta en gran medida el diseño de la nave espacial o satélite, una de las restricciones primarias es la capacidad de elevación del vehículo de lanzamiento y el ambiente donde el satélite estará durante el ascenso. El capítulo dieciocho cubre el sistema de lanzamiento, discutiendo las consideraciones de los vehículos de lanzamiento y las etapas superiores, el proceso de selección del sistema de lanzamiento y finalmente la definición de la cubierta y ambientes de diseño de la nave espacial o satélite.

El capítulo diecinueve abarca la fabricación y confiabilidad de nave espacial o satélite, describe métodos y estrategias aplicadas a cadenas de suministros de satélites, piezas o partes, ensamble, subsistemas y naves espaciales o satélites. La primera parte del capítulo se dedica al diseño de sistemas espaciales para fabricación, presenta los desafíos de manufactura, materiales, pruebas y el proceso de lanzamiento, discutiendo como crear una visión de manufactura y su influencia en el diseño, desarrollo del proceso y verificación finalizando con la producción. La segunda parte del capítulo cubre el diseño en función de la confiabilidad, el diseño de métodos para evitar fallas, práctica de tolerancia de fallas y técnicas de prueba.

El capítulo veinte se presenta el modelado de los costos, describe los elementos clave requeridos en estos análisis, los métodos de estimación de costos, el proceso de desarrollo del

modelo de costos y el uso y valor del dinero a través del tiempo. El capítulo resume el procedimiento para calcular estimaciones de costos utilizando una estimación de costos paramétricos. Se estudian las relaciones de estimación de costos para el segmento espacial, software, segmento terrestre, operaciones y costos de lanzamiento.

La solución perfecta es inútil hasta que pueda implementarse; por lo tanto, en el capítulo veintiuno los límites para los diseños de una misión son establecidos. El capítulo presenta las consideraciones legales y políticas de la ley espacial, la política espacial de EUA, la responsabilidad, el seguro de responsabilidad, restricciones de detección remota, restricciones de importación y exportación, inquietudes ambientales y las restricciones y acuerdos con respecto a los asteroides. Uno de los temas principales en este capítulo es la basura espacial y cubre las consideraciones de diseño para las misiones espaciales.

El capítulo vigésimo segundo se centra en el diseño de naves espaciales o satélites de bajo costo, sus aplicaciones y capacidades, sus potenciales aplicaciones y el estado actual en el campo espacial para los sistemas espaciales pequeños. También describe como escalar de sistemas grandes a sistemas pequeños y la economía de sistemas espaciales de bajo costo.

El capítulo final de la bibliografía es el veintitrés y describe cómo aplicar el proceso de análisis y diseño de misiones espaciales. Uno de los objetivos de este capítulo es explicar cómo aplicar la metodología SMAD a las fases posteriores de la misión, a lo largo del ciclo de vida de la misión y también compartir con la audiencia las lecciones aprendidas de los programas espaciales existentes. Los programas espaciales han estado en continuo desarrollo desde que aparecieron, por lo que, el último tema en este capítulo describe las futuras tendencias en los programas espaciales.

3.2. Metodología europea

La metodología europea estudiada en este documento es la que está contenida en la página de inicio de la Cooperación Europea para la Estandarización del Espacio (European

Cooperation Space Standardization ECSS) (European Cooperation for Space Standardization, Citado 2013). La ECSS es una iniciativa establecida para desarrollar una serie coherente de estándares fáciles de usar en todas las actividades espaciales europeas.

La historia de la ECSS comienza en 1993, cuando la comunidad espacial europea se dio cuenta de que no existía un sistema de normas y requerimientos para misiones espaciales uniforme. Las diferencias entre los estándares y las mejores prácticas utilizadas normalmente por la comunidad espacial europea generaron altos costos y baja efectividad, dando como resultado una industria menos competitiva.

El objetivo que persigue la ECSS fue claro: Desarrollar un nuevo sistema coherente de estándares espaciales para ser utilizado en todas las actividades espaciales europeas, utilizando el conocimiento y experiencia de la comunidad espacial obtenidos a través del tiempo. Los participantes en la ECSS incluyen a la Agencia Espacial Europea (European Space Agency ESA), agencias espaciales de otros países europeos, industria y asociados como organizaciones gubernamentales y científicas.

Los documentos de ECSS incluyen estándares y documentos de respaldo (manuales, memorandos técnicos, documentos de apoyo generales como el glosario), en conjunto, el sistema ECSS.

Sólo una parte de las agencias miembros de la ESA son representadas en la ECSS, pero todos los estados miembros apoyan la iniciativa de la ECSS. Las agencias miembro participantes de la ECSS son:

- Agencia Espacial Italiana (Agenzia Spaziale Italiana ASI)
- Oficina de Asuntos Científicos, Técnicos y Culturales (Belgian Office for Scientific, Technical and Cultural Affairs OSTC)
- Centro Espacial Nacional Británico (British National Space Centre BNSC)
- Centro Nacional de Estudios Espaciales (Centre National d'Etudes Spatiales CNES)

- Agencia Espacial Canadiense (Canadian Space Agency CSA)
- Agencia Alemana para el Espacio (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.)
- Agencia Espacial Europea (European Space Agency ESA)
- Centro Espacia Noruego (Norwegian Space Centre)

Los objetivos de la ECSS son:

- Ser reconocido y aceptado por la comunidad espacial europea para su uso en programas espaciales,
- Lograr programas y proyectos espaciales más rentables en Europa en términos de rendimiento técnico, rentabilidad del ciclo de vida y entregas puntuales,
- Mejorar la competitividad de la industria espacial europea,
- Mejorar la calidad y seguridad de los proyectos y productos espaciales,
- Facilitar una comunicación clara y sin ambigüedades entre todas las partes involucradas en el desarrollo y operación de sistemas espaciales, en una forma adecuada para ser incluidas en documentos legalmente vinculantes,
- Reducir el riesgo y garantizar la interoperabilidad y compatibilidad de interface mediante la aplicación de requisitos y métodos probados y reconocidos,
- Reflejar las necesidades de los usuarios y la retroalimentación de la experiencia de los programas, proyectos y otras fuentes apropiadas para mejorar los estándares de la ECSS, mientras se preserve la coherencia interna del sistema ECSS,
- Dar cuenta de nuevas prácticas, productos, tecnologías y misiones.

3.2.1. Fases del Proyecto

El ciclo de vida de los proyectos espaciales normalmente se divide en siete fases, las cuales son descritas a continuación:

- **Fase 0: Análisis de la misión/Identificación de necesidades:**

Esta es una actividad realizada principalmente por el iniciador del proyecto, el cliente de nivel superior y los representantes de los usuarios finales.

Durante esta actividad se elabora la declaración de la misión (mission statement) y la caracterización de las necesidades de la misión, el rendimiento esperado, los objetivos de confiabilidad y de seguridad y las limitaciones de la misión con respecto al entorno físico y operativo. Es desarrollada la especificación preliminar de los requisitos técnicos. Identifica los posibles conceptos de la misión. Realiza una evaluación preliminar de los aspectos programáticos, respaldados por estudios de mercado y económicos. Realiza una evaluación de riesgo preliminar.

Al final de esta etapa se conduce la **revisión de definición de la misión** (mission definition review MDR), el resultado de esta revisión se usa para juzgar la preparación del proyecto para pasar a la fase A. Los objetivos principales de esta revisión son: 1. Publicar la declaración de la misión (mission statement) y 2. Evaluar las especificaciones técnicas preliminares de los requerimientos y los aspectos programáticos.

- **Fase A: Factibilidad:**

Esta actividad es realizada principalmente por el cliente de nivel superior y uno o varios proveedores de primer nivel con el resultado informado al iniciador del proyecto y representantes de usuarios finales para su consideración.

Establece el plan de gestión de proyecto preliminar, el plan de ingeniería del sistema y el plan de certeza de operación para el producto. Elabora posibles conceptos de sistemas y operaciones y arquitecturas de sistema y los compara contra las necesidades identificadas para determinar los niveles de incertidumbre y riesgo. Establece el árbol de funciones⁴. Evalúa la factibilidad técnica y programática de los posibles conceptos mediante la identificación de las

⁴ Árbol de funciones: Es el desglose de las acciones del sistema en funciones. El objetivo del árbol de funciones es describir la descomposición jerárquica de las capacidades de un sistema o producto en un nivel sucesivo de funciones y subfunciones. (ECSS-E-ST-10C Rev.1 System engineering general requirements, 2017)

limitaciones relacionadas con la implementación, costo, cronograma, organización, operaciones, mantenimiento, producción y retirada/eliminación. Identifica las tecnologías críticas y propone actividades previas al desarrollo. Cuantifica y caracteriza los elementos críticos en términos de la factibilidad técnica y económica. Propone el (los) concepto (s) de sistema (s) y operaciones y soluciones técnicas, incluyendo la filosofía de modelo⁵ y enfoque de verificación, que serán elaborados más a fondo durante la fase B. Elabora la evaluación de riesgos.

La **revisión preliminar de requerimientos** (preliminary requirements review PRR) se efectúa al final de la fase A. El resultado de esta revisión es utilizado para juzgar si el proyecto está preparado para pasar a la fase B. Los objetivos de esta revisión son: 1. Liberar los planes preliminares de gestión del producto, ingeniería y certeza de operación para el producto, 2. Liberar las especificaciones de los requerimientos técnicos, 3. Confirmar la factibilidad técnica y programática del (los) concepto (s) del sistema y 4. Seleccionar el (los) concepto (s) del sistema y operaciones y soluciones técnicas, incluyendo la filosofía de modelo y el enfoque de verificación, que se trasladarán a la fase B.

- **Fase B: Definición preliminar:**

Durante esta fase se finalizan los planes de gestión de proyecto, ingeniería y certeza de operación para el producto. Establece el punto de referencia para el cronograma maestro. Elabora el punto de referencia para el costo total del proyecto, elabora la estructura de desglose organizacional preliminar. Confirma la (s) solución (es) técnica (s) para el (los) sistemas y conceptos de operaciones y su factibilidad con respecto a las restricciones programáticas. Realiza estudios de soluciones intermedias o de compensación (trade-off studies⁶) y selecciona

⁵ Filosofía de modelo: Define el número óptimo y características de los modelos físicos, virtuales e híbridos necesarios para lograr la confianza en la verificación del producto con la planificación más breve y una ponderación adecuada de los costos y riesgos. Es definida por medio de un proceso iterativo que combina restricciones programáticas, estrategias de verificación y el programa de integración y prueba, teniendo en cuenta el estado de desarrollo de la solución de diseño candidata.

⁶ Trade-off study (studies): Estudios de balance entre los diferentes requerimientos o variables.

el concepto de sistema preferido junto con las soluciones técnicas para este concepto. Establece una definición preliminar de diseño para el concepto de sistema seleccionado y la (s) solución (es) técnicas mantenidas. Determina el programa de verificación, incluida la filosofía de modelo. Identifica y define las interfaces externas. Prepara las especificaciones de siguiente nivel y los documentos de acuerdos comerciales relacionados. Inicia el trabajo previo al desarrollo de tecnologías críticas o áreas de diseño de sistemas cuando es necesario para reducir los riesgos de desarrollo. Inicia cualquier adquisición de elementos con plazo de entrega largos para cumplir con las necesidades del cronograma del proyecto. Prepara el plan de mitigación de basura espacial y el plan de retirada o eliminación. Realiza las evaluaciones de confiabilidad y seguridad. Finaliza el árbol de productos⁷, la estructura desglosada del trabajo⁸ y el árbol de especificaciones⁹. Actualiza la evaluación de riesgos.

A lo largo de la fase B se realiza la **revisión de requerimientos del sistema** (system requirements review SRR). Los objetivos de esta revisión son: 1. Liberar las especificaciones actualizadas de los requisitos técnicos, 2. Evaluar la definición de diseño preliminar y 3. Evaluar el programa de verificación preliminar.

Al finalizar la fase B la **revisión de diseño preliminar** (preliminary design review PDR) se lleva a cabo, el resultado de esta revisión es utilizado para juzgar si el proyecto está preparado para pasar a la fase C. Los objetivos principales de esta revisión son: 1. Verificar los diseños preliminares de los conceptos seleccionados y las soluciones técnicas contra los requerimientos

⁷ Árbol de productos: Es el desglose del proyecto en niveles sucesivos de productos o elementos de hardware y software, articulados para realizar las funciones identificadas en el árbol de funciones. Incluye los modelos de desarrollo, el equipo de apoyo terrestre, las herramientas de integración y el equipo de prueba, y los elementos externos necesarios para validar el producto final y los artículos de soporte logístico integrado. Incluye elementos enviados al control de configuración del cliente y elementos que están sujetos a una especificación de requisitos técnicos. El árbol de productos forma la base para la elaboración de la estructura de desdiseño de trabajo del proyecto.

⁸ Estructura desglosada de trabajo: Es la principal estructura utilizada en la gestión de un proyecto y proporciona un marco para la gestión de costos, planeación / cronograma y contenido técnico. Divide el proyecto en paquetes de trabajo manejables, organizados de acuerdo con la naturaleza del trabajo al dividir el trabajo total que se realizará en niveles de detalle cada vves mayores.

⁹ Árbol de especificaciones: Define la relación jerárquica de todas las especificaciones de requisitos técnicos para los diferentes elementos de un sistema o producto. Es la estructura básica para realizar la trazabilidad de los requisitos del sistema o del producto y para gestionar sus interfaces internas.

del proyecto y sistemas, 2. Liberar los planes de gestión de proyecto, ingeniería y certeza de operación para el producto, 3. Liberar el árbol de producto, la estructura desglosada del trabajo y el árbol de especificaciones y 4. Liberar el plan de verificación (incluyendo la filosofía de modelo).

- **Fase C: Definición Detallada:**

El alcance y el tipo de tareas realizadas a lo largo de esta fase se basan en la filosofía de modelo seleccionada para el proyecto, así como en el enfoque de verificación adoptado.

Completa la definición detallada del diseño del sistema en todos los niveles en la cadena cliente-proveedor. Se lleva a cabo la producción, pruebas de desarrollo y precalificación de los elementos y componentes críticos seleccionados. Se realizan las pruebas de producción y desarrollo de modelos de ingeniería, según lo requerido por el enfoque de verificación y la filosofía de modelo seleccionados. Finaliza la planeación del ensamble, integración y prueba de los sistemas y sus componentes. Define a detalle las interfaces internas y externas. Emite el manual de usuario preliminar. Actualiza la evaluación de riesgos.

Al finalizar la fase C se lleva a cabo la **revisión de diseño crítico** (critical design review CDR), el resultado de esta revisión es utilizado para juzgar si el proyecto está listo para comenzar la fase D.

Los objetivos principales de esta revisión son: 1. Evaluar el estatus de calificación y validación de los procesos críticos y su preparación para el desarrollo de la fase D, 2. Confirma la compatibilidad con las interfaces externas, 3. Libera el diseño final, 4. Libera los planes de ensamble, integración y pruebas, 5. Libera la producción, ensamble y prueba del software/hardware de vuelo y 6. Libera el manual del usuario.

- **Fase D: Calificación y Producción:**

Durante esta fase se completa la prueba de calificación y actividades de verificación asociadas. Realiza la manufactura, ensamble y prueba del hardware/software de vuelo y el

hardware/software asociado al soporte terrestre. Realiza las pruebas de interoperabilidad entre el espacio y el segmento terrestre. Prepara el paquete de datos de aceptación.

Se realizan tres diferentes revisiones en la fase D:

1. La **revisión de calificación** (qualification review QR) durante el transcurso de la fase.

Los objetivos principales de esta revisión son: 1. Confirma que el proceso de verificación ha demostrado que el diseño, incluidos los márgenes, cumple con los requisitos aplicables, 2. Verifica que el registro de verificación esté completo en este y todos los niveles inferiores de la cadena cliente-proveedor, 3. Verifica la aceptabilidad de todas las exenciones y desviaciones.

Cuando el desarrollo comprende la producción de uno o varios productos recurrentes la revisión de calificación se completa mediante una verificación de configuración funcional en donde: 4. Se analiza desde el punto de vista de la reproducibilidad la primera configuración, 5. Se liberan los archivos maestros de producción para las producciones en serie y 6. El cliente acepta el archivo de aprobación de producción en serie.

2. La **revisión de aceptación** (acceptance review AR), el resultado de esta revisión se utiliza para evaluar la preparación del producto para la entrega. Los objetivos principales de esta revisión son: 1. Confirma que el proceso de verificación ha demostrado que el producto está libre de errores de fabricación y está listo para su posterior uso operativo, 2. Verifica que el registro de verificación de aceptación esté completo en este y todos los niveles inferiores en la cadena cliente-proveedor, 3. Verifica que todos los productos entregados estén disponibles de acuerdo a la lista de artículos aprobados, 4. Verifica el producto “tal como está construido” y sus componentes contra el producto requerido “como está diseñado” y sus componentes constituyentes, 5. Verifica la aceptabilidad de las exenciones y desviaciones, 6. Verifica que el paquete de datos de aceptación esté completo, 7. Autoriza la entrega del producto y 8. Libera el certificado de aceptación.

3. La **revisión de la disponibilidad operacional** (operational readiness review ORR), llevada a cabo al final de la fase D. Los objetivos primarios de esta revisión son: 1. Verifica la preparación de los procedimientos operacionales y su compatibilidad con el sistema de vuelo, 2. Verifica la preparación de los equipos de operaciones y 3. Acepta y libera el segmento terrestre para las operaciones.

- **Fase E: Operaciones/Utilización:**

Las tareas dentro de esta fase varían en función del tipo del proyecto en cuestión. En general las actividades durante esta fase son: Realizar todas las actividades a nivel segmento espacial y terrestre para preparar el lanzamiento. Lleva a cabo todas las operaciones orbitales iniciales y de lanzamiento. Realiza las actividades de verificación en órbita (incluidas las actividades puesta en servicio¹⁰). Realiza todas las operaciones en órbita para alcanzar los objetivos de la misión. Realiza todas las actividades del segmento terrestre para soportar la misión. Realiza todas las demás actividades de apoyo en Tierra para soportar la misión. Finaliza el plan de eliminación o retirada.

Existen cuatro revisiones del proyecto durante la fase E:

1. **Revisión de preparación de vuelo** (flight readiness review FRR) realizada antes del lanzamiento. El objetivo de esta revisión es: 1. Verificar que los segmentos espaciales y terrestres estén listos para el lanzamiento, incluyendo todos los sistemas de soporte como: sistema de rastreo, sistema de comunicaciones y sistemas de seguridad.

2. **Revisión de preparación de lanzamiento** (launch readiness review LRR), esta revisión se realiza justo antes del lanzamiento. El objetivo de esta revisión es: 1. Declarar la preparación del vehículo de lanzamiento, de los segmentos espacial y terrestre incluyendo todos

¹⁰ Puesta en servicio (commissioning): Actividades de verificación y validación realizadas después de lanzamiento y antes de la entrada en servicio operacional, ya sea en los elementos del segmento espacial únicamente o en el sistema general (incluidos los elementos del segmento terrestre).

los sistemas de soporte como: sistema de rastreo, sistema de comunicación y sistemas de seguridad y brindar la autorización para proceder con el lanzamiento.

3. **Revisión de resultados de puesta en servicio** (comissioning results review CRR).

Esta revisión se realiza al final de la puesta en servicio como parte de la verificación en la etapa en órbita. Permite declarar la preparación para la rutina de operaciones/utilización. Esta revisión se lleva a cabo después de la finalización de una serie de pruebas en órbita, diseñadas para verificar que todos los elementos del sistema funcionan dentro de los parámetros de rendimiento especificados. La finalización exitosa de esta revisión se usa para marcar el traspaso formal del sistema al iniciador del proyecto o al operador del sistema.

4. **Revisión del final de la vida** (end-of-life review ELR). Los objetivos de esta revisión son: 1. Verifica que la misión ha completado su operación o servicio útil, 2. Garantiza que todos los elementos en órbita estén configurados para permitir una retirada o eliminación segura.

- **Fase F: Retirada/Eliminación:**

Durante la esta última etapa se implementa el plan de eliminación.

La revisión asociada a esta etapa es la **revisión de cierre de la misión** (mission close-out review MCR) y se lleva a cabo al final de esta fase. El objetivo de esta revisión es: 1. Garantiza que todas las actividades de retirada o eliminación de la misión se completen adecuadamente.

Áreas del sistema de Estándares ECSS

El sistema de la ECSS se divide en cuatro áreas principales, dentro de cada área sus disciplinas y requerimientos son cubiertos a través de estándares dedicados a cada uno de estos. Las disciplinas de la ECSS también utilizan manuales y memorandos técnicos. La figura 3-2 muestra la organización de la estructura del sistema de la ECSS.

Las cuatro áreas son:

- Gestión de Proyectos (Project Managment, M-branch),

- Ingeniería, (Engineering, E-branch),
- Certeza de Operación para el Producto (Product Assurance Q-Branch) y
- Sustentabilidad Espacial.

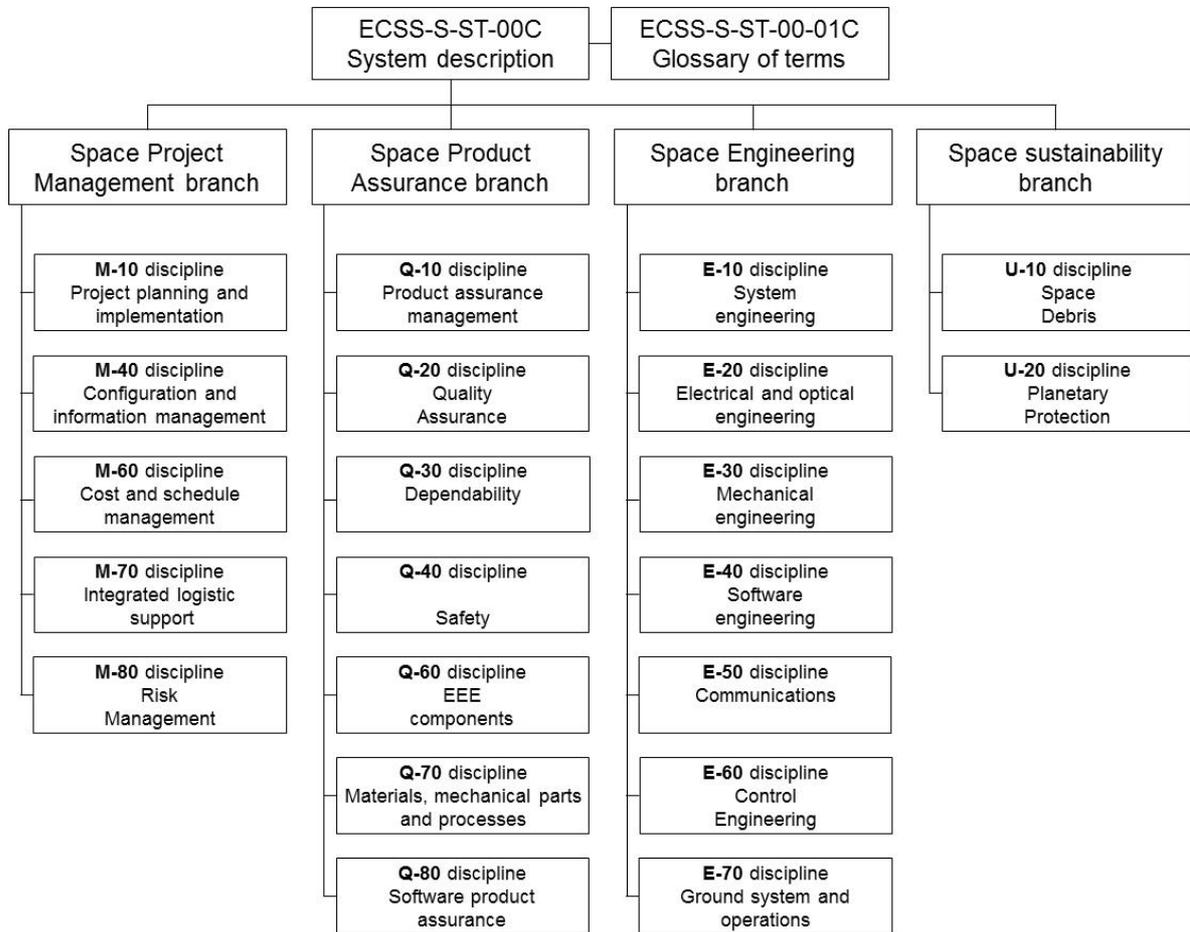


Figura 3-2 Disciplinas de sistema ECSS

Dos documentos de nivel superior preceden la organización del sistema ECSS, las tres áreas se encuentran debajo de estos documentos. Estándar ECSS-ST-S-00C (European Cooperation for Space Standardization, 2008.) Brinda una introducción general a la ECSS y al uso de los documentos en programas y proyectos espaciales. Estándar ECSS-S-ST-00-01C (European Cooperation for Space Standardization, 2012.) controla la definición de los términos utilizados en los estándares del sistema ECSS.

3.2.2. Área de Gestión de Proyectos

El área de gestión de proyectos o M-branch (Management branch) tiene como objetivo el implementar un proceso para lograr la finalización exitosa del proyecto en términos de costo, calendario y desempeño técnico.

La gestión del proyecto se realiza siguiendo un enfoque estructurado a través de todas las etapas de su ciclo de vida y a todos los niveles de la cadena cliente-proveedor.

Integra todas las funciones de gestión, ingeniería y certeza de operación para el producto requeridos para llevar a cabo la ejecución del proyecto.

La figura 3-3 ilustra la organización del área de gestión de proyecto, con las disciplinas y estándares que se encuentran debajo de esta área.

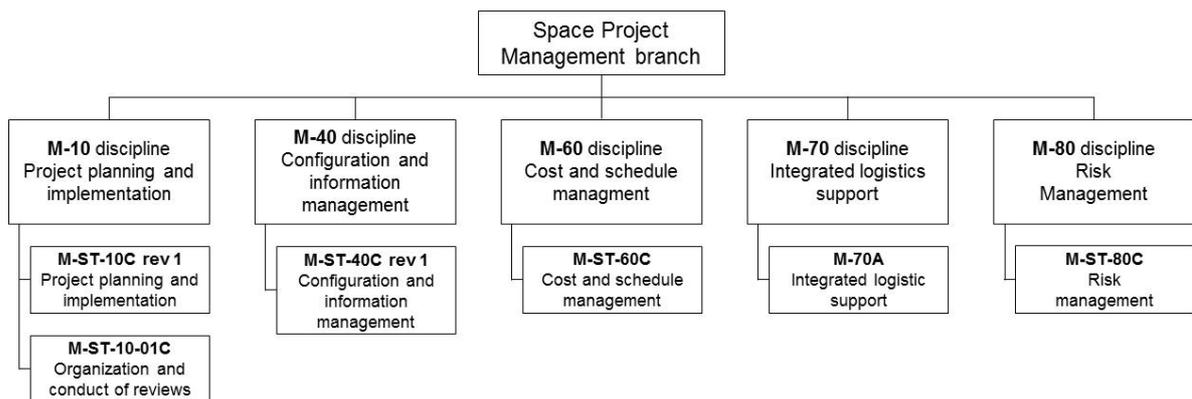


Figura 3-3 Estándares ECSS del área de Gestión de Proyecto

El área de gestión de proyectos está compuesta por cinco disciplinas:

- **M-10 Planeación en Implementación del Proyecto (Project planning and implementation) ECSS-MST-10.** Provee una serie de procesos coherentes para minimizar los riesgos técnicos, de calendario y económicos del proyecto.

Introduce las fases y metas clave que permitirán que el proceso del proyecto esté controlado en términos de costo, cronograma y objetivos técnicos.

Define el desglose de las estructuras del proyecto.

Identifica las tareas y responsabilidades de cada actor dentro del proyecto.

Garantiza la coherencia entre las actividades: técnicas, de documentación, administrativas y financieras de todo el proyecto.

Realiza actividades de planeación/programación y cálculo de costos.

Establece una organización de proyecto para implementar, con un enfoque estructurado y completo para realizar todas las actividades necesarias en el proyecto.

- **M-40 Gestión de configuración e información (Configuration and information management) ECSS-MST-40.** Identifica, describe y controla la descripción técnica de un sistema de manera lógica y consistente a través de su ciclo de vida. También se asegura de que toda la información necesaria para una ejecución efectiva de todos los procesos de gestión sea registrada, recuperada, distribuida y modificada de manera rastreada.

- **M-60 Gestión de costo y cronograma (Cost and schedule management) ECSS-MST-60.** Provee un conjunto de procesos para verificar el cumplimiento de la planeación y organización del proyecto, la finalidad es asegurar el uso consistente de recursos humanos, instalaciones, materiales y fondos para lograr la finalización del proyecto espacial dentro de sus metas establecidas: costo, cronograma y desempeño. Proporciona alertas para activar adaptaciones necesarias, por ejemplo: re-planificación, reasignación de recursos).

- **M-70 Soporte logístico integrado (Integrated logistic support) ECSS-MST-70.** Cubre los requerimientos necesarios para el soporte logístico a lo largo del ciclo de vida del sistema.

- **M-80 Gestión de riesgo (Risk Management) ECSS-MST-80.** Identifica todos los riesgos y oportunidades, y mantiene los riesgos dentro de límites definidos y aprobados en la política de riesgos del proyecto.

La gestión de riesgos tiene como objetivo todos los aspectos del programa, incluyendo el rendimiento técnico y calidad, planificación (por ejemplo: financiación, entorno político, costo

(por ejemplo: tipo de contrato, costo del proyecto), cronograma y operación (por ejemplo: soporte logístico, seguridad).

Incluye la identificación, evaluación y clasificación sistemática de todas las causas y consecuencias de riesgo antes de la definición e implementación de una decisión de aceptar, monitorear o tomar medidas. La evaluación de riesgos respalda el proceso de toma de decisiones, incluyendo la consideración de las incertidumbres sobre el riesgo involucrado.

También incluye la definición sistemática, implementación, control y verificación de las acciones apropiadas para la eliminación o mitigación del riesgo a un nivel aceptable.

3.2.3. Área de Ingeniería

El área de Ingeniería o E-branch (Engineering branch) cubre los aspectos de ingeniería del sistema espacial y sus productos. Esta área incluye el proceso de ingeniería y consideraciones técnicas para sistemas espaciales, sus elementos y funciones. Considera los aspectos técnicos de los productos utilizados para lograr, o asociados con, las misiones espaciales. Las figuras 3-4 y 3-5 ilustran la organización de las disciplinas que forman el área de ingeniería y sus estándares respectivos.

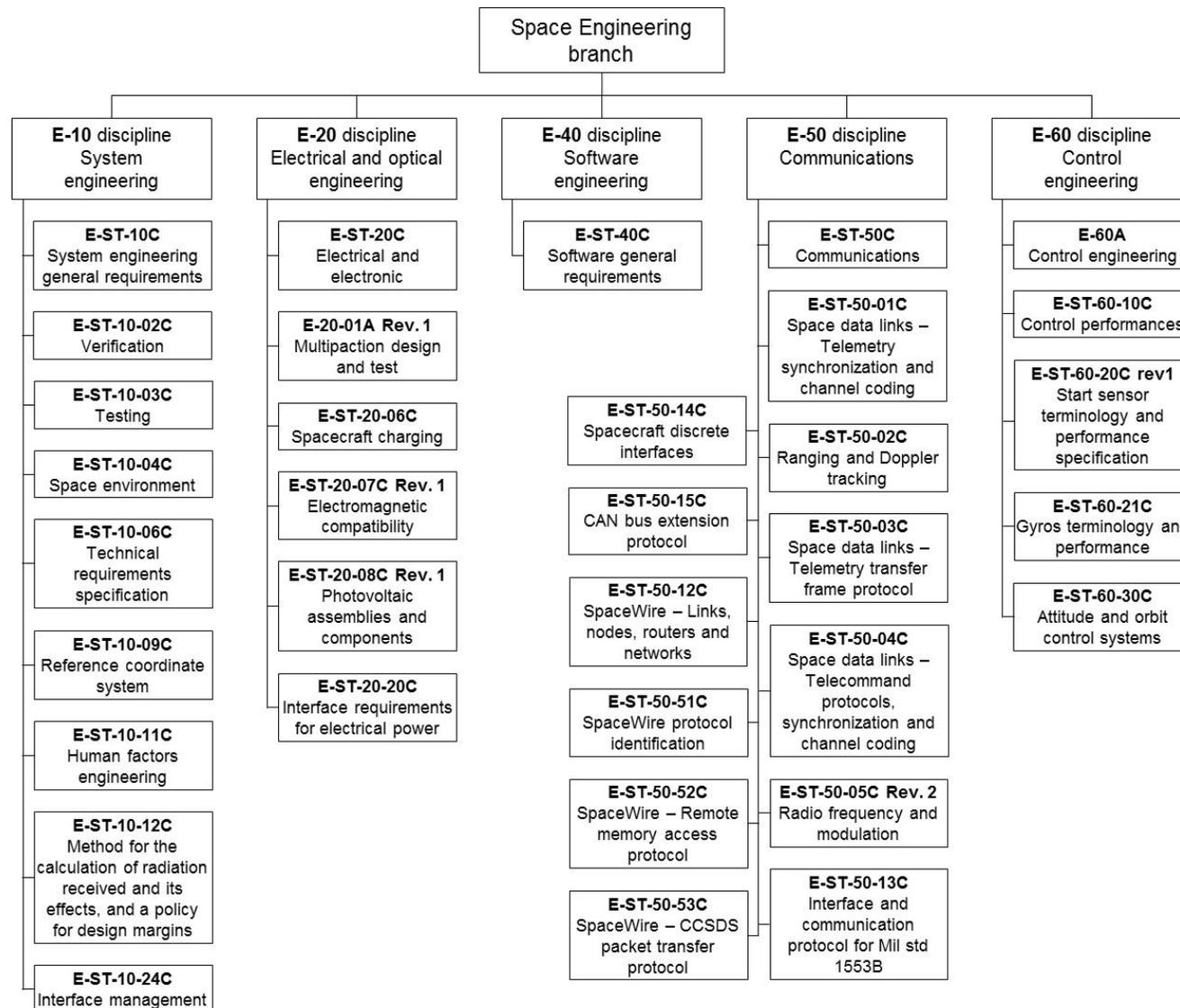


Figura 3-4 Estándares ECSS del área de Ingeniería. Parte I

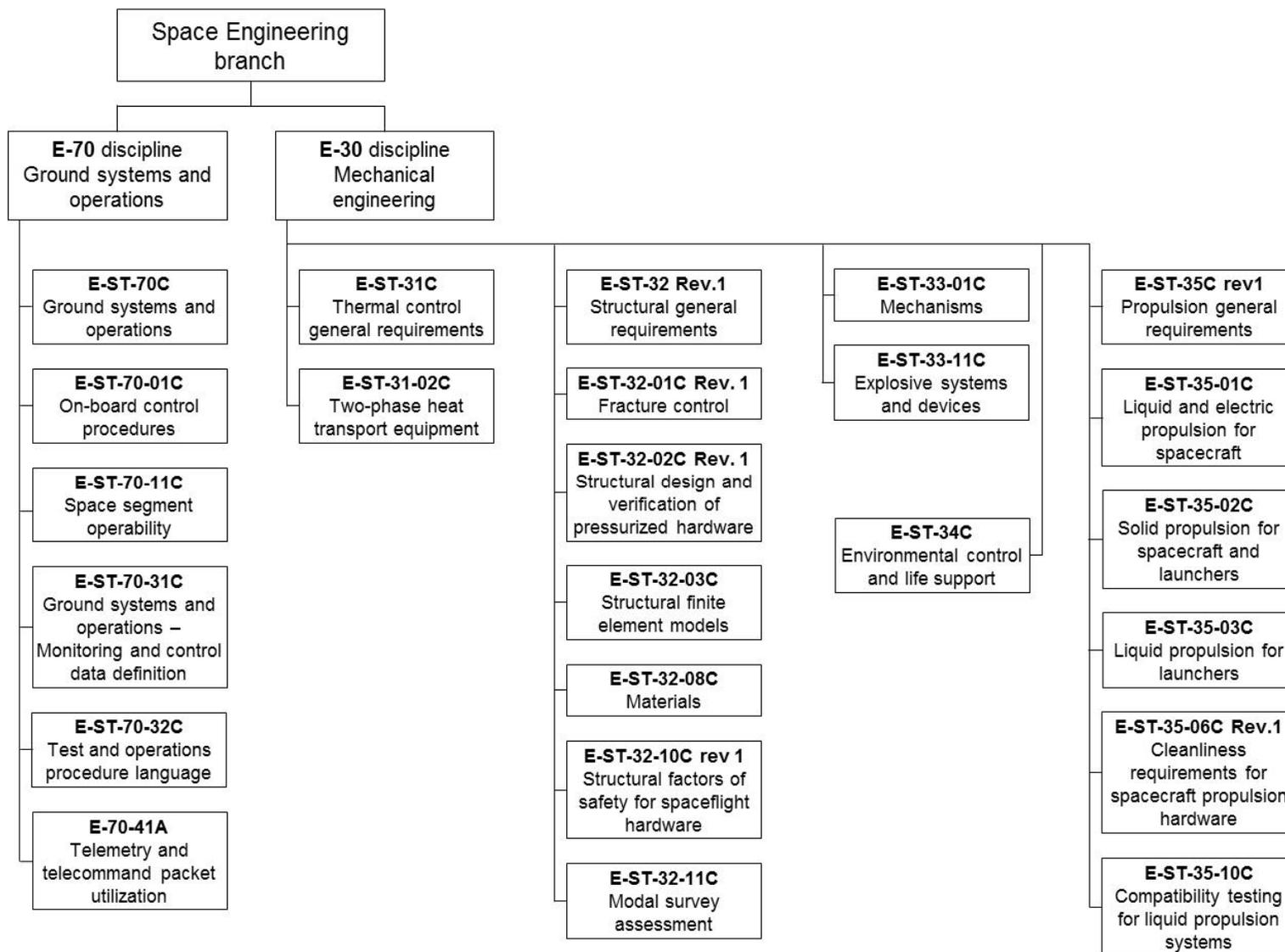


Figura 3-5 Estándares ECSS del área de Ingeniería. Parte II

- **E-10 Sistema de Ingeniería (System Engineering) ECSS-E-ST-10.** Esta disciplina es una actividad multidisciplinaria que coordina técnicamente las diferentes actividades de ingeniería para garantizar la consistencia y la integridad técnica del proyecto. Dentro de esta disciplina se analiza la definición de requerimientos técnicos del sistema, integración y control de interfaces y verificación. Incluye las actividades del sistema que proporcionan restricciones a otras disciplinas como: ambiente espacial, factores humanos, mecánica celeste y coordenadas de referencia.

- **E-20 Ingeniería Eléctrica y Óptica (Electrical and Optical Engineering) ECSS-ST-E-20.** Aborda todos los aspectos de procesos de diseño eléctrico, electromagnético, microondas e ingeniería óptica de productos espaciales. Incluye funciones como la generación de energía, así como su almacenamiento, conversión y distribución. El análisis y definición de requerimientos como: el arreglo de paquetes de comunicación para formar las cadenas de transmisión de información (multiplexión), carga de la nave espacial, compatibilidad electromagnética, interfaces eléctricas e interconexiones y aspectos tecnológicos de la comunicación de interfaces.

- **E-30 Ingeniería Mecánica (Mechanical Engineering) ECSS-E-ST-31, -32, -34 y -35.** Cubre todos los aspectos de diseño mecánico de productos espaciales como: control térmico, estructuras, materiales estructurales, mecanismos y pirotecnia, control ambiental y soporte de vida y propulsión (lanzadores y naves espaciales). Vea la figura 3-5 para ver a detalle la organización de los estándares de esta disciplina.

- **E-40 Ingeniería de Software (Software Engineering) ECSS-E-ST-40.** Esta disciplina cubre los procesos de ciclo de vida de los productos de software: definición de requerimientos, diseño de la arquitectura, desarrollo, operaciones y mantenimiento. Abarca los diferentes tipos de software: de abordo (integrado), en Tierra y software para calificación, prueba y verificación.

- **E-50 Comunicaciones (Communications) ECSS-E-ST-50.** Cubre todos los aspectos de comunicación relacionados con interfaces externas para telemetría, telecomandos, rango y datos: nave espacial a Tierra, nave espacial a nave espacial, Tierra a Tierra, e interfaces internas entre elementos de equipo de abordo. Hace particular énfasis en todos los aspectos como presupuesto o balance de enlace y protocolos en varias capas de comunicación.
- **E-60 Ingeniería de Control (Control Engineering) ECSS-E-ST-60.** Cubre aspectos del control automático de sistemas espaciales. Esta disciplina incluye puntos como: requerimientos para dinámica y control, por ejemplo: control de posición y órbita, robótica, encuentro espacial (rendez-vous) y acoplamiento y requerimientos para sensores y accionadores, por ejemplo: giroscopios y sensores solares y/o de estrellas.
- **E-70 Sistemas y Operaciones en Tierra (Ground Systems and Operations) ECSS-E-ST-70.** Esta disciplina cubre la ingeniería del segmento terrestre y las operaciones de la misión. Dentro de esta disciplina se incluyen temas como procedimientos y lenguajes de las operaciones, requerimientos para el funcionamiento del segmento espacial, definición de servicios de telemetría y telecomando y requerimientos de la interface entre el vehículo espacial y el equipo de soporte terrestre.

3.2.4. Área de Certeza de Operación para el Producto

El área de Certeza de Operación para el Producto o Q-branch (Product Assurance) tiene como objetivo el asegurar que los productos espaciales cumplan sus objetivos definidos de la misión garantizando que sean seguros, estén disponibles y sean confiables. Esta área se conforma por siete disciplinas.

El área de certeza de operación para el producto, en conjunto con la gestión de riesgos, garantiza la identificación, evaluación, prevención y control de los riesgos técnicos dentro de las limitaciones del proyecto.

Figuras 3-6, 3-7 y 3-8 muestran la configuración del área de certeza de operación para el producto con las disciplinas y respectivos estándares. La figura 3-6 esquematiza las disciplinas Q-10, Q-20, Q-30, Q-40 y Q-60. Figuras 3-7 y 3-8 muestran la configuración de las disciplinas Q-70 y Q-80.

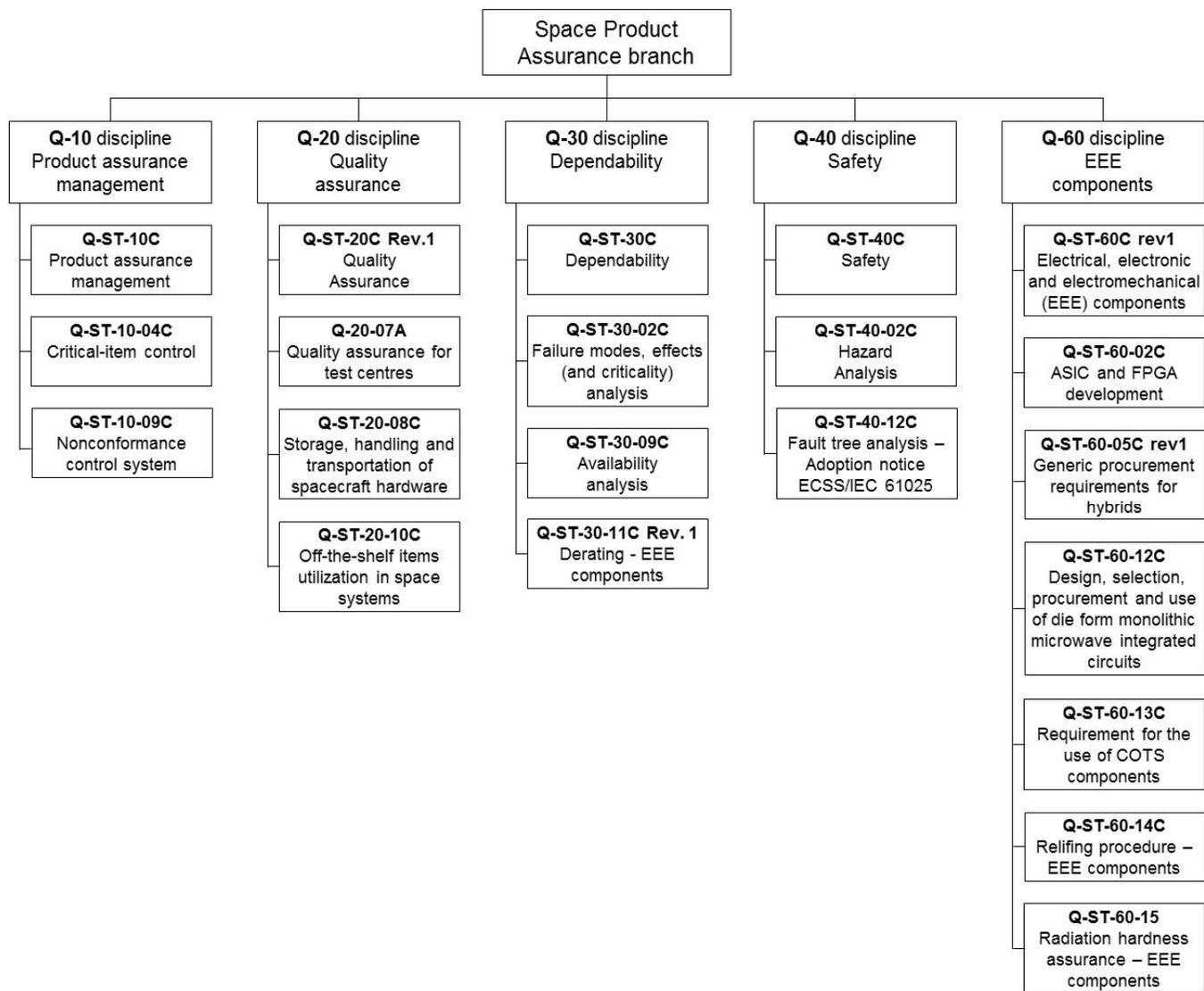


Figura 3-6 Estándares ECSS del área de Certeza de Operación para el Producto. Parte I

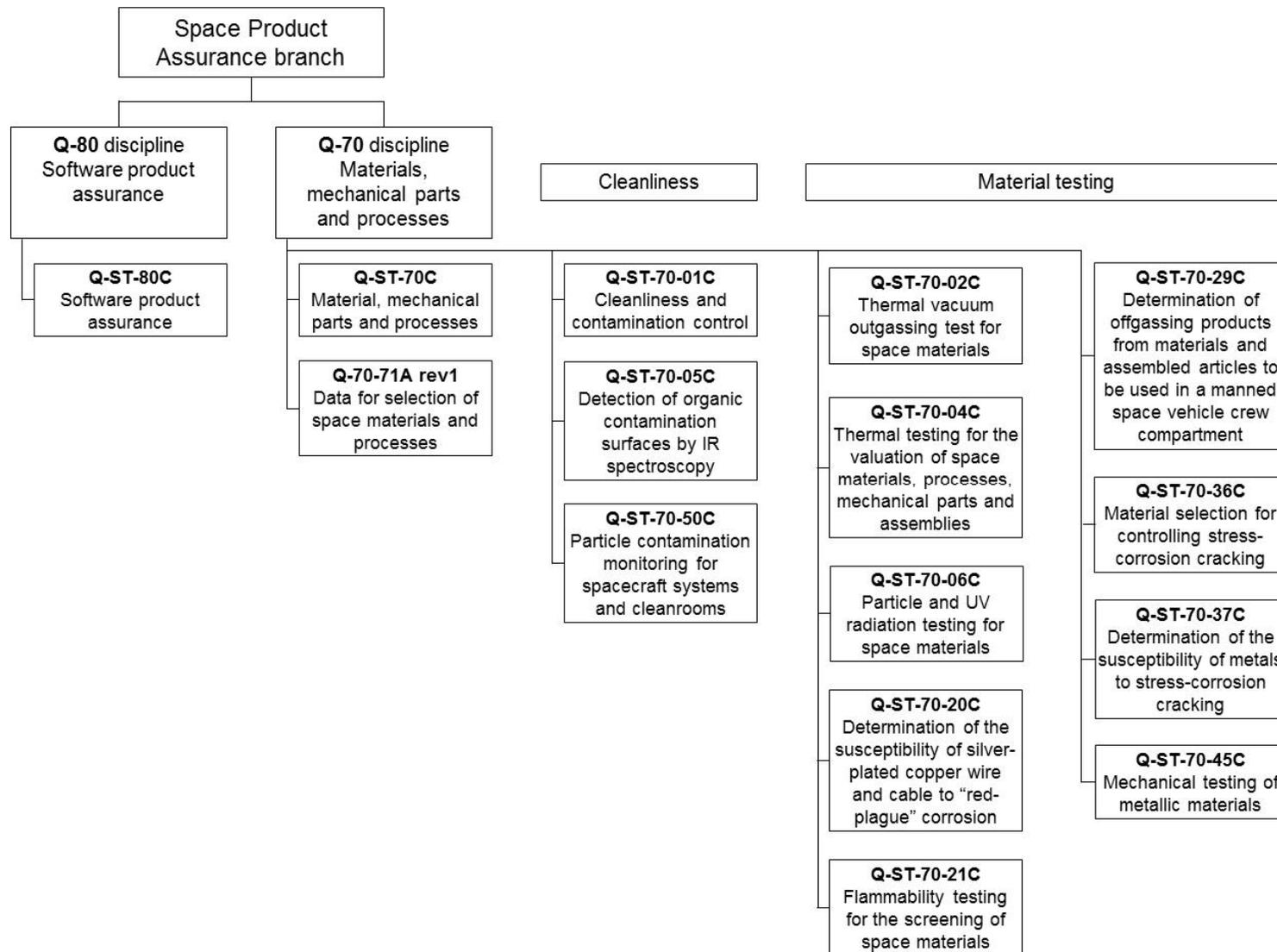


Figura 3-7 Estándares ECSS del área de Certeza de Operación para el Producto. Parte II

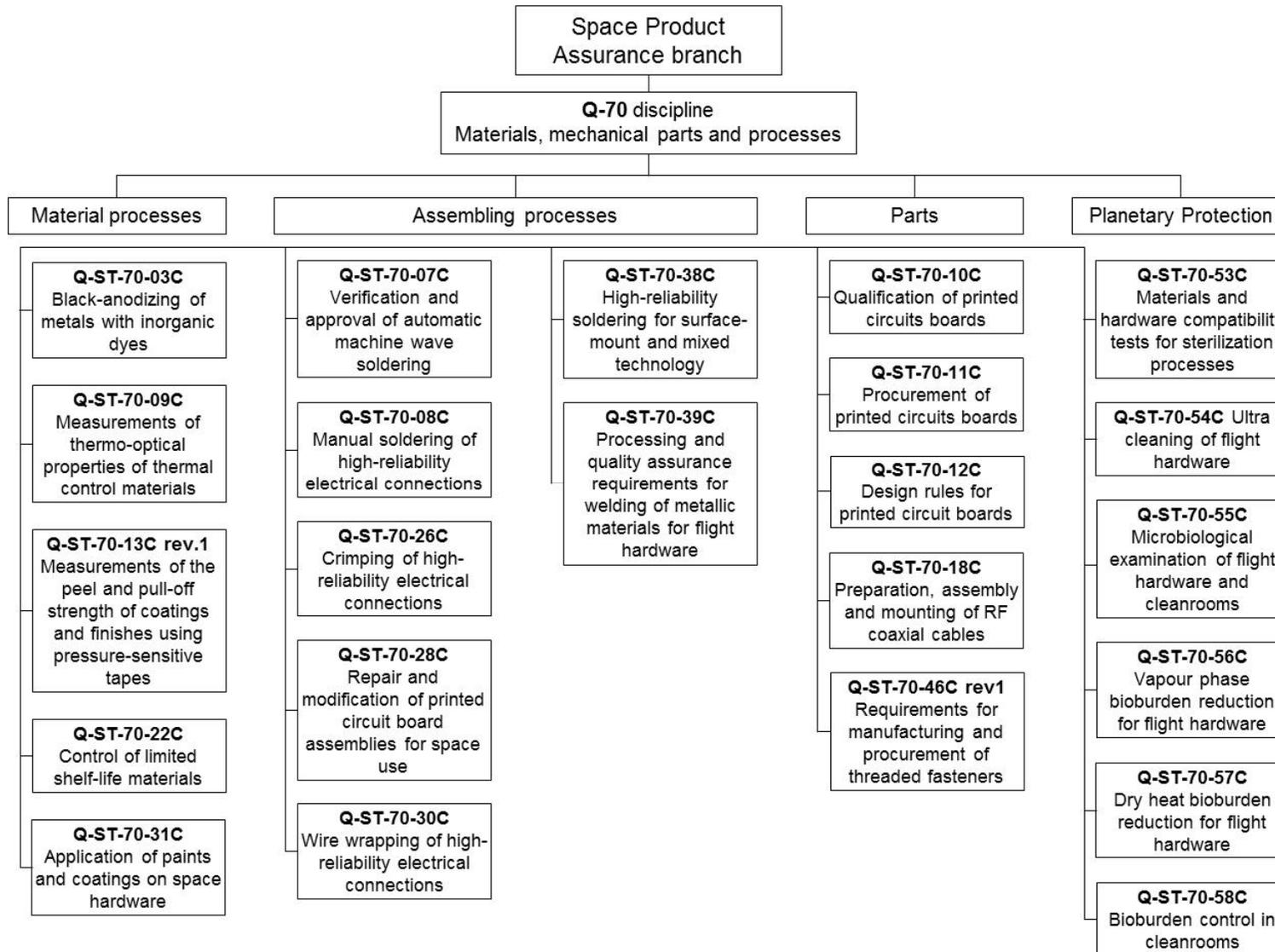


Figura 3-8 Estándares ECSS del área de Certeza de Operación para el Producto. Parte III

Las siete disciplinas que conforman el área de certeza de operación para el proyecto se describen a continuación:

- **Q-10 Gestión de Certeza de Operación para el Producto (Product Assurance Management) ECSS-Q-ST-10.** Esta es una actividad interdisciplinaria cuyo objetivo es el de asegurar que el programa de certeza de operación para el producto sea implementado y administrado a lo largo de todas las fases del proyecto y se coordine con todos los actores. Define todas las actividades de certeza de operación para el producto de acuerdo a los objetivos, requerimientos, criticidades y limitaciones del proyecto.

Aborda temas como la asignación y disponibilidad de recursos, personal e instalaciones adecuadas para llevar a cabo las tareas necesarias de certeza de operación para el producto. Los requisitos para que los proveedores realicen la supervisión y control adecuado para la certeza de operación para el producto. El seguimiento del progreso informes y visibilidad de todos los asuntos de la certeza de operación para el producto, en particular aquellos relacionados a las alertas, elementos críticos, no conformidades, cambios, desviaciones, exenciones, acciones y recomendaciones resultantes de revisiones, inspecciones y auditorías, calificación, verificación y aceptación.

- **Q-20 Certeza de la Calidad (Quality Assurance) ECSS-Q-ST-20.** Aborda todos los aspectos para garantizar que la calidad del producto sea especificada de acuerdo a las necesidades del cliente, diseñada, construida, verificada y mantenida con documentación durante todo el ciclo de vida. Cubre la certeza de la calidad para los centros de prueba y en los equipos y componentes comerciales

- **Q-30 Confiabilidad (Dependability) ECSS-Q-ST-30.** Se aplica mediante la implementación de un programa de aseguramiento de la confiabilidad que comprende: 1. La identificación de todos los riesgos técnicos con respecto a las necesidades funcionales que puedan conducir a incumplir los requisitos de confiabilidad, 2. Aplicación de métodos de

análisis y diseño para asegurar que se cumplan con los objetivos confiabilidad, 3. Optimización de costo total y cronograma asegurándose de que las reglas de diseño, los análisis de confiabilidad y las acciones de reducción de riesgos se adaptan con respecto a una categorización de severidad apropiada y a que las acciones de reducción de riesgos se implementan continuamente desde la fase inicial de un proyecto y especialmente durante la fase de diseño.

- **Q-40 Seguridad (Safety) ECSS-Q-ST-40.** El objetivo es asegurar que todos los riesgos asociados con el diseño, desarrollo, producción y operación de productos espaciales sean adecuadamente identificados, evaluados, minimizados, controlados y finalmente aceptados mediante el programa de aseguramiento de seguridad. Cubre la evaluación de riesgos basándose en análisis cuantitativos y cualitativos.

Define el programa de seguridad y los requisitos técnicos de seguridad para proteger de peligros asociados a los sistemas espaciales europeos a: personal de vuelo y personal en Tierra, el vehículo de lanzamiento, las cargas útiles, el equipo de apoyo en Tierra, el público en general, la propiedad pública, así como la propiedad privada, el sistema espacial y los segmentos asociados, y el medio ambiente.

- **Q-60 Componentes Eléctricos, Electrónicos y Electromecánicos (Electric Electrical, Electronic, Electromechanical Components) ECSS-Q-ST-60.** Define los requerimientos para la selección, control y adquisición de componentes eléctricos, electrónicos y electromecánicos (EEE) para asegurar que satisfarán los requerimientos de rendimiento de la misión. Cubre la gestión del programa de componentes, la selección, evaluación y aceptación de componentes, la adquisición de componentes, el manejo, almacenamiento y actualización de componentes y el aseguramiento de la calidad del componente.

- **Q-70 Materiales, Partes Mecánicas y Procesos (Materials, Mechanical Parts and Process) ECSS-Q-ST-70.** Define los requerimientos para la selección, control y adquisición

de los materiales, partes mecánicas y procesos para proyectos espaciales asegurando que satisfarán los requerimientos de rendimiento durante el ciclo de vida completo de los productos.

Cubre los requerimientos y procesos para la selección (por ejemplo: caracterización, evaluación, calificación para sus aplicaciones) y adquisición de materiales y partes mecánicas (por ejemplo: desgasificación, ciclado térmico, radiación, soldadura, craqueo). También abarca los requisitos y procedimientos para evitar la contaminación planetaria (por ejemplo: limpieza, esterilización).

- **Q-80 Certeza de Operación del Producto de Software (Software Product Assurance) ECSS-Q-ST-80.** Define los requerimientos para asegurar el que el software desarrolla o re utilizado y los servicios de software funcionen de forma adecuada y segura en tus entornos operativos. Incluye los requerimientos para el software que no será entregado, el cual afecta la calidad del producto o del servicio entregado por el sistema espacial (por ejemplo: software de prueba y verificación).

3.2.5. Área de Sustentabilidad (Sustainability branch)

Anteriormente el sistema ECSS estaba dividido en tres áreas: Gestión, Certeza de Operación para el Producto e Ingeniería, pero recientemente una nueva área ha sido incluida en el sistema: Sostenibilidad. El área de la sostenibilidad ha sido incluida debido al interés internacional en temas como basura espacial, protección planetaria y la situación actual del espacio.

El área de sostenibilidad espacial proporciona los principios para la sostenibilidad continua del ambiente espacial a fin de garantizar un presente y un futuro apropiado y seguro para las actividades espaciales.

Al día de publicación de este documento, el área de sostenibilidad se compone de tres disciplinas, y sólo existe un estándar publicado sobre basura espacial y un estándar actualmente en producción sobre protección planetaria.

La figura 3-9 ilustra la organización del área de sostenibilidad espacial, así como las disciplinas que le dan forma y sus estándares.

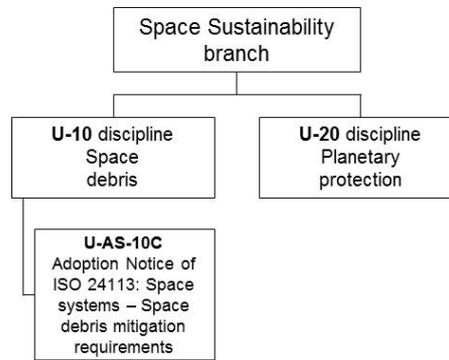


Figura 3-9 Estándares ECSS del área de Sostenibilidad.

Comparación de metodologías

El cuarto capítulo presenta una comparación entre la metodología estadounidense Análisis y Diseño de Misiones Espaciales (Space Mission Analysis and Design SMAD) y la metodología europea desarrollada por la Cooperación Europea para la Estandarización del Espacio (European Cooperation Space Standardization ECSS). El propósito de este documento es presentar una comparación entre ambas metodologías y proponer una metodología que resultará de la fusión de estas.

Aunque las metodologías para misiones espaciales han sido desarrolladas por diferentes desarrolladores de proyectos espaciales, estas metodologías muestran fases similares a lo largo del ciclo de vida de las misiones espaciales.

Debido a la experiencia adquirida a través de proyectos espaciales previamente elaborados cada desarrollador y/o patrocinador del proyecto ha establecido sus propias prácticas, estándares, herramientas, revisiones, etapas, entregas de proyecto y procesos con la finalidad de mejorar el diseño y la implementación de misiones espaciales.

El objetivo de este capítulo es establecer las diferencias y puntos comunes entre la metodología SMAD y la metodología descrita por la ECSS. Esta comparación metodológica abarca el ciclo de vida del diseño, por lo tanto, la comparación mostrada a continuación estará centrada en el proceso SMAD cubierto por las fases de: definición de objetivos, caracterización de la misión, evaluación de la misión y definición de requerimientos y en el caso de los estándares de la ECSS el foco estará en las fases de: Análisis de la misión/Identificación de las necesidades, factibilidad y definición preliminar.

Para facilitar la comparación entre las dos metodologías, ambas metodologías serán divididas en tareas. Estas tareas son las actividades que deben ser desarrolladas para cumplir

con las fases de diseño. Se utilizarán estas actividades para comparar las metodologías una a una.

La estructura del SMAD está dividida en cuatro fases, estas fases están conformadas por once pasos, cada paso se divide en cuarenta y tres tareas. Algunas tareas tienen asociadas tareas de nivel inferior que son consideradas recomendaciones o herramientas que ayudarán a cumplir con el objetivo de su tarea de nivel superior inmediata.

La estructura para el SMAD es la siguiente: Fase → Paso → Tarea → Tarea de nivel inferior. En la sección 4.1 de este documento la estructura SMAD es descrita con detalle.

La metodología de los estándares ECSS se divide en siete fases, estas fases están formadas por tareas; durante diferentes etapas dentro de las fases se establecen revisiones. La estructura para la metodología de los estándares ECSS es: Fase → Tarea → Revisión. En la sección 4.2 se mostrará a detalle la estructura de las fases de los estándares ECSS.

4.1. Proceso de Análisis y Diseño para Misiones Espaciales

El proceso SMAD se divide en cuatro fases, cada una de estas fases incluye una serie de pasos que deben de ser cumplidos para alcanzar los objetivos de las fases, como fue mencionado en la sección anterior estos pasos han sido divididos en tareas, algunas de las cuales tienen asociadas tareas de nivel inferior. La figura 4-1 muestra el diagrama de la estructura del proceso SMAD, la cual será descrita a detalle en esta sección.

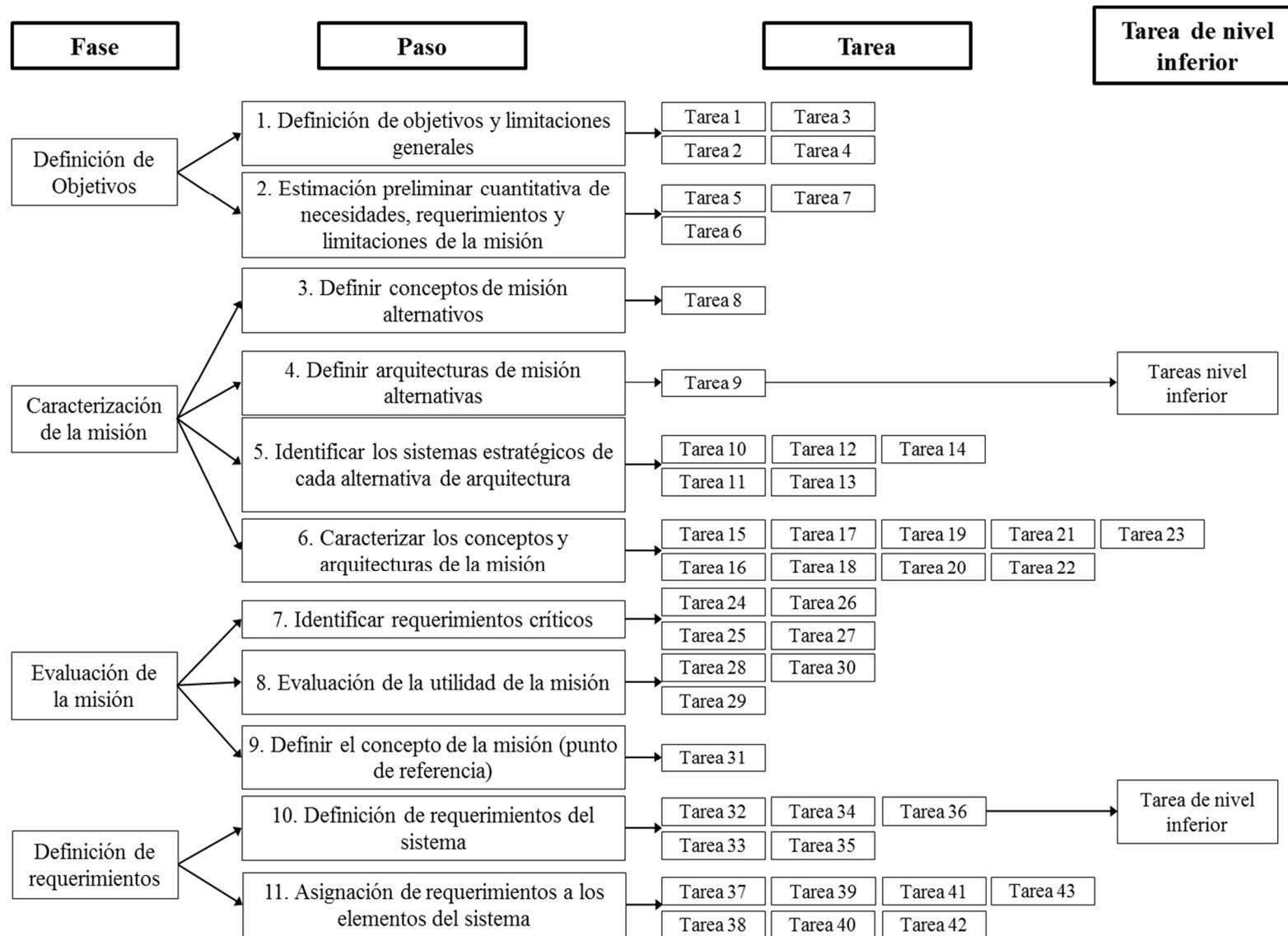


Figura 4-1 Estructura del proceso SMAD. Propuesta por la autora.

Es importante resaltar que el procedimiento descrito en el SMAD no establece o brinda recomendaciones para revisiones específicas, ni contiene una lista detallada de consejos o guías para llevar a cabo juntas de revisión, a diferencia de la metodología establecida en los estándares ECSS donde se describen las relaciones entre los clientes y proveedores, la información generada durante el ciclo de vida proyecto y las tareas de gestión del proyecto. Utiliza este enfoque debido a que el objetivo del proceso SMAD es describir la metodología que garantiza la capacidad de adaptarla a diferentes estrategias y políticas de gestión de proyectos que el desarrollador o patrocinador podrían utilizar.

A continuación, se presenta un breve resumen del proceso SMAD para ilustrar como cada una de las fases está compuesta por pasos y cómo estos pasos a su vez son formados por tareas que guían a través del proceso de diseño.

Fase 1: Definición de Objetivos: (Figura 4-2)

Paso 1 Definición de objetivos y limitaciones generales.

Tarea 1 Identificar los objetivos primarios de la misión.

Tarea 2 Identificar los objetivos secundarios de la misión.

Tarea 3 Identificar los objetivos adicionales y la agenda oculta.

Tarea 4 Identificar las características del espacio que se explotarán con la misión.

Paso 2: Estimación preliminar cuantitativa de necesidades, requerimientos y limitaciones de la misión:

Tarea 5 Identificar los requerimientos funcionales:

- Desempeño,
- Cobertura,
- Capacidad de respuesta,
- Misión secundaria.

Tarea 6 Identificar los requerimientos operacionales:

- Duración,
- Disponibilidad,
- Supervivencia,
- Distribución de datos,
- Contenido, forma y formato de datos.

Tarea 7 Identificar las limitaciones.

- Costo,
- Calendario/Organigrama,
- Regulaciones políticas,
- Ambiente,
- Interfaces,
- Restricciones del desarrollo.

Proceso SMAD					
Fase	Paso	Descripción del Paso	Tarea	Descripción de la Tarea	Tarea de nivel inferior
Definición de Objetivos	1	Definición de objetivos y limitaciones generales	1	Identificar los objetivos primarios de la misión	
			2	Identificar los objetivos secundarios de la misión	
			3	Identificar los objetivos adicionales y la agenda oculta	
			4	Identificar las características del espacio que se explotarán con la misión	
	2	Estimación preliminar cuantitativa de necesidades, requerimientos y limitaciones de la misión	5	Identificar los requerimientos funcionales	
			6	Identificar los requerimientos operacionales	
			7	Identificar las limitaciones	

Figura 4-2 SMAD Fase: Definición de objetivos. Propuesta por la autora.

Fase 2: Caracterización de la misión: (Figura 4.3)**Paso 3: Definir conceptos de misión alternativos:****Tarea 8** Definir varias alternativas de conceptos de operación de la misión:

- Transmisión de datos: Cómo son generados o recolectados, distribuidos y utilizados los datos científicos de la misión y de operación del sistema.

Operaciones clave:

- Procesamiento en el espacio vs. Procesamiento en Tierra,
- Nivel de autonomía y
- Procesamiento central vs. Procesamiento distribuido.

- Arquitectura de la comunicación: Cómo es que los diferentes componentes del sistema se comunican entre ellos.

Operaciones clave:

- Velocidades de transmisión de datos de ancho de banda y
- Rapidez en la comunicación.

- Asignación de tareas, planificación y control: Cómo es que el sistema decide que hacer en el largo y corto plazo.

Operaciones clave:

- Nivel de autonomía,
- Control central vs. Control distribuido.

- Cronograma de la misión: El cronograma general de planificación, construcción, despliegue, reemplazo y final de vida.

Operaciones clave:

- Opciones de reabastecimiento y fin de vida,
- Estrategia de despliegue para múltiples satélites y
- Nivel de flexibilidad del cronograma.

Paso 4: Definir arquitecturas de misión alternativas:

Tarea 9 Identificar alternativas para la arquitectura de la misión. Los elementos básicos en la arquitectura de la misión son ocho:

1. Sujeto de estudio,
2. Órbita y constelación,
3. Carga útil,
4. Plataforma de la nave espacial,
5. Lanzador,
6. Sistema terrestre,
7. Operaciones de la misión, y
8. Arquitectura de comando, control y comunicaciones.
 - a) Identificar los elementos de la misión que permitan varias opciones,
 - b) Identificar las opciones principales para cada uno de los elementos que pueden tener más de una opción,
 - c) Construir un árbol con las posibles opciones viables,
 - d) Podar el árbol de posibles combinaciones, eliminando las combinaciones no realistas,
 - e) Buscar nuevas alternativas (que no hayan sido mencionadas anteriormente) que pudieran influenciar substancialmente como hacer la misión (costo, desempeño, simplicidad).

Paso 5: Identificar los sistemas estratégicos de cada alternativa de arquitectura:

Tarea 10 Identificar las áreas de interés: rendimiento, costo, riesgo o planeación/cronograma.

Tarea 11 Identificar los parámetros que miden las áreas de interés.

Tarea 12 Desarrollar algoritmos de primer orden.

Tarea 13 Examinar los factores.

Tarea 14 Buscar sistemas estratégicos ocultos.

Paso 6: Caracterizar los conceptos y arquitecturas de la misión:

Tarea 15 Definir un concepto de misión preliminar utilizando los elementos clave:

- Transmisión de datos,
- Arquitectura de la comunicación,
- Asignación de tareas, planificación y control,
- Cronograma de la misión

Tarea 16 Definir las características del sujeto de estudio.

Tarea 17 Determinar las características de la órbita y de la constelación.

- Altitud,
- Inclinación,
- Excentricidad,
- Argumento del perigeo para órbitas no circulares,
- Cálculo ΔV (delta-v) para órbita de transferencia,
- Cálculo ΔV (delta-v) para el mantenimiento de la órbita,
- Si la órbita será controlada o no controlada,

En caso de constelaciones:

- Número y orientación relativa de los planos orbitales,
- Número y espaciamiento de las naves espaciales o satélites por plano orbital.

Tarea 18 Determinar el tamaño y desempeño de la carga útil.

- Parámetros físicos:
 - Dimensiones de la cubierta,
 - Propiedades de la masa.
- Visualización y apuntamiento:
 - Tamaño y forma de apertura,
 - Tamaño y orientación del campo de visión despejado requerido,

- Dirección de apuntamiento primaria,
- Rango de dirección de apuntamiento y exactitud requeridos,
- Velocidad de rastreo o escaneo,
- Duración de apuntamiento o rastreo y ciclo de operación.
- Energía eléctrica:
 - Voltaje,
 - Potencia promedio y máxima,
 - Ciclo de operación de potencia máxima.
- Telemetría y comando:
 - Número de canales para telemetría y comando,
 - Tamaño de la memoria de comando y tiempo de resolución,
 - Velocidad de transmisión de datos o cantidad de datos.
- Control térmico:
 - Límites de temperatura (operativos/no operativos)
 - Rechazo de calor a la nave espacial (promedio/pico de vataje/ciclo de operación)

Tarea 19 Seleccionar el enfoque de operaciones de la misión:

- Arquitectura de comunicación:
 - Número y distribución de estaciones terrestres,
 - Diseño de medios de enlace/conexión de bajada (downlink) y enlace/conexión de subida (uplink),
 - Características de enlace cruzado, si se usan,
 - Satélites de transmisión utilizados¹¹,

¹¹ Satélites de transmisión (relay satellites). Iniciado a principios de la década de 1970, el satélite de rastreo y transmisión de datos (Tracking and Data Relay Satellite TDRS) comprende el segmento espacial de la Red Espacial (Space Network). El centro Goddard de Vuelos Espaciales de la NASA gestiona el desarrollo y las operaciones de las naves espaciales TDRS. TDRS puede proporcionar enlaces de comunicación casi constantes entre Tierra y los satélites en órbita.

- Estimación del enlace de comunicaciones,
- Velocidad de transmisión de datos Espacio-Tierra.
- Operaciones:
 - Nivel de autonomía,
 - Líneas de software de código que se crearán,
 - Personal a tiempo completo o tiempo parcial,
 - Número de personal,
 - Cantidad de comando requerida,
 - Rapidez en la distribución de datos.
- Sistema terrestre:
 - Uso de instalaciones ya existentes o exclusivas,
 - Características de transmisión y recepción requeridas,
 - Manejo de datos requerido.

Tarea 20 Diseñar de la nave espacial o satélite para alcanzar los requerimientos de la carga útil, órbita y comunicaciones:

- Disposición general incluyendo campos de visión de la carga útil (desplegado y estibado),
- Diagrama de bloques funcional,
- Propiedades de masa, por fase de misión (masa y momentos de inercia),
- Resumen de características de los subsistemas:
 - Energía eléctrica,
 - Control de orientación,
 - Control de navegación y órbita,

La configuración actual de seguimiento y transmisión de datos por satélite consta de 10 satélites en órbita, distribuidos para proporcionar un servicio de retransmisión de información casi continuo a misiones como: El Telescopio Espacial Hubble y la Estación Espacial Internacional.

- Telemetría y comando,
 - Computadora,
 - Propulsión,
 - Comunicaciones,
 - Estructura primaria y despleables,
 - Requerimientos térmicos únicos,
 - Cronología/sincronización (resolución y exactitud).
- Parámetros del sistema:
 - Tiempo de vida y confiabilidad,
 - Nivel de autonomía.

Tarea 21 Seleccionar sistema de lanzamiento y órbita de transferencia.

Tarea 22 Determinar las estrategias de logística, despliegue, reabastecimiento, y eliminación o retirada de la nave espacial o satélite.

Tarea 23 Proporcionar soporte de costos para la actividad de definición de concepto.

Fase	Paso	Descripción del Paso	Tarea	Descripción de la Tarea	Tarea de nivel inferior
Caracterización de la misión	3	Definir conceptos de misión alternativos	8	Definir conceptos de misión alternativos	
	4	Definir arquitecturas de misión alternativas	9	Identificar alternativas para la arquitectura de la misión	Identificar los elementos de la misión que permitan varias opciones Identificar las opciones principales para cada uno de los elementos que pueden tener más de una opción Construir un árbol con las posibles opciones viables Podar el árbol de posibles combinaciones, eliminando las combinaciones no realistas Buscar nuevas alternativas
	5	Identificar los sistemas estratégicos de cada alternativa de arquitectura	10	Identificar las áreas de interés: rendimiento, costo, riesgo o planeación/cronograma	
			11	Identificar los parámetros que miden las áreas de interés	
			12	Desarrollar algoritmos de primer orden	
			13	Examinar los factores	
			14	Buscar sistemas estratégicos ocultos	
	6	Caracterizar los conceptos y arquitecturas de la misión	15	Definir un concepto de misión preliminar utilizando los elementos clave	
			16	Definir las características del sujeto de estudio	
			17	Determinar las características de la órbita y de la constelación	
			18	Determinar el tamaño y desempeño de la carga útil	
			19	Seleccionar el enfoque de operaciones de la misión	
			20	Diseñar de la nave espacial o satélite para alcanzar los requerimientos de la carga útil, órbita y comunicaciones	
			21	Seleccionar sistema de lanzamiento y órbita de transferencia	
			22	Determinar las estrategias de logística, despliegue, reabastecimiento, y eliminación o retirada de la nave espacial o satélite	
			23	Proporcionar soporte de costos para la actividad de definición de concepto	

Figura 4-3 SMAD Fase: Caracterización de la misión. Propuesta por la autora.

Fase 3: Evaluación de la misión: (Figura 4-4)**Paso 7: Identificar requerimientos críticos:**

Tarea 24 Observar los principales requerimientos de rendimiento.

Tarea 25 Analizar los requerimientos críticos más comunes y determinar cuáles de estos impactan el diseño del sistema, rendimiento o costo.

Lista de requerimientos críticos más comunes:

- Cobertura o tiempo de respuesta,
- Resolución,
- Sensibilidad,
- Exactitud de mapeo,
- Potencia de transmisión
- Tiempo de vida en órbita,
- Supervivencia.

Tarea 26 Observar los requerimientos de nivel superior establecidos cuando los objetivos de la misión fueron definidos durante la Fase 1, determinar cómo serán alcanzados. Para cada uno de los requerimientos, preguntar si el cumplimiento de este limita fundamentalmente el diseño, costo o rendimiento del sistema.

Tarea 27 Buscar requerimientos ocultos.

Paso 8: Evaluación de la utilidad de la misión:

Tarea 28 Identificar parámetros de rendimiento. Por ejemplo:

- Estadísticas de cobertura,
- Eficiencia de potencia,
- Resolución de un instrumento en particular

Tarea 29 Identificar mediciones de efectividad o figuras de mérito que cuantifican que tan bien el sistema cumple con los objetivos de la misión. El objetivo es estimar medidas de efectividad como función de un parámetro clave. Por ejemplo:

- Meta: Detección → Figura de Mérito: Probabilidad de detección contra tiempo → ¿Cómo estimarla?: Simulación.

- Meta: Conocimiento inmediato → Figura de Mérito: Desfase de tiempo. Tiempo desde la observación hasta la disponibilidad en la oficina de monitoreo → ¿Cómo estimarlo?: Análisis.

- Meta: Monitoreo → Figura de Mérito: Probabilidad de contención → ¿Cómo estimarla?: Simulación.

- Meta: Salvar la propiedad y reducir el costo → Figura de Mérito: Valor de la propiedad salvada más los ahorros de los costos provenientes en el combate de fuego → ¿Cómo estimarlo?: Simulación y Análisis.

Tarea 30 Simulación de la utilidad de la misión.

Paso 9: Definir el concepto de la misión (punto de referencia):

Tarea 31 Seleccionar uno o más enfoques de concepto de la misión como punto de referencia.

Fase	Paso	Descripción del Paso	Tarea	Descripción de la Tarea	Tarea de nivel inferior
Evaluación de la misión	7	Identificar requerimientos críticos	24	Observar los principales requerimientos de rendimiento	
			25	Analizar los requerimientos críticos más comunes	
			26	Observar los requerimientos de nivel superior	
			27	Buscar requerimientos ocultos	
	8	Evaluación de la utilidad de la misión	28	Identificar parámetros de rendimiento	
			29	Identificar mediciones de efectividad o figuras de mérito	
			30	Simulación de la utilidad de la misión	
	9	Definir el concepto de la misión (punto de referencia)	31	Seleccionar uno o más enfoques de concepto de la misión como punto de referencia	

Figura 4-4 SMAD Fase: Evaluación de la misión. Propuesta por la autora.

Fase 4: Definición de requerimientos: (Figura 4-5)**Paso 10: Definición de requerimientos del sistema:**

Tarea 32 Crear equipos de trabajo integrados multidisciplinarios por sistemas.

Tarea 33 Identificar al cliente y usuario final del producto o servicios.

Tarea 34 Identificar y priorizar los objetivos y necesidades de la misión del cliente/usuario que deberán ser cumplidas.

Tarea 35 Definir limitaciones internas y externas.

Tarea 36 Traducir las necesidades del cliente/usuario a atributos funcionales y características del sistema.

a) Se recomienda utilizar la herramienta de: despliegue de la función de calidad (Quality Function Deployment QFD).

Paso 11: Asignación de requerimientos a los elementos del sistema:

Tarea 37 Establecer los requerimientos funcionales para los sistemas y proporcionar la descomposición de los elementos.

Tarea 38 Establecer el flujo funcional y representativo para su desempeño de funciones.

Tarea 39 Traducir los atributos funcionales a características técnicas, las cuales se convertirán en requerimientos para el sistema físico.

Tarea 40 Establecer requerimientos cuantificables de todos los pasos anteriores.

Tarea 41 Utilizar el diagrama de bloques para expresar las interfaces y relaciones hardware/software/datos para el nivel del sistema.

Tarea 42 A partir de la arquitectura definida en el paso 9, descomponer los requerimientos funcionales y conjuntos de características a niveles inferiores, es decir, el siguiente nivel que define la base de los elementos del sistema.

Tarea 43 Iterar.

Fase	Paso	Descripción del Paso	Tarea	Descripción de la Tarea	Tarea de nivel inferior	
Definición de requerimientos	10	Definición de requerimientos del sistema	32	Crear equipos de trabajo integrados multidisciplinares por sistemas		
			33	Identificar al cliente y usuario final del producto o servicios		
			34	Identificar y priorizar los objetivos y necesidades de la misión del cliente/usuario que deberán ser cumplidas		
			35	Definir limitaciones internas y externas		
			36	Traducir las necesidades del cliente/usuario a atributos funcionales y características del sistema		Quality Function Deployment
			37	Establecer los requerimientos funcionales para los sistemas y proporcionar la descomposición de los elementos		
	38	Establecer el flujo funcional y representativo para su desempeño de funciones				
	39	Traducir los atributos funcionales a características técnicas, las cuales se convertirán en requerimientos para el sistema físico				
	40	Establecer requerimientos cuantificables de todos los pasos anteriores				
	41	Utilizar el diagrama de bloques para expresar las interfaces y relaciones hardware/software/datos para el nivel del sistema				
	42	Utilizando el concepto de referencia descomponer los requerimientos funcionales y conjuntos de características a niveles inferiores, es decir, el siguiente nivel que define la base de los elementos del sistema				
	43	Iterar				

Figura 4-5 SMAD Fase: Definición de requerimientos. Propuesta por la autora.

4.2. Estándares de la Cooperación Europea para la Estandarización del Espacio

La metodología propuesta por la Agencia Espacial Europea (ESA) está contenida en los estándares ECSS. Esta metodología comprende siete fases para el ciclo de vida de la misión, el proceso de diseño se describe en las primeras tres fases. En la siguiente sección se presentará un breve resumen de todas las tareas dentro del ciclo de vida de la misión y las revisiones que acompañan cada una de estas fases, con el propósito de describir toda la metodología descrita en los estándares ECSS.

En la figura 4-6 se muestra la estructura de la metodología de los estándares ECSS que es utilizada en este documento. El propósito de que persigue mostrar la estructura de esta manera es el de poder realizar una comparación uno a uno con la metodología SMAD descrita anteriormente.

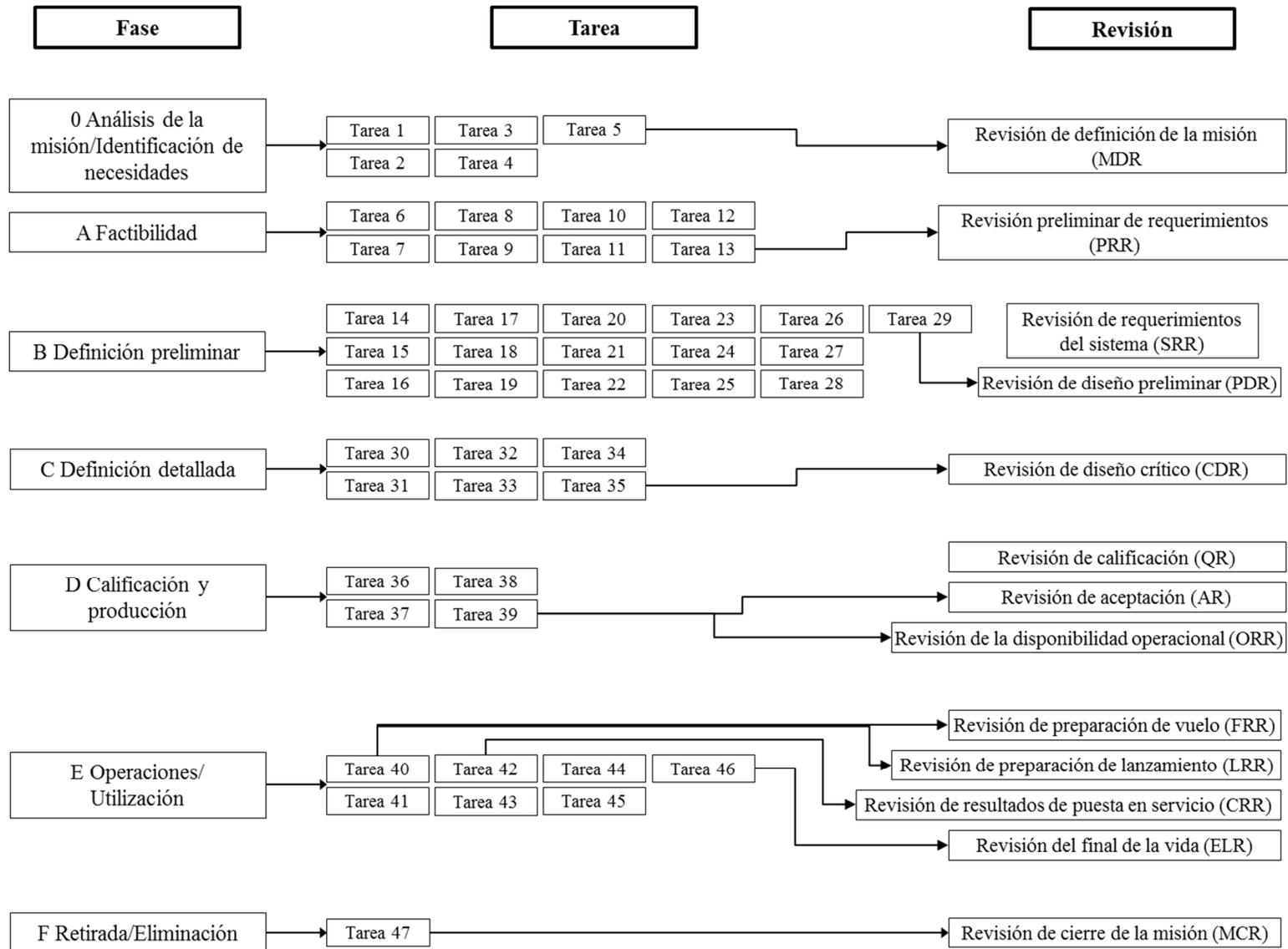


Figura 4-6 Estructura estándares ECSS. Propuesta por la autora.

Los estándares ECSS describen revisiones y las respectivas partes interesadas requeridas para cada fase, en algunos casos más de una revisión es recomendada. Los estándares contienen guías cuyo propósito es explicar cómo dirigir y realizar las revisiones, quien debe asistir y las responsabilidades de cada uno de los asistentes, cuáles son los objetivos y entregables y cómo administrar las acciones que resulten de estas revisiones. Otra contribución importante de los estándares ECSS es la descripción detallada de la documentación preferida que debe completarse a través del ciclo de vida de la misión.

A continuación, se muestra la descripción a detalle de la metodología, dividida en tareas y revisiones en cada fase:

Fase 0: Análisis de la misión/Identificación de necesidades: (Figura 4-7)

Tarea 1 Declaración de la misión.

Tarea 2 Desarrollar la especificación preliminar de requerimientos técnicos.

Tarea 3 Posibles conceptos de misión.

Tarea 4 Evaluación preliminar del aspecto programático respaldado por estudios económicos y de mercado.

Tarea 5 Realizar análisis de riesgos preliminar.

Revisión: Revisión de definición de la misión (MDR).

1. Evaluar la preparación del proyecto para pasar a la fase A.
2. Publicar la declaración de la misión.
3. Evaluar las especificaciones técnicas preliminares de los requerimientos y los aspectos programáticos.

Estándares ECSS				
Fase	Fase	Tarea	Descripción de la Tarea	Revisiones
0	Análisis de la misión/ Identificación de necesidades	1	Declaración de la misión	
		2	Especificación preliminar de requerimientos técnicos.	
		3	Posibles conceptos de misión	
		4	Evaluación preliminar del aspecto programático respaldado por estudios económicos y de mercado	
		5	Análisis de riesgos preliminar	

Figura 4-7 ECSS Fase 0: Análisis de la misión/Identificación de necesidades. Propuesta por la autora.

Fase A: Factibilidad: (Figura 4-8)

Tarea 6 Elaboración de planes preliminares de: gestión de proyecto, ingeniería del sistema y certeza de operaciones para el producto.

Tarea 7 Posibles conceptos de operaciones y arquitectura del sistema.

Tarea 8 Árbol de funciones.

Tarea 9 Evaluar la factibilidad técnica y programática de los posibles conceptos mediante la identificación de las limitaciones relacionadas con la implementación, costos, cronograma, organización, operaciones, mantenimiento, producción y retirada/eliminación.

Tarea 10 Identificar las tecnologías críticas y proponer actividades previas al desarrollo.

Tarea 11 Cuantificar y caracterizar elementos críticos en términos de factibilidad técnica y económica.

Tarea 12 Proponer conceptos de sistemas y operaciones y soluciones técnicas, incluyendo la filosofía de modelo y el enfoque de verificación.

Tarea 13 Elaborar el análisis de riesgos.

Revisión: Revisión preliminar de requerimientos (PRR).

1. Evaluar la preparación del proyecto para pasar a la fase B.
2. Liberar los planes preliminares de gestión del producto, ingeniería y certeza de operación para el producto.
3. Liberar las especificaciones de los requerimientos técnicos.
4. Confirmar la factibilidad técnica y programática del (los) concepto (s) del sistema.
5. Seleccionar el (los) concepto (s) del sistema y operaciones y soluciones técnicas, incluyendo la filosofía de modelo y el enfoque de verificación, que serán trasladados a la fase B.

Fase	Fase	Tarea	Descripción de la Tarea	Revisiones
A	Factibilidad	6	Elaboración de planes preliminares de: gestión de proyecto, ingeniería del sistema, y certeza de operaciones para el producto	
		7	Posibles conceptos de operaciones y arquitectura del sistema	
		8	Árbol de funciones	
		9	Evaluar la factibilidad técnica y programática de los posibles conceptos mediante la identificación de las limitaciones relacionadas con la implementación, costos, cronograma, organización, operaciones, mantenimiento, producción y retirada/eliminación	
		10	Identificar las tecnologías críticas y proponer actividades previas al desarrollo	
		11	Cuantificar y caracterizar elementos críticos en términos de factibilidad técnica y económica	
		12	Proponer conceptos de sistemas y operaciones y soluciones técnicas, incluyendo la filosofía de modelo y el enfoque de verificación	
		13	Elaborar el análisis de riesgos	
				Revisión preliminar de requerimientos (PRR)

Figura 4-8 ECSS Fase A: Factibilidad. Propuesta por la autora.

Fase B: Definición preliminar: (Figura 4-9)

Revisión: Revisión de requerimientos del sistema (SRR). Esta revisión se lleva a cabo durante el desarrollo de la fase B.

1. Liberar las especificaciones actualizadas de los requisitos técnicos.
2. Evaluar la definición de diseño preliminar.
3. Evaluar el programa de verificación preliminar

Tarea 14 Finalizar los planes de: gestión de proyecto, ingeniería y certeza de operaciones para el producto.

Tarea 15 Establecer la planeación y cronogramas maestros.

Tarea 16 Elaborar el costo total de referencia.

Tarea 17 Elaborar la estructura de desglose organizacional preliminar.

Tarea 18 Confirmar las soluciones técnicas para los sistemas y conceptos de operaciones y su factibilidad con respecto a las restricciones programáticas.

Tarea 19 Conducir estudios de soluciones intermedias o de compensación (trade-off) y seleccionar el sistema preferido junto con las soluciones técnicas para este concepto.

Tarea 20 Establecer una definición preliminar de diseño para el concepto de sistema seleccionado y sus soluciones técnicas.

Tarea 21 Determinar el programa de verificación incluyendo la filosofía de modelo.

Tarea 22 Identifica y definir las interfaces internas y externas.

Tarea 23 Preparar las especificaciones de siguiente nivel y los documentos de acuerdos comerciales relacionados.

Tarea 24 Iniciar el trabajo previo al desarrollo de tecnologías críticas o áreas de diseño de sistema cuando sea necesario para reducir los riesgos de desarrollo.

Tarea 25 Iniciar las adquisiciones de elementos con plazo de entrega largos para cumplir con las necesidades del cronograma del proyecto.

Tarea 26 Preparar el plan de mitigación de basura espacial y el plan de eliminación/retirada.

Tarea 27 Realizar las evaluaciones de confiabilidad y seguridad.

Tarea 28 Finalizar el árbol del producto, la estructura desglosada de trabajo y el árbol de especificaciones.

Tarea 29 Actualizar la evaluación de riesgos.

Revisión: Revisión de diseño preliminar (PDR).

1. Evaluar la preparación del proyecto para pasar a la fase C.
2. Verificar los diseños preliminares de los conceptos seleccionados y soluciones técnicas contra los requerimientos del proyecto y sistemas.
3. Liberar los planes de gestión de proyecto, ingeniería y certeza de operación para el producto.
4. Liberar el árbol del producto, la estructura desglosada de trabajo y el árbol de especificaciones.
5. Liberar el plan de verificación, incluyendo la filosofía de modelo.

Fase	Fase	Tarea	Descripción de la Tarea	Revisiones
B	Definición preliminar	14	Finalizar los planes de: gestión de proyecto, ingeniería y certeza de operaciones para el producto	Revisión de requerimientos del sistema (SRR)
		15	Establecer la planeación y cronogramas maestros	
		16	Elaborar el costo total de referencia	
		17	Elaborar la estructura de desglose organizacional preliminar	
		18	Confirmar las soluciones técnicas para los sistemas y conceptos de operaciones y su factibilidad con respecto a las restricciones programáticas	
		19	Conducir estudios de soluciones intermedias o de compensación (trade-off) y seleccionar el sistema preferido junto con las soluciones técnicas para este concepto	
		20	Establecer una definición preliminar de diseño para el concepto de sistema seleccionado y sus soluciones técnicas	
		21	Determinar el programa de verificación incluyendo la filosofía de modelo	
		22	Identifica y definir las interfaces internas y externas	
		23	Preparar las especificaciones de siguiente nivel y los documentos de acuerdos comerciales relacionados	
		24	Iniciar el trabajo previo al desarrollo de tecnologías críticas o áreas de diseño de sistema cuando sea necesario para reducir los riesgos de desarrollo	
		25	Iniciar las adquisiciones de elementos con plazo de entrega largos para cumplir con las necesidades del cronograma del proyecto	
		26	Preparar el plan de mitigación de basura espacial y el plan de eliminación/retirada	
		27	Realizar las evaluaciones de confiabilidad y seguridad	
28	Finalizar el árbol del producto, la estructura desglosada de trabajo y el árbol de especificaciones			
29	Actualizar la evaluación de riesgos	Revisión de diseño preliminar (PDR)		

Figura 4-9 ECSS Fase B: Definición preliminar. Propuesta por la autora.

Fase C: Definición detallada: (Figura 4-10)

Tarea 30 Finalizar la definición de diseño detallado del sistema en todos los niveles.

Tarea 31 Producción, pruebas de desarrollo y precalificación de los elementos y componentes críticos seleccionados. Realizar pruebas de producción y desarrollo de modelos de ingeniería, según lo requerido por el enfoque de la filosofía de modelo y verificación seleccionados.

Tarea 32 Finalizar la planeación del ensamble, integración y pruebas de los sistemas y sus componentes.

Tarea 33 Definir a detalle las interfaces internas y externas.

Tarea 34 Emitir el manual del usuario de forma preliminar.

Tarea 35 Actualizar la evaluación de riesgos.

Revisión: Revisión de diseño crítico (CDR).

1. Evaluar la preparación del proyecto para pasar a la fase D.
2. Evaluar el estatus de calificación y validación de los procesos críticos y su preparación para el desarrollo de fase D.
3. Confirmar la compatibilidad con las interfaces externas.
4. Liberar el diseño final.
5. Liberar los planes de ensamble, integración y pruebas.
6. Liberar la producción, ensamble y prueba del software/hardware de vuelo.
7. Liberar el manual de usuario.

Fase	Fase	Tarea	Descripción de la Tarea	Revisiones
C	Definición detallada	30	Finalizar la definición de diseño detallado del sistema en todos los niveles	
		31	Producción, pruebas de desarrollo y precalificación de los elementos y componentes críticos seleccionados. Realizar pruebas de producción y desarrollo de modelos de ingeniería, según lo requerido por el enfoque de la filosofía de modelo y verificación seleccionados	
		32	Finalizar la planeación del ensamble, integración y pruebas de los sistemas y sus componentes	
		33	Definir a detalle las interfaces internas y externas	
		34	Emitir el manual del usuario de forma preliminar	
		35	Actualizar la evaluación de riesgos	
			Revisión de diseño crítico (CDR)	

Figura 4-10 ECSS Fase C: Definición detallada. Propuesta por la autora.

Fase D: Calificación y producción: (Figura 4-11)

Revisión: Revisión de calificación (QR). Esta revisión se lleva a cabo durante el desarrollo de la fase D.

1. Confirmar que el proceso de verificación ha demostrado que el diseño cumple con los requisitos aplicables, incluidos los márgenes.
2. Verificar que el registro de verificación esté completo en este y todos los niveles inferiores de la cadena cliente-proveedor.
3. Verificar la aceptabilidad de todas las exenciones y desviaciones.
4. Cuando el desarrollo comprende la producción de uno o varios productos recurrentes, la revisión de calificación se completa mediante una verificación de configuración funcional, cuyos objetivos son:
5. Analizar desde el punto de vista de reproducibilidad la primera configuración.
6. Liberar los archivos maestros de producción para las producciones en serie.
7. El cliente acepta el archivo de aprobación de producción en serie.

Tarea 36 Completa la prueba de calificación y actividades de verificación asociadas.

Tarea 37 Completa la manufactura, ensamble y prueba del hardware/software de asociado al soporte terrestre.

Tarea 38 Completa las pruebas de interoperabilidad entre el espacio y el segmento terrestre.

Tarea 39 Prepara el paquete de datos de aceptación.

Revisión: Revisión de aceptación (AR).

8. Evaluar la preparación del producto para la entrega.

9. Confirma que el proceso de verificación ha demostrado que el producto está libre de errores de fabricación y está listo para su posterior uso operativo.
10. Verifica que el registro de verificación de aceptación esté completo en este y todos los niveles inferiores en la cadena cliente-proveedor.
11. Verifica que todos los productos entregados estén disponibles de acuerdo a la lista de artículos aprobados.
12. Verifica el producto “tal como está construido” y sus componentes contra el producto requerido “como está diseñado” y sus componentes constituyentes.
13. Verifica la aceptabilidad de las exenciones y desviaciones.
14. Verifica que el paquete de datos de aceptación esté completo.
15. Autoriza la entrega del producto.
16. Libera el certificado de aceptación.

Revisión: Revisión de la disponibilidad operacional (ORR).

1. Verifica la preparación de los procedimientos operacionales y su compatibilidad con el sistema de vuelo.
2. Verifica la preparación de los equipos de operaciones.
3. Acepta y libera el segmento terrestre para las operaciones.

Fase	Fase	Tarea	Descripción de la Tarea	Revisiones
D	Calificación y producción	36	Completa la prueba de calificación y actividades de verificación asociadas	Revisión de calificación (QR)
		37	Completa la manufactura, ensamble y prueba del hardware/software de asociado al soporte terrestre	
		38	Completa las pruebas de interoperabilidad entre el espacio y el segmento terrestre	
		39	Prepara el paquete de datos de aceptación	
				Revisión de la disponibilidad operacional (ORR)

Figura 4-11 ECSS Fase D: Calificación y Producción. Propuesta por la autora.

Fase E: Operaciones/Utilización: (Figura 4-12)

Tarea 40 Realizar todas las operaciones a nivel segmento espacial y terrestre para preparar el lanzamiento.

Revisión: Revisión de preparación de vuelo (FRR).

1. Verificar que los segmentos espaciales y terrestres estén listos para el lanzamiento, incluyendo todos los sistemas de soporte, por ejemplo: sistema de rastreo, sistema de comunicaciones y sistemas de seguridad.

Revisión: Revisión de preparación de lanzamiento (LRR).

1. Declarar la preparación del vehículo de lanzamiento, de los segmentos espacial y terrestre, incluyendo todos los sistemas de soporte, por ejemplo: sistema de rastreo, sistema de comunicación y sistemas de seguridad.
2. Brindar la autorización para proceder con el lanzamiento.

Tarea 41 Realiza todas las operaciones orbitales iniciales y operaciones de lanzamiento.

Tarea 42 Realiza las actividades de verificación en órbita (incluidas las actividades de puesta en servicio).

Revisión: Revisión de resultados de puesta en servicio (CRR).

1. Permite declarar la preparación para la rutina de operaciones/utilización.
2. Esta revisión se lleva a cabo después de la finalización de una serie de pruebas en órbita diseñadas para verificar que todos los elementos del sistema funcionan dentro de los parámetros de rendimiento especificados.

- Marcar el traspaso formal del sistema al iniciador del proyecto o al operador del sistema.

Tarea 43 Realiza todas las operaciones en órbita para alcanzar los objetivos de la misión.

Tarea 44 Realiza todas las actividades del segmento terrestre para soportar la misión.

Tarea 45 Realiza todas las demás actividades de apoyo en Tierra para soportar la misión.

Tarea 46 Finaliza el plan de eliminación o retirada.

Revisión: Revisión del final de la vida (ELR).

1. Verificar que la misión a completado su operación o servicio útil.
2. Garantizar que todas las actividades de retirada o eliminación de la misión se completen adecuadamente.

Fase	Fase	Tarea	Descripción de la Tarea	Revisiones
E	Operaciones/Utilización	40	Realizar todas las operaciones a nivel segmento espacial y terrestre para preparar el lanzamiento	
				Revisión de preparación de vuelo (FRR)
				Revisión de preparación de lanzamiento (LRR)
		41	Realiza todas las operaciones orbitales iniciales y operaciones de lanzamiento	
		42	Realiza las actividades de verificación en órbita (incluidas las actividades de puesta en servicio)	
				Revisión de resultados de puesta en servicio (CRR)
		43	Realiza todas las operaciones en órbita para alcanzar los objetivos de la misión	
		44	Realiza todas las actividades del segmento terrestre para soportar la misión	
		45	Realiza todas las demás actividades de apoyo en Tierra para soportar la misión	
		46	Finaliza el plan de eliminación o retirada	
		Revisión del final de la vida (ELR)		

Figura 4-12 ECSS Fase E: Operaciones/Utilización. Propuesta por la autora.

Fase F: Retirada/Eliminación: (Figura 4-13)

Tarea 47 Implementación del plan de eliminación o retirada.

Revisión: Revisión de cierre de la misión (MCR).

1. Garantizar que todas las actividades de retirada o eliminación de la misión se completen adecuadamente.

Fase	Fase	Tarea	Descripción de la Tarea	Revisiones
F	Retirada/ Eliminación	47	Implementación del plan de eliminación o retirada	Revisión de cierre de la misión (MCR)

Figura 4-13 ECSS Fase F: Retirada/Eliminación. Propuesta por la autora.

4.3. Introducción a la comparación del proceso de diseño

Para comenzar la comparación y combinación entre estas dos metodologías, el análisis presentado en esta sección comenzará con el proceso del ciclo de diseño (contenido en las primeras tres fases de la metodología europea y los once pasos en el proceso SMAD).

Ambas metodologías cubren el proceso de diseño utilizando diferentes enfoques y herramientas, pero entre ambas metodologías existen tareas y herramientas comunes utilizadas para lograr un exitoso diseño de la misión.

Las principales diferencias entre ambas metodologías radican en:

1. Las estructuras que cada metodología muestra,
2. La profundidad que cada metodología utiliza para describir las tareas.

La metodología SMAD provee una guía más detallada de cómo elegir posibles arquitecturas de la misión. En el caso de la metodología europea se ofrece al lector una descripción a detalle de tareas y recursos del campo de gestión de proyectos. Resumiendo, la metodología SMAD está enfocada en los aspectos prácticos de la y

3. La definición de requerimientos. En la metodología SMAD se propone el establecer los requerimientos de la misión basándose en los posibles
4. Revisiones: La descripción detallada de las revisiones requeridas por la metodología europea.

Las diferencias entre ambas metodologías de diseño radican en que la metodología establecida por los estándares ECSS tiene como primeros pasos el establecer los objetivos requerimientos, y limitaciones de la misión espacial.

Una vez que se han establecido los requerimientos del sistema espacial se procede a

En paralelo a estas tareas los planes de: gestión de proyecto, ingeniería del sistema, certeza de operaciones para el producto, mitigación de basura espacial y eliminación/retirada son elaborados. La metodología SMAD menciona la importancia de los requerimientos que

afectarán al costos, planeación y cronograma, riesgos y rendimiento, pero los ataca desde un punto de vista referido a los diferentes sistemas espaciales uno a uno

Un concepto que la metodología SMAD no desarrolla a través de la bibliografía de manera explícita es la filosofía de modelo, esto es, el seleccionar los tipos de modelos que serán desarrollados a lo largo del ciclo de vida de la misión espacial, mientras que la metodología europea en el paso 21 se determina la filosofía de modelo de la misión.

Los modelos más utilizados por la industria en compañías de ingeniería espacial son (Taylor, 2013):

- Placa de pruebas o protoboard de ingeniería (engineering breadboard EBB): Este es el prototipo de electrónicos inicial y su funcionamiento es solo representativo del módulo final. Esto permite que se tenga en cuenta el diseño de empaquetado más complicado en las siguientes fases. Este prototipo utilizará FPGAs comerciales reprogramables a diferencia de FPGAs de grado espacial OTP. Este es un modelo en que se pueden llevar a cabo tantas revisiones como sean necesarias hasta que se cumpla la función como realmente sea requerida.

- Modelo de ingeniería (Engineering Model EM): Este modelo es el mismo en forma, ajuste y funcionamiento que el modelo de vuelo final; sin embargo, utilizará una combinación de componentes de grado de vuelo y componentes comerciales.

- Modelo de calificación de ingeniería (Engineering Qualification Model EQM): Este es el modelo que está sujeto a la campaña de calificación. Generalmente incluye actualizaciones de diseño del modelo de ingeniería y utiliza componentes idénticos al modelo de vuelo; sin embargo, estos componentes no necesitan ser seleccionados según el estándar de vuelo.

- Modelo proto vuelo (Proto Flight Model): Este es un modelo de vuelo que está sujeto a los mismos niveles de calificación que el modelo de calificación de ingeniería. Algunas veces, por cuestiones de costos, este modelo vuela.

- Modelo de vuelo (Flight Model): Este es el modelo que volará. Este modelo se prueba con pruebas de nivel de aceptación.

De acuerdo con el Imperial College London, la filosofía de modelo en proyectos espaciales es (Imperial College London, Citado: 2018):

- Etapa de placa de pruebas o protoboard (Breadboard stage): Para probar que el concepto del instrumento funciona y puede proporcionar las medidas previstas. Es probable que la placa no aparezca en el instrumento terminado y usará diferentes componentes, pero la operación básica será la misma. La placa de pruebas se utiliza en todo el programa de desarrollo, ya que forma el banco de pruebas para el desarrollo de software de FPGA.

- Modelo estructural y térmico (Structural and Thermal model): Este modelo tendrá propiedades mecánicas y térmicas representativas para el instrumento final. Permite la prueba completa del comportamiento térmico y mecánico de la nave espacial.

- Modelo eléctrico (Electrical model): Este modelo es una etapa de la placa de pruebas o protoboard, y tendrá la misma funcionalidad que el instrumento terminado. Demostrará que el diseño del instrumento se puede integrar en los datos de la nave espacial y los buses de potencia. Las partes utilizadas serán versiones comerciales de los componentes de calidad espacial para el diseño final.

- Modelo de calificación (Qualification model): Este modelo será completamente representativo del instrumento final. Los componentes utilizados serán del mismo tipo y especificación que los modelos construidos para volar, y serán piezas especialmente diseñadas para sobrevivir el entorno espacial. Será sujeto a pruebas hasta los límites de las condiciones ambientales operacionales y no operativas especificadas para que el instrumento perdure. Esto incluirá los ciclos térmicos en vacío y pruebas de vibración. Estará también sujeto a pruebas de compatibilidad electromagnética.

- Modelo de vuelo (Flight model): Este es el modelo que volará. Será del mismo diseño y utilizará los mismos componentes de especificación que el modelo de calificación. Será rigurosamente probado hasta las condiciones ambientales de nivel de aceptación.

- Repuesto de vuelo (Flight spare): Este instrumento será representativo del modelo de vuelo en todos los sentidos y se utilizará para cualquier prueba que deba realizar sobre el terreno para prepararse para las operaciones en vuelo una vez que se haya lanzado la misión.

4.3.1. Configuración de tablas de comparación

En la parte izquierda de las tablas 4.1 a 4.7 se presenta la metodología europea contenida en los estándares ECSS, la parte derecha de las tablas muestra la metodología descrita en el proceso SMAD.

La configuración de las tablas 4.1 a 4.7 es la misma: Comenzando de izquierda a derecha las cinco primeras columnas muestran la metodología expresada por los estándares ECSS y de la columna seis a la columna diez muestra la metodología descrita en el proceso SMAD.

Columna 1: Identificador de la fase del ciclo de vida de los estándares ECSS:

- 0 → Análisis de la misión/Identificación de necesidades.
- A → Factibilidad.
- B → Definición preliminar.
- C → Definición detallada.
- D → Calificación y producción.
- E → Operaciones/Utilización.
- D → Retirada/Eliminación.

Columna 2: Nombre de la fase del ciclo de vida de los estándares ECSS: Análisis de la misión/Identificación de necesidades, Factibilidad, Definición preliminar, Definición detallada, Calificación y producción, Operaciones/Utilización y Retirada/Eliminación.

Columna 3: Número de tarea.

Columna 4: Descripción de la tarea.

Columna 5: Revisiones requeridas.

Columna 6: Nombre de la fase del ciclo de vida en el proceso SMAD:

- Definición de objetivos.
- Caracterización de la misión.
- Evaluación de la misión.
- Definición de los requerimientos.

Columna 7: Número de paso.

Columna 8: Descripción del paso.

Columna 9: Número de la tarea.

Columna 10: Descripción de la tarea.

Las tareas mostradas para cada una de las metodologías son presentadas de manera secuencial. La disposición gráfica utilizada en la tabla tiene la intención de mostrar la correspondencia entre las tareas de ambas metodologías.

4.4. Comparación del proceso de diseño

En la tabla 4-1 se muestra el comienzo del proceso de diseño. En los estándares ECSS la fase que da comienzo a este proceso es la **Fase 0: Análisis de la misión/Identificación de necesidades**, ésta primera fase en el proceso SMAD es conocida como **Fase 1: Definición de Objetivos**.

La Fase 0 comienza con la ECSS Tarea 1: Definición de la declaración de la misión. La metodología SMAD no contempla esta actividad debido a que la bibliografía establece que la declaración de la misión fue identificada y conocida por todos los actores dentro del diseño de la misión espacial antes de que comience el proceso de diseño.

ECSS Tarea 1 establece la especificación preliminar de requisitos técnicos y esta tarea es cubierta por las tareas SMAD 1-7: SMAD Tarea 1: Identificar objetivos principales de la

mission, SMAD Tarea 2: Identificar objetivos secundarios de la mission, SMAD Tarea 3: Identificar los objetivos adicionales y la agenda oculta, SMAD Tarea 4 Identificar las características del espacio que se explotarán con la misión, SMAD Tarea 5: Identificar requerimientos funcionales, SMAD Tarea 6: Identificar los requerimientos operacionales y SMAD Tarea 7: Identificar las limitaciones.

Es importante mencionar que la SMAD Tarea 4 no se describe explícitamente en la metodología ECSS, esta tarea se centra en el análisis de las ventajas de utilizar sistemas espaciales versus sistemas terrestres como solución para el proyecto de la misión. Durante esta tarea el grupo evalúa si los beneficios de usar sistemas espaciales son los suficientemente altos para justificar el proyecto espacial, o si el uso de un enfoque en Tierra generará los mismos o mejores resultados a un menor costo.

Una vez que el equipo ha establecido todos los objetivos, requerimientos preliminares y limitaciones de la misión, y que todas las partes involucradas en la fase de diseño de la misión los conocen, la siguiente tarea en la metodología ECSS es ECSS Tarea 3: Establecer los posibles conceptos de misión. En esta etapa el proceso SMAD comienza la **Fase 2: Caracterización de la misión**. SMAD Tarea 8 establece el mismo objetivo que ECSS Tarea 3, en ambas tareas serán definidas varios conjuntos de opciones, centrándose en las operaciones de la misión:

1. Transmisión de datos.
2. Arquitectura de comunicación.
3. Asignación de tareas, planificación y control.
4. Cronograma de la misión.

Después que la identificación de posibles conceptos de mission comienza la ECSS Tarea 4: Evaluación preliminar del aspecto programático respaldado por estudios económicos y de mercado, seguido por la ECSS Tarea 5: Evaluación preliminar de riesgos. Estas dos tareas no se ven reflejadas en la metodología SMAD, sin embargo, ECSS Tarea 4 puede compararse con

las tareas SMAD Tarea 22 y SMAD tarea 23, más adelante en este documento se explicará la relación entre estas tareas.

La ECSS Tarea 4 sigue un enfoque de gestión, cuyo objetivo es establecer un programa de referencia basado en el mercado actual y la situación económica, la cual evolucionará a lo largo de las fases de diseño; esta tarea dará una primera aproximación de cómo se podría hacer el proyecto, el costo de los principales elementos claves de la misión y un cronograma general del proyecto.

La ECSS Tarea 5: Evaluación preliminar de riesgos, comienza en esta fase con la identificación de la política de gestión de riesgos y cómo se aplicará esta política durante la fase de diseño.

Al final de la Fase 0 (Análisis de la misión/Identificación de necesidades) la revisión asociada es: Revisión de definición de la misión (MDR), dicha revisión publicará la declaración de la misión y evaluará las especificaciones técnicas preliminares de los requerimientos y aspectos programáticos.

Tabla 4-1 Comparación 1. Estándares ECSS Fase 0 (Análisis de la misión/Identificación de necesidades) y Proceso SMAD Pasos:1, 2 y 3. Fase 1 (Definición de objetivos) y primera parte de la Fase 2 (Caracterización de la misión). Propuesta por la autora.

Estándares ECSS				Proceso SMAD			
Fase	Fase	Tarea	Revisiones	Fase	Descripción del Paso	Tarea	Tarea de nivel inferior
0	Análisis de la misión/Identificación de necesidades	1	Declaración de la misión	Definición de Objetivos	1	1	Identificar los objetivos primarios de la misión
		[Oculto]	[Oculto]			2	Identificar los objetivos secundarios de la misión
						3	Identificar los objetivos adicionales y la agenda oculta
						4	Identificar las características del espacio que se explotarán con la misión
					2	Estimación preliminar cuantitativa de necesidades, requerimientos y limitaciones de la misión	5
			6				Identificar los requerimientos operacionales
		7	Identificar las limitaciones				
		2	Especificación preliminar de requerimientos técnicos.	Caracterización de la misión	3	8	Definir conceptos de misión alternativos
		3	Posibles conceptos de misión				
		4	Evaluación preliminar del aspecto programático respaldado por estudios económicos y de mercado				
5	Análisis de riesgos preliminar	Revisión de definición de la misión (MDR)	[Oculto]	[Oculto]	[Oculto]	[Oculto]	
[Oculto]	[Oculto]						

La revisión MDR libera el proceso de diseño para continuar con la siguiente ECSS **Fase A: Factibilidad**, la fase en el proceso SMAD que corresponde a esta etapa es la ya inicializada **Fase 2: Caracterización de la misión**. La tabla 4-2 muestra una comparación de estas fases.

La ECSS Tarea 6 elabora los planes preliminares de gestión de proyecto, ingeniería del sistema y certeza de operaciones para el producto. Esta tarea en particular no está explícitamente definida en el proceso SMAD, el enfoque utilizado por la metodología SMAD es desarrollar planes similares para los sistemas una vez que los sistemas han sido definidos, estas tareas son SMAD Tarea 22 y SMAD Tarea 23.

Continuando con la metodología ECSS, ECSS Tarea 7 establece los posibles conceptos de operaciones y arquitectura de sistemas, esta tarea es igual a la SMAD Tarea 9: Identificar alternativas para la arquitectura de la misión.

Tareas: ECSS Tareas 3 y 7, y SMAD Tareas 8 y 9:

- ECSS Tarea 3 (posibles conceptos de misión) y ECSS Tarea 7 (posibles conceptos de operaciones y arquitectura de los sistemas)
- SMAD Tarea 8 (definir conceptos de misión alternativos) y SMAD Tarea 9 (identificar alternativas para la arquitectura de la misión).

La diferencia entre ECSS Tareas 3 y 7, y SMAD Tareas 8 y 9, recae en la profundidad de la caracterización de la misión. Mientras que en las tareas ECSS Tarea 3 y SMAD 8 la definición del concepto abarca elementos de las operaciones de la misión, en las tareas ECSS 7 y SMAD 9 la caracterización de la misión va más allá y cubre no solo las operaciones de la misión, sino también los elementos de la misión como:

- Sujeto de estudio,
- Carga útil,
- Plataforma o bus,
- Sistema de lanzamiento,

- Órbita y constelación,
- Sistema terrestre,
- Operaciones de la misión y
- Arquitectura del comando, control y las comunicaciones.

Para identificar estas arquitecturas alternativas, el proceso SMAD sugiere cinco tareas de nivel inferior secuenciales con la finalidad de identificar las opciones más viables. Aunque el objetivo de esta tarea es identificar tantas opciones como sea posible utilizando diferentes enfoques y tecnologías, es necesario identificar solo las opciones que son factibles (al menos a primera vista). Las cinco tareas de nivel inferior son:

- a) Identificar los elementos de la misión que permitan varias opciones,
- b) Identificar las opciones principales para cada uno de los elementos que pueden tener más de una opción,
- c) Construir un árbol con las posibles opciones viables,
- d) Podar el árbol de posibles combinaciones, eliminando las combinaciones no realistas,
- e) Buscar nuevas alternativas (que no hayan sido mencionadas anteriormente) que pudieran influenciar substancialmente como hacer la misión (costo, desempeño, simplicidad).

El proceso SMAD hace un énfasis mayor en la fase de cómo caracterizar la misión que la metodología ECSS. Es por esto que las SMAD Tareas 9-23 no tienen una réplica textual en tareas en la metodología ECSS. La razón de esta falta de duplicidad radica en que la descripción de cómo identificar y establecer los sistemas de misión se incluyen en estándares específicos para cada sistema. La SMAD Tarea 9 (identificar alternativas para la arquitectura de la misión) puede compararse con la tarea ECSS 7 y 8 (posibles conceptos de operaciones y arquitectura del sistema, y árbol de funciones).

En la ECSS Tarea 8, el árbol de funciones es el desglose de las acciones del sistema en funciones. Describe la descomposición jerárquica de las capacidades de un sistema o producto

en un nivel sucesivo de funciones y subfunciones, es por esto que la identificación de la arquitectura del sistema puede utilizar esta herramienta para establecer las características de cada uno de los elementos de la misión.

Cuando las alternativas de arquitecturas de la misión han sido definidas, dentro de la SMAD Fase 2: Caracterización de la misión, continúa el proceso con la identificación de los sistemas estratégicos de cada alternativa

Es la intención de la SMAD Tarea 10 es identificar las áreas de interés, por ejemplo: rendimiento, costo, riesgo y planeación/cronograma. SMAD Tarea 11 identifica los parámetros que miden las áreas de interés previamente identificadas.

En la SMAD Tarea 12 la idea es desarrollar algoritmos de primer orden o fórmulas para expresar la estimación de primer orden para el valor del parámetro de medición identificado previamente. Estos algoritmos mostrarán la influencia de factores sobre la efectividad o desempeño de las áreas de interés.

Una vez que los algoritmos han sido desarrollados la SMAD Tarea 13 requiere examinar los factores en estos algoritmos. Los factores que muestren las correspondencias más fuertes con los parámetros de medición serán definidos como los sistemas estratégicos

Finalmente, para poder terminar con la identificación de sistemas estratégicos la SMAD Tarea 14 recomienda buscar posibles sistemas estratégicos ocultos, que pudieran haber sido omitidos en las tareas previas, pero que tienen un efecto fuerte en los parámetros de medición.

Una vez establecidos los conceptos de misión alternativos, arquitecturas, y sistemas estratégicos, se deberá definir los conceptos de la misión con suficiente detalle para permitir una evaluación significativa de su efectividad.

La SMAD Tarea 15 refina la definición de los conceptos de misión. Comenzamos con un concepto general y refinamos este concepto a medida que definimos los diversos elementos de

la misión. Es por esto que este refinamiento se desarrollará en paralelo con las SMAD Tareas 16-23.

La SMAD Tarea 16 define las características del sujeto de estudio.

SMAD Tarea 17 determina las características de la órbita y según sea el caso de la constelación.

SMAD Tarea 18 determina el tamaño y el desempeño de la carga útil.

SMAD Tarea 19 se lleva a cabo la selección del enfoque de operaciones de la misión, los parámetros clave de las operaciones de la misión son: la arquitectura de la comunicación, las operaciones y el sistema terrestre.

Una vez que la órbita, carga útil y el enfoque de operaciones de la misión han sido definidos, en la SMAD Tarea 20 se diseña la nave espacial o satélite para cumplir con los requerimientos de la carga útil, órbita y comunicaciones.

La SMAD Tarea 21 selecciona el sistema de lanzamiento y órbita de transferencia.

Durante la SMAD Tarea 22, se determinan las estrategias de logística (proceso de planificación para suministrar y mantener la misión espacial a lo largo del tiempo), despliegue, reabastecimiento y eliminación o retirada de la nave espacial o satélite.

La SMAD Tarea 23 proporciona soporte de costos para la actividad de definición de concepto.

Las SMAD Tareas 22-23 pueden tener comparación con algunas de las tareas de los estándares ECSS, estas tareas son: ECSS Tarea 4: Evaluación preliminar del aspecto programático respaldado por estudios económicos y de mercado, ECSS Tarea 6: Elaboración de planes preliminares de: gestión de proyecto, ingeniería del sistema, y certeza de operaciones para el producto, y ECSS Tarea 26: Elaboración de planes preliminares de: gestión de proyecto, ingeniería del sistema, y certeza de operaciones para el producto. Mientras que en las tareas 4 y 6 de los estándares ECSS, el enfoque se centra en el proyecto en general de la misión espacial,

en la tarea 26 el enfoque está centrado en la misión de concepto final seleccionada. El enfoque utilizado en las tareas del proceso SMAD está centrado en crear estos mismos planes para todas las misiones alternativas identificadas.

Tabla 4-2 Comparación de Fase A (Factibilidad) Estándares ECSS y Fase 2 (Caracterización de la misión, pasos: 4, 5 y 6) proceso SMAD process. Parte I. Propuesta por la autora.

Estándares ECSS				Proceso SMAD								
Fase	Fase	Tarea	Revisiones	Fase	Descripción del Paso	Tarea	Tarea de nivel inferior					
A	Factibilidad	6	Elaboración de planes preliminares de: gestión de proyecto, ingeniería del sistema, y certeza de operaciones para el producto	Caracterización de la misión	4	Definir conceptos de misión alternativos	9	Identificar alternativas para la arquitectura de la misión	Identificar los elementos de la misión que permitan varias opciones			
		7	Posibles conceptos de operaciones y arquitectura del sistema				Identificar las opciones principales para cada uno de los elementos que pueden tener más de una opción					
		8	Árbol de funciones				Construir un árbol con las posibles opciones viables					
							Podar el árbol de posibles combinaciones, eliminando las combinaciones no realistas					
					5	Identificar los sistemas estratégicos de cada alternativa de arquitectura	10	Identificar las áreas de interés: rendimiento, costo, riesgo o planeación/cronograma	11	Identificar los parámetros que miden las áreas de interés	12	Desarrollar algoritmos de primer orden
							13	Examinar los factores	14	Buscar sistemas estratégicos ocultos	15	Definir un concepto de misión preliminar utilizando los elementos clave
							16	Definir las características del sujeto de estudio	17	Determinar las características de la órbita y de la constelación	18	Determinar el tamaño y desempeño de la carga útil
							19	Seleccionar el enfoque de operaciones de la misión	20	Diseñar de la nave espacial o satélite para alcanzar los requerimientos de la carga útil, órbita y comunicaciones	21	Seleccionar sistema de lanzamiento y órbita de transferencia
							22	Determinar las estrategias de logística, despliegue, reabastecimiento, y eliminación o retirada de la nave espacial o satélite	23	Proporcionar soporte de costos para la actividad de definición de concepto		

La tabla 4-3 muestra la comparación entre ambas metodologías cubriendo en los estándares de la ECSS la **Fase A: Factibilidad** y en el proceso SMAD la **Fase 3: Evaluación de la misión**.

En la metodología SMAD una vez que la Fase 2: Caracterización de la misión ha concluido, comienza la Fase 3: **Evaluación de la misión**.

El SMAD paso 7: Identificar requerimientos críticos tiene tareas similares en la metodología ECSS, ECSS Tarea 10: Identificar las tecnologías críticas y proponer actividades previas al desarrollo. Los requerimientos críticos son aquellos que dominan el diseño de la misión especial, requerimientos que tienen un afectan de manera significativa el costo y el rendimiento.

SMAD Tarea 24 es la primera tarea de la Fase 2:de Evaluación de la misión, SMAD Tarea 24 observa los principales requerimientos de rendimiento, analiza los principales requerimientos de la misión, debido a que normalmente estos requerimientos serán los más críticos.

Los requerimientos críticos más comunes son:

1. Cobertura o tiempo de respuesta;
2. Resolución,
3. Sensibilidad,
4. Exactitud de mapeo (Mapping),
5. Transmisión de potencia,
6. Tiempo de vida en órbita,
7. Supervivencia

En consecuencia, la tarea SMAD 25 analiza los requerimientos críticos más comunes y determina cuales de estos son parámetros clave para el diseño, costo o rendimiento.

Otras fuentes de requerimientos críticos son aquellos que fueron resultado de la SMAD Tarea 1, por esto la SMAD Tarea 26 sugiere observar los requerimientos de nivel superior establecidos en los objetivos de la misión.

SMAD Tarea 27 finaliza la identificación de requerimientos críticos analizando posibles requerimientos ocultos que no hayan sido identificados en las SMAD Tareas 24, 25 y 26.

Una vez que los conceptos de misión alternativos y arquitecturas han sido definidos, la siguiente etapa para ambas metodologías es la evaluación de las misiones.

La ECSS tarea 9: Evalúa la factibilidad técnica y programática de los posibles conceptos mediante la identificación de las limitaciones relacionadas con la implementación, costos, cronograma, organización, operaciones, mantenimiento, producción y retirada/eliminación. Esta tarea tiene su tarea espejo en el proceso SMAD en el Paso 8: Evaluación de la utilidad de la misión.

Para evaluar la misión se utilizan dos tipos de análisis.

1. Estudios de alcance limitado: Evaluación de factibilidad, estimación de tamaño, punto de diseño.
2. Análisis detallado y comparaciones/evaluaciones complejas (Complex trades): Estudio comparativo, evaluación de rendimiento y evaluación de utilidad.

SMAD paso 8: Evaluación de la utilidad de la misión, esta compuesto por tres tareas las cuales ayudarán a realizar la evaluación de utilidad de la misión. La primera tarea es la SMAD Tarea 28: Identificación de parámetros de rendimiento, los cuales servirán para cuantificar que tan bien el sistema trabaja. Le sigue la Tarea SMAD 29: Identificación de mediciones de efectividad o figuras de mérito, estas cuantificarán que tan bien el sistema cumple con los objetivos de la misión.

SMAD Tarea 30: Simulación de la utilidad de la misión, el objetivo de esta tarea es evaluar las mediciones de efectividad como función de los principales parámetros del sistema. Ya que han sido identificados como estos parámetros afectan el costo, rendimiento cronograma y diseño es posible establecer la relación entre las figuras de mérito y el costo, rendimiento, cronograma y diseño.

Es posible encontrar un punto de encuentro entre la ECSS Tarea 10: Identificar las tecnologías críticas y proponer actividades previas al desarrollo y las tareas SMAD Paso 5: Identificar los sistemas estratégicos de cada alternativa de arquitectura y SMAD Paso 7: Identificar requerimientos críticos, sin embargo, la ECSS Tarea 10 estará más enfocada en las tecnologías que pueden ser utilizadas en los conceptos de misión que tengan un alto impacto en el diseño, costo, rendimiento, cronograma y/o riesgo del proyecto de la misión espacial.

ECSS Tarea 11: Cuantificar y caracterizar elementos críticos en términos de factibilidad técnica y económica puede ser comparada con SMAD Tarea 28 y 30. Aunque el punto de vista de ambas metodologías no es el mismo, el objetivo de ambas sigue siendo el evaluar la factibilidad de los elementos críticos.

Una de las principales diferencias entre metodologías se observa en la etapa de propuestas de conceptos de misión, mientras que en los estándares ECSS la propuesta formal para los conceptos de sistemas y operaciones, y las soluciones técnicas es desarrollada en la ECSS Tarea 12 al final de la Fase A (Factibilidad), en el proceso SMAD la definición formal de las posibles arquitecturas de la misión es desarrollada en SMAD Tarea 9, al inicio de la etapa de Factibilidad.

La ECSS Tarea 7 define posibles conceptos de operaciones y arquitectura del sistema utilizando un enfoque general, en otras palabras, la definición de estos conceptos y arquitecturas es desarrollada sin la profundidad de detalle observada en la metodología SMAD, con el objetivo de guiar el concepto de misión a un posible escenario de solución.

La ECSS Tarea 12: Proponer conceptos de sistemas y operaciones y soluciones técnicas, incluyendo la filosofía de modelo y el enfoque de verificación, es realizada una vez que han sido identificadas: Tecnologías críticas, elementos críticos para los aspectos técnicos y económicos, por lo tanto, es durante esta tarea que se proponen posibles conceptos y soluciones más detallados y realistas.

La ECSS Tarea 12 también requiere la propuesta de la filosofía de modelo y el enfoque de verificación. Esta segunda parte de la tarea no tiene espejo en el proceso SMAD. El término filosofía de modelo se refiere al número óptimo y características de los modelos físicos requeridos para lograr confianza en la verificación del producto (por ejemplo: modelo ingeniería, modelo de certificación, modelo de vuelo, etc...)

La tarea final en la Fase A (Factibilidad) es la ECSS Tarea 13: Elaboración del análisis de riesgo.

Para concluir la ECSS Fase A (Factibilidad), se requiere la Revisión preliminar de requerimientos (PRR). EL objetivo de esta revision es determinar si todas las tareas han sido cumplidas y si el proyecto se encuentra listo para avanzar hacia la siguiente ECSS **Fase B: Definición preliminar.**

Tabla 4-3 Comparación de Fase A (Factibilidad) Estándares ECSS y Fase 3 (Evaluación de la misión, pasos 7 y 8) proceso SMAD. Parte II. Propuesta por la autora.

Estándares ECSS				Proceso SMAD									
Fase	Fase	Tarea	Descripción de la Tarea	Revisiones	Fase	Paso	Descripción del Paso	Tarea	Descripción de la Tarea	Tarea de nivel inferior			
A	Factibilidad				Evaluación de la misión	7	Identificar requerimientos críticos	24	Observar los principales requerimientos de rendimiento				
								25	Analizar los requerimientos críticos más comunes				
								26	Observar los requerimientos de nivel superior				
								27	Buscar requerimientos ocultos				
			9	Evaluar la factibilidad técnica y programática de los posibles conceptos mediante la identificación de las limitaciones relacionadas con la implementación, costos, cronograma, organización, operaciones, mantenimiento, producción y retirada/eliminación				8	Evaluación de la utilidad de la misión		28	Identificar parámetros de rendimiento	
							29				Identificar mediciones de efectividad o figuras de mérito		
							30				Simulación de la utilidad de la misión		
			10	Identificar las tecnologías críticas y proponer actividades previas al desarrollo									
			11	Cuantificar y caracterizar elementos críticos en términos de factibilidad técnica y económica									
			12	Proponer conceptos de sistemas y operaciones y soluciones técnicas, incluyendo la filosofía de modelo y el enfoque de verificación									
			13	Elaborar el análisis de riesgos									
							Revisión preliminar de requerimientos (PRR)						

En la figura 4-4 se muestra el comienzo de la ECSS **Fase B: Definición preliminar** y se continúa con la **SMAD Fase 3: Evaluación de la misión**, así como todas las tareas que dan forma a cada una de las metodologías respectivamente.

La ECSS Tarea 14: Finalizar los planes de: gestión de proyecto, ingeniería y certeza de operaciones para el producto, es la primera tarea de la Fase B (Definición preliminar). Sigue a esta tarea la ECSS Tarea 15: Establecer la planeación y cronograma maestros y ECSS Tarea 16: Elaborar el costo total de referencia. Estas tareas no tienen replica exacta en el proceso SMAD, pero algunos de sus objetivos están contenidos en la SMAD Tarea 22: Determinar las estrategias de logística, despliegue, reabastecimiento, y eliminación o retirada de la nave espacial o satélite, y SMAD Tarea 23: Proporcionar soporte de costos para la actividad de definición de concepto.

La metodología ECSS utiliza una serie de diagramas que son el desglose de la estructura del proyecto, estos diagramas son utilizados como herramientas en el ciclo de diseño de la misión principalmente. Estas estructuras proporcionan la base para establecer un entendimiento común entre todos los actores en el proyecto de la misión con diferentes niveles de detalle y utilizando diferentes enfoques.

La primera de estas estructuras de desglose es realizado durante la ECSS Tarea 8: Árbol de funciones. Otras estructuras de descomposición importantes utilizadas son: Árbol de especificaciones, árbol de productos, la estructura de desglose del trabajo y la estructura de desglose de la organización.

La ECSS Tarea 17 establece una estructura de desglose organizacional preliminar, esta estructura describe la organización del proyecto, incluyendo las interfaces y responsabilidades, muestra quién es el personal clave y las responsabilidades de cada tarea.

La ECSS 18 confirma las soluciones técnicas para los conceptos de operación del sistema y su viabilidad con respecto a las restricciones programáticas. Esta es una primera etapa de

depuración para las posibilidades de conceptos del sistema y operación establecidas en la ECSS Tarea 12.

Una segunda etapa de depuración es establecida en ECSS Tarea 19: Conducir estudios de soluciones intermedias o de compensación (trade-off) y seleccionar el sistema preferido junto con las soluciones técnicas para este concepto. La primera parte de esta tarea es cubierta por la SMAD Tarea 9: Identificar alternativas para la arquitectura de la misión, donde se construye un árbol con las posibles opciones viables para los elementos de la misión. La segunda parte de ECSS Tarea 19: Selección del sistema preferido junto con las soluciones técnicas para éste concepto es cubierta por SMAD Tarea 31: Seleccionar uno o más enfoques de concepto de la misión como punto de referencia.

ECSS Tarea 20: Establecer una definición preliminar de diseño para el concepto de sistema seleccionado y sus soluciones técnicas es la tarea siguiente. Como se mencionó anteriormente, la principal diferencia entre ambas metodologías se observa en la caracterización de la misión, mientras que en el proceso SMAD la caracterización de la misión se realiza antes de la selección de diseño de referencia, en la metodología ECSS una vez que se ha seleccionado se procede a desarrollar la definición preliminar de la misión.

Ambos enfoques conducen a un diseño final preliminar.

Tabla 4-4 Comparación de Fase B (Definición preliminar) Estándares ECSS y Fase 3 (Evaluación de la misión, paso 9) y Fase 4 (Definición de requerimientos, paso 10) proceso SMAD. Propuesta por la autora.

Estándares ECSS				Proceso SMAD					
Fase	Fase	Tarea	Revisiones	Fase	Paso	Descripción del Paso	Tarea	Descripción de la Tarea	Tarea de nivel inferior
B	Definición preliminar	14	Finalizar los planes de: gestión de proyecto, ingeniería y certeza de operaciones para el producto	Revisión de requerimientos del sistema (SRR)	Evaluación de la misión				
		15	Establecer la planeación y cronogramas maestros						
		16	Elaborar el costo total de referencia						
		17	Elaborar la estructura de desglose organizacional preliminar						
		18	Confirmar las soluciones técnicas para los sistemas y conceptos de operaciones y su factibilidad con respecto a las restricciones programáticas						
		19	Conducir estudios de soluciones intermedias o de compensación (trade-off) y seleccionar el sistema preferido junto con las soluciones técnicas para este concepto						
		20	Establecer una definición preliminar de diseño para el concepto de sistema seleccionado y sus soluciones técnicas						
		21	Determinar el programa de verificación incluyendo la filosofía de modelo						
		22	Identifica y definir las interfaces internas y externas						
				Definición de requerimientos	10	Definición de requerimientos del sistema	32	Crear equipos de trabajo integrados multidisciplinarios por sistemas	
							33	Identificar al cliente y usuario final del producto o servicios	
							34	Identificar y priorizar los objetivos y necesidades de la misión del cliente/usuario que deberán ser cumplidas	
							35	Definir limitaciones internas y externas	
							36	Traducir las necesidades del cliente/usuario a atributos funcionales y características del sistema	Quality Function Deployment

Tabla 4-5 Comparación de Fase B (Definición preliminar) Estándares ECSS y Fase 4 (Definición de requerimientos, paso 11) proceso SMAD. Propuesta por la autora.

Estándares ECSS				Proceso SMAD				
Fase	Fase	Tarea	Revisiones	Fase	Paso	Descripción del Paso	Tarea	
		Descripción de la Tarea					Descripción de la Tarea	
							Tarea de nivel inferior	
B	Preliminary Definition			System Requirements Review (SRR)	11	Asignación de requerimientos a los elementos del sistema	37	Establecer los requerimientos funcionales para los sistemas y proporcionar la descomposición de los elementos
							38	Establecer el flujo funcional y representativo para su desempeño de funciones
							39	Traducir los atributos funcionales a características técnicas, las cuales se convertirán en requerimientos para el sistema físico
							40	Establecer requerimientos cuantificables de todos los pasos anteriores
							41	Utilizar el diagrama de bloques para expresar las interfaces y relaciones hardware/software/datos para el nivel del sistema
							42	Utilizando el concepto de referencia descomponer los requerimientos funcionales y conjuntos de características a niveles inferiores, es decir, el siguiente nivel que define la base de los elementos del sistema
			23				Preparar las especificaciones de siguiente nivel y los documentos de acuerdos comerciales relacionados	
			24				Iniciar el trabajo previo al desarrollo de tecnologías críticas o áreas de diseño de sistema cuando sea necesario para reducir los riesgos de desarrollo	
			25				Iniciar las adquisiciones de elementos con plazo de entrega largos para cumplir con las necesidades del cronograma del proyecto	
			26				Preparar el plan de mitigación de basura espacial y el plan de eliminación/retirada	
			27				Realizar las evaluaciones de confiabilidad y seguridad	
	28	Finalizar el árbol del producto, la estructura desglosada de trabajo y el árbol de especificaciones						
	29	Actualizar la evaluación de riesgos						
			Revisión de diseño preliminar (PDR)				43	Iterar

Para las ECSS Fases C (Definición detallada), D (Calificación y producción), E (Operaciones/Utilización) y F(Retirada/Eliminación) no existen tareas espejo en el procedimiento SMAD; sin embargo, en el contenido de esta bibliografía se establecen puntos importantes a tomar en cuenta para cada una de estas etapas (Ver sección: 3.1.3. Conceptos, información de subsistemas y análisis de la misión).

Aún sin poder realizar una comparación de paso contra paso entre ambas metodologías, la autora de la tesis ha identificado cada una de las tareas que componen las ECSS Fases: C (Definición detallada), D (Calificación y producción), E (Operaciones/Utilización) y F(Retirada/Eliminación).

La tabla 4-6 muestra cada una de las fases y las tareas que deben ser cubiertas durante cada una de las fases, así como sus respectivas revisiones.

Tabla 4-6 Fase C (Definición detallada), Fase D (Calificación y producción), Fase E (Operaciones/Utilización) y Fase F (Retirada/Eliminación) Estándares ECSS. Propuesta por la autora.

Estándares ECSS				
Fase	Fase	Tarea	Descripción de la Tarea	Revisiones
C	Definición detallada	30	Finalizar la definición de diseño detallado del sistema en todos los niveles	
		31	Producción, pruebas de desarrollo y precalificación de los elementos y componentes críticos seleccionados. Realizar pruebas de producción y desarrollo de modelos de ingeniería, según lo requerido por el enfoque de la filosofía de modelo y verificación seleccionados	
		32	Finalizar la planeación del ensamble, integración y pruebas de los sistemas y sus componentes	
		33	Definir a detalle las interfaces internas y externas	
		34	Emitir el manual del usuario de forma preliminar	
		35	Actualizar la evaluación de riesgos	
D	Calificación y producción	36	Completa la prueba de calificación y actividades de verificación asociadas	Revisión de calificación (QR)
		37	Completa la manufactura, ensamble y prueba del hardware/software de asociado al soporte terrestre	
		38	Completa las pruebas de interoperabilidad entre el espacio y el segmento terrestre	
		39	Prepara el paquete de datos de aceptación	
			Revisión de la disponibilidad operacional (ORR)	
E	Operaciones/Utilización	40	Realizar todas las operaciones a nivel segmento espacial y terrestre para preparar el lanzamiento	Revisión de preparación de vuelo (FRR) Revisión de preparación de lanzamiento (LRR)
		41	Realiza todas las operaciones orbitales iniciales y operaciones de lanzamiento	Revisión de resultados de puesta en servicio (CRR)
		42	Realiza las actividades de verificación en órbita (incluidas las actividades de puesta en servicio)	
		43	Realiza todas las operaciones en órbita para alcanzar los objetivos de la misión	Revisión del final de la vida (ELR)
		44	Realiza todas las actividades del segmento terrestre para soportar la misión	
		45	Realiza todas las demás actividades de apoyo en Tierra para soportar la misión	
46	Finaliza el plan de eliminación o retirada			
F	Retirada/ Eliminación	47	Implementación del plan de eliminación o retirada	Revisión de cierre de la misión (MCR)

■ Propuesta de metodología para el diseño de misiones espaciales

Una vez que ambas metodologías de diseño han sido descritas y comparadas a detalle, es la intención de este capítulo el proponer una metodología para ser utilizada en el diseño de misiones espaciales.

Se proponen las siguientes fases con sus respectivos pasos dentro del ciclo de vida de las misiones espaciales:

A. Definición de la misión.

Paso 1. Declaración de la misión

Tarea 1: Identificar a los clientes o usuarios que están interesados en el desarrollo de un proyecto espacial.

- ¿Quiénes son los clientes o usuarios interesados en el desarrollo de la misión espacial?

Tarea 2: Identificar a los objetivos de los clientes o usuarios del proyecto espacial.

- ¿Qué necesidad cubre la misión espacial?
- ¿Cuáles son los objetivos de los clientes y usuarios de la información que será generada por la misión espacial?

Tarea 3: Establecer objetivo principal:

- ¿Cuál es la misión principal de la misión?

Tarea 4: Establecer objetivos secundarios:

- ¿Qué otras funciones podrían ser alcanzadas con esta misión?
- ¿Cuáles de estas funciones secundarias se identifican como objetivos secundarios de la misión?

Tarea 5: Establecer objetivos basados en la agenda oculta de la misión.

- ¿Qué funciones políticas podrían ser alcanzadas con esta misión?

- ¿Qué funciones sociales podrían ser alcanzadas con esta misión?
- ¿Qué funciones culturales podrían ser alcanzadas con esta misión?
- ¿Cuáles de estas funciones se identifican como objetivos de la misión?

Tarea 6: Establecer objetivos adicionales de la misión.

- Con pocas consideraciones adicionales ¿Qué más podría lograrse con esta misión?

Paso 2. Evaluación de las características del espacio que se explotarán con la misión.

Tarea 7: Establecer que características del espacio han de ser explotadas:

- 1 Perspectiva global.
- 2 Localización por sobre la atmósfera terrestre.
- 3 Ambiente libre de gravedad.
- 4 Exploración del espacio.
- 5 Otros.

Tarea 8: Evaluar posibles soluciones que no utilicen el espacio, que cubran los objetivos del cliente y usuario, y objetivos principales del proyecto.

Tarea 9: Justificar el uso del espacio y su costo, para alcanzar los objetivos del proyecto.

Paso 3. Identificación preliminar de los requerimientos:

Tarea 10: Requerimientos funcionales:

- ¿Qué tan bien debe desempeñarse el sistema para alcanzar los objetivos de la misión?

Tarea 11: Requerimientos operacionales:

- ¿Cómo debe operar el sistema?
- ¿Cómo será la interacción con el usuario?

Tarea 12: Limitaciones.

- Limitaciones de costo,
- Limitaciones de cronograma y

- Limitaciones tecnológicas.

Paso 4. Planeación y cronograma preliminar de la misión.

Tarea 13: Establecer el cronograma preliminar del ciclo de la misión.

Tarea 14: Establecer posibles recursos económicos que soportarán la misión durante el ciclo de vida de la misión.

Tarea 15: Establecer el plan preliminar de retirada o eliminación de la misión.

Revisión: Revisión de definición de la misión.

Los objetivos de esta revisión son:

- a) Publicar la declaración de la misión.
- b) Evaluar los requerimientos técnicos preliminares de la misión.
- c) Evaluar la planeación preliminar del proyecto.
- d) Evaluar posibles fuentes de recursos económicos para el desarrollo de la misión.

B. Definición conceptual.

Paso 5. Sistema métrico a utilizar.

Tarea 16: Establecer el sistema métrico a utilizar (sistema métrico decimal o sistema inglés)

Todos los subsistemas deberán utilizar el mismo sistema métrico en el transcurso del ciclo de vida de la misión.

Paso 6. Control de documentos.

Tarea 17: Establecer cómo se llevará a cabo el control de documentos generados en el transcurso del ciclo de vida de la misión espacial.

- Documentos generados en cada uno de los pasos.
- Documentos de los subsistemas.
- Documentos revisados durante las revisiones.

Paso 7. Investigación de misiones espaciales de referencia.

Tarea 18: Investigar sobre misiones espaciales que persigan los mismos objetivos que el proyecto espacial a desarrollar (Benchmarking). Para cada una de las misiones de referencia se recomienda tener información sobre:

- Desarrollador de la misión.
- Costo.
- Partes involucradas en la misión (stakeholders).
- Clasificación de satélite (tamaño, masa, órbita).
- Filosofía del modelo.
- Carga útil.
- Segmento terrestre.
- Tecnologías únicas y críticas aplicadas en la misión.
- Certificación del satélite.
- Procesamiento de información.

- Lanzador utilizado.
- Tiempo de vida útil del satélite en operación.
- Plan de retirada.

Paso 8. Definir posibles conceptos de misión.

Tarea 19: Definir posibles conceptos de misión:

Elementos principales para definir un concepto de misión son:

- Transmisión de datos: Cómo son generados o recolectados, distribuidos y utilizados los datos científicos de la misión y de operación del sistema.
 - Operaciones clave:
 - Procesamiento en el espacio vs. Procesamiento en Tierra,
 - Nivel de autonomía y
 - Procesamiento central vs. Procesamiento distribuido.
- Arquitectura de la comunicación: Cómo es que los diferentes componentes del sistema se comunican entre ellos.
 - Operaciones clave:
 - Velocidades de transmisión de datos de ancho de banda y
 - Rapidez en la comunicación.
- Asignación de tareas, planificación y control: Cómo es que el sistema decide que hacer en el largo y corto plazo.
 - Operaciones clave:
 - Nivel de autonomía,
 - Control central vs. Control distribuido.
- Cronograma de la misión: El cronograma general de planificación, construcción, despliegue, reemplazo y final de vida.
 - Operaciones clave:

- Opciones de reabastecimiento y fin de vida,
- Estrategia de despliegue para múltiples satélites y
- Flexibilidad del cronograma.

Paso 9. Definir posibles arquitecturas de misión.

Tarea 20: Definir posibles arquitecturas de misión.

Elementos básicos en la arquitectura de la misión:

- Sujeto de estudio,
- Carga útil,
- Plataforma o bus,
- Sistema de lanzamiento,
- Órbita y constelación,
- Sistema terrestre,
- Operaciones de la misión y
- Arquitectura del comando, control y las comunicaciones.

Para poder definir las posibles arquitecturas de la misión se recomienda:

Tarea 21: Identificar los elementos de la misión que sólo tienen una opción.

Tarea 22: Identificar los elementos de la misión que permitan varias opciones.

Tarea 23: Identificar las opciones principales para cada uno de los elementos que pueden tener más de una opción.

Tarea 24: Construir un árbol con las posibles combinaciones, eliminando las combinaciones que no son realistas.

Tarea 25: Buscar nuevas alternativas que no hayan sido listadas aún y que posiblemente cumplan con los objetivos de la misión.

Paso 10. Árbol de funciones.

Tarea 26: Crear el árbol de funciones.

Un árbol de funciones es un diagrama que muestra las dependencias entre las funciones de un sistema. Descompone un problema o su solución en partes más simples.

El objetivo del árbol de funciones es describir la descomposición jerárquica de las capacidades de un sistema o producto en un nivel sucesivo de funciones o subfunciones.

Paso 11. Identificar los sistemas estratégicos de cada alternativa.

Tarea 27: Identificar las áreas de interés: rendimiento, costo, riesgo o planeación/cronograma.

Tarea 28: Identificar los parámetros que miden las áreas de interés.

Tarea 29: Desarrollar algoritmos de primer orden.

Tarea 30: Examinar los factores.

Tarea 31: Buscar sistemas estratégicos ocultos.

Paso 12. Crear equipos de trabajo integrados multidisciplinarios por sistemas.

Tarea 32: Crear equipos de trabajo integrados multidisciplinarios por sistemas

Paso 13. Caracterización de los conceptos y arquitecturas de la misión:

Tarea 33: Definir un concepto de misión preliminar utilizando los elementos clave.

Tarea 34: Definir las características del sujeto de estudio.

Tarea 35: Determinar las características de la órbita y de la constelación.

Tarea 36: Determinar el tamaño y desempeño de la carga útil.

Tarea 37: Seleccionar el enfoque de operaciones de la misión.

Tarea 38: Diseñar el satélite para alcanzar los requerimientos de la carga útil, órbita y comunicaciones.

Tarea 39: Seleccionar sistema de lanzamiento y órbita de transferencia.

Tarea 40: Determinar las estrategias de logística, despliegue, reabastecimiento, y eliminación o retirada de la nave espacial o satélite.

Tarea 41: Proporcionar soporte de costos para la actividad de definición de concepto.

Paso 14: Identificación de requerimientos:**Tarea 42:** Requerimientos funcionales:

- Requerimientos que definen qué debe realizar el producto para cumplir con las necesidades y declaración de la misión o requisitos del usuario.

Ejemplo: El producto debe analizar la superficie de Marte y transmitir los datos para que esté a disposición de la comunidad científica.

Tarea 43: Requerimientos de la misión:

- Requerimientos relacionados con una tarea, una función, una restricción o una acción inducida por el escenario de la misión.

Ejemplo: El producto debe diseñarse para colocarse en su posición final después de una duración de transferencia inferior a 90 días.

Tarea 44: Requerimientos de interface:

- Requerimientos relacionados con la interconexión o características de relación entre el producto y otros artículos.

Ejemplo: El producto debe dialogar con el segmento de tierra mediante telemetría.

Tarea 45: Requerimientos de medio ambiente:

- Requerimientos relacionados con un producto o el entorno del sistema durante su ciclo de vida, esto incluye los entornos naturales (interacciones planetarias, espacio libre y polvo) y entornos inducidos (por ejemplo: radiación, electromagnetismo, calor, vibración y contaminación).

Ejemplo: El producto debe funcionar dentro del rango de temperatura de 30°C a 50°C.

Tarea 46: Requerimientos operacionales:

- Requerimientos relacionados con la operatividad del sistema. Esto incluye los perfiles operativos y entorno de utilización y los eventos a los que el producto

responderá (por ejemplo, autonomía, control y contingencia) para cada perfil operativo.

Ejemplo: El producto debe estar diseñado para aceptar el control de la función de visualización desde el segmento terrestre.

Tarea 47: Requerimientos de factor humano:

- Requerimientos relacionados con un producto o un proceso adaptado a las capacidades humanas teniendo en cuenta las características humanas básicas. Esto incluye las siguientes características básicas humana:
 - a. Toma de decisiones,
 - b. Fuerza muscular y coordinación
 - c. Dimensiones del cuerpo,
 - d. Percepción y juicio,
 - e. Carga de trabajo,
 - f. Comodidad y libertad de estrés ambiental.

Ejemplo: El producto debe mostrar la información con no más de dos ventanas en la pantalla al mismo tiempo.

Tarea 48: Requerimientos de soporte logístico:

- Requerimientos relacionados con las consideraciones de soporte logístico (integrado) para garantizar el soporte efectivo y económico para su ciclo de vida. Esto incluye los siguientes temas:
 - a. Las limitaciones relativas al mantenimiento (por ejemplo, periodicidad mínima, duración de la intervención, infraestructura, herramientas, modos de intervención).
 - b. Embalaje, transporte, manipulación y almacenamiento,
 - c. Documentación del usuario,

- d. Implementación del producto en el sitio del usuario, y
- e. Reutilización del producto o sus elementos.

Ejemplo: El producto debe estar diseñado para instalarse en el sitio del cliente en 2 días.

Tarea 49: Requerimientos físicos:

- Requerimientos que establecen las condiciones de frontera para garantizar la compatibilidad física y que no están definidos por los requisitos de interface, los requisitos de diseño y construcción, o los dibujos referenciados. Esto incluye los requisitos relacionados con las características mecánicas, el aislamiento eléctrico y la composición química (por ejemplo, pero y límites dimensionales).

Ejemplo: El producto debe tener una masa de 30 ± 0.1 kg.

Tarea 50: Requerimientos de certeza del producto:

- Requerimientos relacionados con las actividades relevantes cubiertas por la certeza del producto. Esto puede incluir los siguientes temas:
 - a. Fiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad,
 - b. Seguridad,
 - c. Certeza de la calidad.

Tarea 51: Requerimientos de configuración:

- Requerimientos relacionados con la composición del producto o su organización.
- Ejemplo: El producto debe tener 7 módulos de potencia con 2 tomas de corriente por motor.

Tarea 52: Requerimientos de diseño:

- Requerimientos relacionados con los estándares de diseño y construcción impuestos, tales como estándares de diseño, lista de selección de componentes o materiales, intercambiabilidad, seguridad o márgenes.

Ejemplo: El receptor utilizará un lazo de seguimiento de fase.

Tarea 53: Requerimientos de verificación:

- Requerimientos relacionados con los métodos de verificación impuestos, como el cumplimiento de estándares de verificación, el uso de métodos o instalaciones de prueba.

Ejemplo: La prueba de balance térmico debe realizarse usando iluminación solar.

Tarea 54: Observar los principales requerimientos de rendimiento

Tarea 55: Analizar los requerimientos críticos más comunes

Tarea 56: Observar los requerimientos de nivel superior

Tarea 57: Buscar requerimientos ocultos

Paso 15. Evaluar la factibilidad técnica y programática de los posibles conceptos.

Tarea 58: Evaluar la factibilidad técnica y programática de los posibles conceptos. mediante la identificación de las limitaciones relacionadas con la implementación, costos, cronograma, organización, operaciones, mantenimiento, producción y retirada/eliminación.

Paso 16. Elementos Críticos.

Tarea 59: Identificar las tecnologías críticas y proponer actividades previas al desarrollo.

Tarea 60: Cuantificar y caracterizar elementos críticos en términos de factibilidad técnica y económica.

Paso 17. Filosofía del modelo.

Tarea 61: Establecer la filosofía de modelo preliminar a seguir en el ciclo de vida de la misión.

Revisión: Revisión conceptual de diseño (RCD).

Los objetivos de esta revisión son:

- a) Publicación el sistema métrico a utilizar.
- b) Publicación el control de documentos seleccionado.
- c) Revisión del árbol de funciones.
- d) Revisión de posible conceptos y arquitecturas de la misión.
- e) Revisión de elementos críticos para cada posible concepto.
- f) Confirmar la factibilidad técnica y programática de los conceptos del sistema.
- g) Definición preliminar de filosofía de modelo.
- h) Revisión de equipos de trabajo por sistema.
- i) Liberación de los requisitos de la misión espacial.
- j) Liberación de los requisitos críticos de la misión espacial.
- k) Posible selección del (los) concepto (s) del sistema y operaciones y soluciones técnicas.

Puntos a detallar:

1. Liberar las especificaciones actualizadas de los requisitos técnicos.
2. Evaluar la definición de diseño preliminar.
3. Evaluar el programa de verificación preliminar

Revisión: Revisión de diseño preliminar (PDR).

2. Verificar los diseños preliminares de los conceptos seleccionados y soluciones técnicas contra los requerimientos del proyecto y sistemas.
3. Liberar los planes de gestión de proyecto, ingeniería y certeza de operación para el producto.
4. Liberar el árbol del producto, la estructura desglosada de trabajo y el árbol de especificaciones.
5. Liberar el plan de verificación, incluyendo la filosofía de modelo.

Revisión: Revisión de diseño crítico (CDR).

2. Evaluar el estatus de calificación y validación de los procesos críticos y su preparación para el desarrollo de fase D.
 3. Confirmar la compatibilidad con las interfaces externas.
 4. Liberar el diseño final.
 5. Liberar los planes de ensamble, integración y pruebas.
 6. Liberar la producción, ensamble y prueba del software/hardware de vuelo.
7. Liberar el manual de usuario.

C. Definición detallada de requerimientos

D. Definición detallada de la misión espacial

E. Certificación y producción

F. Operación

G. Retirada

Determinar lenguaje de programación a utilizar en la misión espacial

Fijar límites entre los subsistemas: que es lo que cada sistema abarca, desde que hardware y software Documento de control de interfaces

Presupuesto de energía

Presupuesto de masa

Presupuesto de costo

Documento de interfaces del segmento espacial

Documento de interfaces del segmento espacial

Lista de materiales de la misión espacial

Diseño de detalle de la misión espacial

Manual de usuario del segmento espacial

Manual de usuario del segmento terrestre

Organización de la documentación de la misión y subsistemas

Cronograma del ciclo de vida de diseño

Ruta crítica para establecer los sistemas clave de la misión

Análisis de riesgos de la misión

Dibujos de detalle del segmento espacial

Dibujo de detalle del segmento terrestre

5.1. Revisiones durante el ciclo de vida de la misión espacial

Etapa de actividad recién completada	Nombre de la revisión	Salida del sistema	Salida para los subsistemas	Salida para equipo
Identificación de los requisitos del usuario y los conceptos iniciales	Revisión de definición de la misión (RDM)	Confirmación de los requerimientos de la misión	N/A	N/A
Misión inicial o requerimientos del usuario convertidos en requisitos generales del sistema.	Revisión preliminar de requerimientos (RPR)	Confirmación de la factibilidad del sistema y especificación funcional publicada. Requerimientos en las interfaces del sistema establecidos por el cliente de primer nivel.	Asignación de requisitos funcionales del subsistema.	N/A
Especificación técnica del sistema establecida.	Revisión de requerimientos del sistema (RRS)			
Diseño preliminar establecido.	Revisión de diseño preliminar (RDP)			
	Revisión de diseño crítico (RDC)			
	Revisión de calificación (RC)			
	Revisión de aceptación (RA)	Resultados de la prueba de aceptación del sistema de modelos de vuelo y		

		análisis / verificación y certificado de aceptación		
--	--	--	--	--

■ Aplicación de la metodología de diseño propuesta al caso de estudio: Microsatélite Quetzal

A. Definición de la misión.

Paso 1. Declaración de la misión

- a) Identificar a los clientes o usuarios que están interesados en el desarrollo de un proyecto espacial.
 - ¿Quiénes son los clientes o usuarios interesados en el desarrollo de la misión espacial?
 - La órbita deberá ser aquella, en la cual, el ángulo de visión del satélite cubra la zona de interés para que se pueda tomar imágenes de ésta por lo menos una vez al día.
 -
- b) Identificar a los objetivos de los clientes o usuarios del proyecto espacial.
 - ¿Qué necesidad cubre la misión espacial?
 - ¿Cuáles son los objetivos de los clientes y usuarios de la información que será generada por la misión espacial?
- c) Establecer objetivo principal:
 - ¿Cuál es la misión principal de la misión?
- d) Establecer objetivos secundarios:
 - ¿Qué otras funciones podrían ser alcanzadas con esta misión?
 - ¿Cuáles de estas funciones secundarias se identifican como objetivos secundarios de la misión?
- e) Establecer objetivos basados en la agenda oculta de la misión.
 - ¿Qué funciones políticas podrían ser alcanzadas con esta misión?
 - ¿Qué funciones sociales podrían ser alcanzadas con esta misión?

- ¿Qué funciones culturales podrían ser alcanzadas con esta misión?
 - ¿Cuáles de estas funciones se identifican como objetivos de la misión?
- f) Establecer objetivos adicionales de la misión.
- Con pocas consideraciones adicionales ¿Qué más podría lograrse con esta misión?

Paso 2. Evaluación de las características del espacio que se explotarán con la misión.

- b) Establecer que características del espacio han de ser explotadas:
- 1 Perspectiva global.
 - 2 Localización por sobre la atmósfera terrestre.
 - 3 Ambiente libre de gravedad.
 - 4 Exploración del espacio.
 - 5 Otros.
- c) Evaluar posibles soluciones que no utilicen el espacio, que cubran los objetivos del cliente y usuario, y objetivos principales del proyecto.
- d) Justificar el uso del espacio y su costo, para alcanzar los objetivos del proyecto.

Paso 3. Identificación de los requerimientos funcionales

- a) ¿Qué tan bien debe desempeñarse el sistema para alcanzar los objetivos de la misión?
- La órbita deberá ser aquella, en la cual, el ángulo de visión del satélite cubra la zona de interés para que se pueda tomar imágenes de ésta por lo menos una vez al día.
 - Las mediciones deberán realizarse en periodos de día, sobre el mismo lugar y de preferencia a la misma hora.
 - La órbita deberá ser aquella en la que el pase del satélite sobre la zona de interés esté en el intervalo de 1 grado de apuntamiento del nadir.

Paso 4. Identificación de los requerimientos operacionales.

- a) ¿Cómo debe operar el sistema?

b) ¿Cómo será la interacción con el usuario?

La órbita deberá tener una altitud sobre la zona de interés para tomar fotografías que garanticen la resolución y ancho de barrido requerido.

La órbita deberá ser aquella en la que el satélite pase dentro del rango de línea de vista de una estación terrena por lo menos una vez al día.

Paso 4 Identificación de las limitaciones.

- a) Limitaciones de costo,
- b) Limitaciones de cronograma y
- c) Limitaciones tecnológicas.

El satélite deberá tener una masa menor a 100 kg para estar en la categoría de microsátélite.

La potencia del satélite deberá ser obtenida a partir de celdas solares para suministrar la energía requerida por los subsistemas.

Revisión: Revisión de definición de la misión.

Los objetivos de esta revisión son:

- Publicar la declaración de la misión:

La misión del proyecto satelital es el monitoreo de las concentraciones de contaminantes en el aire sobre zonas urbanas, como la Ciudad de México y ciudades latinoamericanas, desde una órbita terrestre baja.

- Evaluar las especificaciones técnicas preliminares de los requerimientos.
- Evaluar la planeación preliminar del proyecto.

■ Conclusiones y trabajo a futuro

7.1. Conclusiones

El trabajo aquí presentado fue generado como una referencia para el lector involucrado en proyectos espaciales para conocer diferentes metodologías de diseño para misiones espaciales.

El campo de la ingeniería espacial ha resultado para mi un campo fascinante del cual era ignorante hasta antes de comenzar con mis clases de maestría en la UNAM. Los logros que ha tenido México a través de los años en este campo han sido limitados por decisiones políticas en el país que han cortado el apoyo del proyecto espacial mexicano. Siendo un país con una economía emergente podemos vislumbrar que el apoyo al proyecto espacial mexicano seguirá siendo corto e intermitente, por lo que es necesario que los desarrolladores de proyectos espaciales mexicanos continúen buscando soporte en entidades internacionales, universidades que persigan el mismo objetivo y en industria de capital privado a la cual le interese el desarrollo de proyectos espaciales, con la finalidad de obtener los recursos necesarios para la implementación de proyectos espaciales.

La importancia de esta tesis es que da pie a generar un marco estructurado de diseño de misiones espaciales, el cual puede ser utilizado para pedir apoyo a diferentes organizaciones e instituciones. El tener claros los objetivos de la misión es punto de partida básico para tener un proceso de diseño claro que asegure cumplir con todos los requerimientos identificados de la misión aumentando las posibilidades de tener una misión exitosa.

Esta propuesta busca ser una guía que ayude al desarrollador a generar la documentación necesaria del proyecto y del proceso de diseño de la misión espacial la cual permita establecer los requerimientos de esta, asignar las tareas que cada subsistema deberá desarrollar para cumplir con los requerimientos que les han sido asignados, realizar planeaciones de costos y de cronogramas. Esta información permite tener pláticas de alto nivel con las organizaciones que

proveerán los recursos con información detallada de la misión y fácil de seguir por personal que no se encuentre familiarizado con el proyecto.

La metodología propuesta para el diseño de misiones espaciales contenida en el capítulo sexto, es una primer propuesta que busca fungir como base para la metodología de diseño de misiones espaciales en México.

Al ser esta el punto de partida o primer bosquejo de la metodología mexicana para el diseño de misiones espaciales, se entiende que este es un documento perfectible y vivo, que debe estar sujeto a revisiones llevadas a cabo por los desarrolladores de misiones espaciales en México, con la finalidad de ser actualizado, mejorado y complementado.

La propuesta metodología intenta ser un guía para el desarrollador de misiones espaciales, es imprescindible que se sumen a este esfuerzo equipos interdisciplinarios que aporten su experiencia para hacer crecer esta metodología y complementar las áreas de interés de los usuarios.

7.2. Trabajo Futuro

A continuación, son listadas las propuestas sobre el trabajo a futuro que es posible realizar basándose en esta metodología de diseño de misiones espaciales de referencia:

- a. Actualización y mejora basándose en misiones espaciales en proceso.

Como se mencionó anteriormente al ser una propuesta viva, esta debe de ser actualizada y mejorada por sus usuarios (desarrolladores de proyectos espaciales). La finalidad es tener una metodología mexicana que sea útil en el campo de la ingeniería espacial, que sea una guía en el desarrollo de misiones espaciales en México, que sea flexible para su aplicación en diversas misiones espaciales, que cumpla con los requerimientos mínimos indispensables de otras metodologías para así poder realizar proyectos entre diferentes agencias espaciales, teniendo tener puntos comunes entre diferentes metodologías.

- b. Comparación con la metodología rusa.

La propuesta de metodología de diseño para misiones espaciales desarrollada en el capítulo sexto de este documento tiene como base dos metodologías: La base desarrollada en el libro *Space Mission Analysis and Design* y la metodología utilizada por la Agencia Espacial Europea descrita a través de los estándares publicados por *European Cooperation Space Standardization*.

Se propone realizar una nueva comparación de esta metodología utilizando ahora como metodología de referencia a la escuela rusa. La finalidad será el tener una nueva propuesta de metodología que sea común a tres de los principales desarrolladores a nivel mundial de proyectos espaciales.

c. Comparación con la metodología china y japonesa.

En los últimos años la participación de China y Japón ha incrementado en el campo espacial. Estos países se están convirtiendo en potencias tecnológicas mundiales por lo cual resultará interesante el conocer su proceso de diseño para misiones espaciales y complementar con esta información la metodología de diseño de misiones espaciales mexicana.

d. Metodologías por subsistema.

Detallar la metodología de diseño para misiones espaciales con estándares por subsistemas donde se describan los procesos a seguir para su diseño, incluir la lista de requerimientos normalmente asociados al subsistema, prácticas óptimas para su diseño, herramientas utilizadas, tipos de análisis a realizar, consideraciones a tener en cuenta dentro de los análisis, formato de resultados, filosofía de modelo por subsistema, tipos de pruebas de verificación a las que el subsistema estará sujeto.

e. Estudio de la influencia de las diferentes escuelas de ingeniería espacial dentro de la UNAM.

La intención de este estudio es la de analizar cómo es que trabajan los recursos humanos que han sido formados por diferentes escuelas en el mundo (escuela espacial rusa, escuela espacial estadounidense, escuela espacial europea, escuela de la industria mexicana, escuela de la industria internacional), identificar las fortalezas y debilidades de cada una de las escuelas que actualmente desarrollen proyectos espaciales dentro de la UNAM.

Los objetivos son: Detallar la metodología de diseño de misiones espaciales mexicana con la retroalimentación obtenida por los recursos humanos formados por las diferentes escuelas y optimizar a los recursos humanos en los proyectos espaciales desarrollados dentro de la UNAM.

Referencias

1. IEEE Std 521-2002 Standard Letter Designations for Radar-Frequency Bands.
2. Santillán, S., Romo, C., Ramírez, J., De la Rosa, S., Sánchez, E., Lozano, P., Sáenz-Otero, A., Grutter, M. & Prado, J. (2012, Noviembre). Proyecto satelital Quetzal UNAM-MIT. Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología Aeroespacial, A. C., ISBN 978-607-95625-0-2, 129-135. 2012, Noviembre, De 2do Congreso Nacional y 1er Latinoamericano de Ciencias y Tecnología Aeroespacial base de datos.
3. Romo, C. & Santillán, S. (2017, Agosto 2). Documento Rector Quetzal. Centro de Alta Tecnología. 2018, Enero 20, De Grupo Aeroespacial Base de datos
4. Santillán, S., Romo, C., Ramírez, J., Chavez, J. & Aparicio, M. (2016, Septiembre). Microsatélite "Quetzal". Centro de Alta Tecnología, 2016, Septiembre, De Grupo Aeroespacial Base de datos.
5. Lynn, J. (Agosto, 2017). Aura atmospheric chemistry. Diciembre, 2017, de National Aeronautics and Space Administration Sitio web:
https://www.nasa.gov/mission_pages/aura/main/index.html
6. Akimasa, S., Teruyuki, N., Akira, S., Toshio, K., Humihiko, N., Sonoyo, M., Teruo, A., Joji, I., Ryutaro, T., Masahisa, K., Naoto, E., Masato, M., Motoya, S. & Yasuhiro, S. (1999, Noviembre 15). The ADEOS-II Science Plan. National Space Development Agency of Japan Earth Observation Research Center, Vol.1 Science Research Project Document, 82. 2012, Agosto, De National Space Development Agency of Japan Earth Observation Research Center Base de datos.
7. Larson, W. J, and Wertz, J. R., Space Mission Analysis and Design, Publicado por: Space Technology Library, Microcosm Press and Kluwer Academic Publishers, California, USA, ISBN 1-881883-10-8 (2005)

8. European Space Agency. (-). Envisat Mission Summary. Enero, 2018, de European Space Agency Sitio web: <https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-eo-missions/envisat/mission-summary>
9. Romo, C., Ferrer, J., Santillán, S., Ramírez, J. & Chávez, R. (2016, Septiembre). Development of the satellite platform Quetzal for monitoring the pollution emission column and the remote sensing of national territory. International Astronautical Federation (IAF), 67th International Astronautical Congress (IAC), 4. 2018, Marzo, De International Astronautical Federation (IAF) Base de datos.
10. ECSS-S-ST-00C. ECSS System. Description, implementation and general requirements, European Cooperation for Space Standardization, Noordwijk, The Netherlands, 31 July 2008.
11. ECSS-S-ST-00-01C. ECSS System. Glossary of terms, European Cooperation for Space Standardization, Noordwijk, The Netherlands, 1 October 2012.
12. Taylor, A. (2013). The 'Model Philosophy' Used by Space Engineering Companies. 2018, Enero, de EE Times Sitio web: https://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1318780
13. Imperial College London. Space Project Model Philosophy. Enero, 2018, de Imperial College London Sitio web: <http://www.imperial.ac.uk/space-and-atmospheric-physics/research/areas/space-magnetometer-laboratory/space-instrumentation-research/space-instrument-design/philosophy/>