Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente

Reconocimiento de validez oficial de estudios de nivel superior según acuerdo secretarial 15018, publicado en el Diario Oficial de la Federación del 29 de noviembre de 1976.

Departamento de Procesos Tecnológicos e Industriales
Maestría en Ingeniería y Gestión de la Calidad



Construcción de una metodología especializada en el estudio de confiabilidad de vehículos aéreos no tripulados

---

TESIS para obtener el **GRADO** de
MAESTRA EN INGENIERÍA Y GESTIÓN DE LA CALIDAD

Presenta: **SOFÍA ALEJANDRA DEL TORO RUNZER**

Director **DR. RAÚL ARTURO GARCÍA HUERTA**
Tutor **DR. IGNACIO ÁLVAREZ PLACENCIA**
Asesor **M. SC. JUAN PABLO ZATARAIN HERNÁNDEZ**

Tlaquepaque, Jalisco. 28 de abril de 2023.

© Copyright 2023

La educación es el arma más poderosa que puedes usar para cambiar al mundo

- **Nelson Mandela**

Dedicado a mis padres y a mi hermana

Agradecimientos

Sueña y desea siempre con todo tu corazón. Pero no olvides que la estrella te guiará una parte del camino, tú tienes que trabajar duro y dar todo tu empeño. Y entonces podrás hacer tu sueño realidad (Disney en "La princesa y el sapo", 2009).

Hoy quiero expresar mi agradecimiento a todas las personas que trabajaron a mi lado y me acompañaron en estos 2 años y medio, ya que sin ellas no hubiera sido posible culminar esta etapa y cumplir uno de mis sueños.

Primero, doy gracias a Dios por darme la vida, la fuerza, la sabiduría y los recursos para poder alcanzar mis objetivos. Agradezco a mis padres por ser mi ejemplo, mi motor y apoyo desde el primer día que decidí emprender este viaje. Ustedes son la razón por la que siempre tengo hambre de ser mejor cada día, ya que trato de seguir sus huellas todos los días porque sé que al hacerlo, seguiré siempre el camino correcto. Agradezco también a mi hermana por su constante apoyo, incluso a la distancia, por sus consejos y por ser un ejemplo para mí. Solo quiero que se sientan orgullosos de esta persona que tanto los ama.

Agradezco al ITESO por aceptarme y por los retos que me presentaron con la simple intención de verme crecer. También a mis profesores y compañeros. Hace 2 años cuando inicié este camino, no esperaba aprender tanto de tantas personas. Mi crecimiento profesional y personal se debe a ustedes y a la institución

Finalmente agradezco a Softtek por darme la oportunidad de cumplir con este reto, a mis compañeros del trabajo, familiares y amigos más cercanos, GNO y *La Familia Posimista.* Desde el momento en que les conté que iniciaba este camino, solo recibí muestras de apoyo y nunca dudaron de mi capacidad para lograrlo.

A todos ustedes, su compañía y seguridad hacia mí, me motivó para seguir adelante en los momentos difíciles y con ustedes lograr llegar hasta el final.

Índice de siglas

TOG: Trabajo de Obtención de Grado

ITESO: Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente

UAV: Vehículo Aéreo No Tripulado (siglas en inglés)

PADS: Sistema de Entrega Aérea de Precisión (siglas en inglés)

IC: Ingeniería Concurrente

RAMS: Confiabilidad, Disponibilidad, Mantenimiento y Seguridad (siglas en inglés)

QFD: Despliegue de la Función de Calidad (siglas en inglés)

RBD: Diagrama de Bloques de Confiabilidad (siglas en inglés)

FTA: Análisis del Árbol de Fallos (siglas en inglés)

AMEF: Análisis de Modo de Efecto de Falla

NPR: Número de Prioridad de Riesgo

Resumen:

El trabajo presenta la aplicación de la ingeniería concurrente, integrando herramientas de calidad y seguridad, con el fin de construir una metodología enfocada en el estudio de la confiabilidad de un vehículo aéreo no tripulado especializado en trabajar en zonas de difícil acceso. Una vez que la arquitectura del vehículo fue confirmada, el siguiente paso es simplificarla para evaluar su confiabilidad intrínseca en la etapa de diseño y evitar cualquier falla que pueda causar un efecto catastrófico una vez que se utilice en campo. La metodología creada consiste en 3 pasos: primero se realizó un estudio del diseño base a través del despliegue de la función de calidad; después se desagregó la estructura del vehículo para analizar la interacción de sus componentes; y finalmente, por temas de prevención de riesgos, se aplicó un análisis de fallas. A través de la implementación de la metodología, se definió que el reto para todos los involucrados en la construcción de un UAV es encontrar el balance perfecto entre seguridad, automatización y operatividad. Para analizar cómo se está abordando este desafío, se procedió a analizar el proyecto con el objetivo de identificar posibles fallas que el prototipo actual pueda tener. Este análisis se basó en un desglose de componentes y un estudio de la historia y los cambios realizados.

Palabras clave: UAV, ingeniería concurrente, confiabilidad, QFD, desagregación, FMEA

Lista de Diagramas

Diagrama 1 - El ciclo de vida de un producto....22
Diagrama 2 - Estructura del QFD 23
Diagrama 3 - Estructura de un diagrama de árbol....24
Diagrama 4 - Estructura de un RBD en serie 24
Diagrama 5 - Estructura de un RBD en paralelo....25
Diagrama 6 - Estructura de un RBD híbrido....25
Diagrama 7 - Estructura del FTA con conversión a RBD....26
Diagrama 8 - Diagrama de árbol para la desagregación del UAV 38
Diagrama 9 - FTA del UAV.... 39
Diagrama 10 - Ishikawa sobre las fallas encontradas....41
Diagrama 11 - Ishikawa sobre el alto RPN actual....42

Lista de Tablas

Tabla 1 - Escala para la severidad....27
Tabla 2 - Escala para la ocurrencia 27
Tabla 3 - Escala para la detección....27
Tabla 4 - Prototipo 4 vs Prototipo 5 (cambios)....28
Tabla 5 - Prototipo 4 vs Prototipo 5 (descripción)....29
Tabla 6 - Etapas principales durante la misión de un UAV 30
Tabla 7 - Fallas de un UAV por criticidad 31
Tabla 8 - Voz del cliente vs Voz del ingeniero 31
Tabla 9 - Leyenda para el QFD....34
Tabla 10 - Análisis de la voz del ingeniero....34
Tabla 11 - Escala de relación para el QFD....35
Tabla 12 – QFD del UAV 35
Tabla 13 - Visualización de componentes electrónicos para el UAV....37
Tabla 14 - AMEF de Despegue....40
Tabla 15 - AMEF de Vuelo....40
Tabla 16 - AMEF de Descenso y recuperación....41
Tabla 17 - AMEF de acciones controladas 43
Tabla 18. Matriz de prioridades para acciones futuras....46

Tabla de Contenido

CONSTRUCCIÓN DE UNA METODOLOGÍA ESPECIALIZADA EN EL ESTUDIO DE CONFIABILIDAD DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS....11

CAPÍTULO I....11
1. Fundamentación del trabajo....11
1.1. Introducción del trabajo....11
1.2. Descripción de la problemática percibida que justifica la investigación....12
1.3. Análisis del contexto y escenario del objeto de estudio....13
1.3.1. Entorno del objeto de estudio....13
1.3.2. Descripción del escenario que se planea investigar....13
1.3.3. Validación de las condiciones del escenario....14
1.4. Objetivos de la investigación....14
1.4.1. Objetivo general....14
1.4.2. Objetivos particulares....14
1.5. Relevancia y pertinencia del trabajo....15

CAPÍTULO II....16
2. Marco conceptual de referencia....16
2.1. Estado de la cuestión....16
2.2. Conceptos y enfoques teóricos relacionadas....18
2.2.1. La metodología....18
2.2.2. La Ingeniería Concurrente....19
2.2.3. Confiabilidad, Disponibilidad, Mantenimiento y Seguridad (RAMS)....20

CAPÍTULO III....22
3. Marco metodológico construido....22
3.1. Justificación con base en el proyecto....22
3.2. Definición teórica de la metodología....23
3.2.1. Diseño conceptual....23
3.2.2. Desagregación del producto....24
3.2.3. Análisis del sistema....26

CAPÍTULO IV *28*
4. Aplicación de la metodología 28
4.1. Línea base para la aplicación de la metodología 28
4.2. Imprevistos de la aplicación 29
4.3. Desarrollo de la aplicación 30
4.3.1. Definición de objetivos y requerimientos de calidad del producto a través del diseño conceptual 30
4.3.2. Desagregación del producto en componentes y estimación de confiabilidad. 36
4.3.3. Análisis del producto para aprovechar nuevas oportunidades de mejora. 38

CAPÍTULO V *44*
5. Exposición de hallazgos 44
5.1. Organización de la información obtenida 44
5.2. Impacto de la estrategia en el objeto de estudio 47

CAPÍTULO VI *49*
6. Discusión final 49
6.1. Aspectos de mejora para futuras investigaciones 49
6.2. Relevancia y trascendencia disciplinaria de la investigación 50

BIBLIOGRAFÍA **52**

REFERENCIA DE IMÁGENES **55**

GLOSARIO **56**

CONSTRUCCIÓN DE UNA METODOLOGÍA ESPECIALIZADA EN EL ESTUDIO DE CONFIABILIDAD DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS

CAPÍTULO I

1. Fundamentación del trabajo

Este capítulo tiene como objetivo presentar el proyecto, sus objetivos, el problema a abordar y otros elementos de éste como justificación, distinción, contexto y alcance. Esto se realiza con una adecuada selección tomando en cuenta los tiempos y otros recursos de apoyo para la realización del proyecto. También se presenta una argumentación sólida sobre la importancia de la investigación identificando los beneficios a obtener en un desarrollo propio profesional.

1.1. Introducción del trabajo

Diariamente, el ser humano está en constante uso de diversos artículos y servicios de cualquier tipo o categoría. Todas las personas, esperando un valor agregado a su vida, destinan ya sea tiempo o dinero en adquirir los productos de su preferencia y a cambio esperan que cumplan su función sin falla alguna. Dicho en otras palabras, cada que el usuario hace una inversión espera calidad, seguridad y confiabilidad (Zapata, 2011).

> Los estudios de confiabilidad han cobrado bastante interés en los últimos años debido a la gran competencia en el mercado, en el cual los clientes exigen un mejor rendimiento de los productos y un mejor servicio acorde con el precio que pagan por ello. (Acuña, 2003, p.23).

En los proyectos activos del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente (ITESO) se está llevando a cabo uno titulado: Navegación de sistemas de entrega aérea de precisión. El proyecto trata de investigar, modelar y construir un Vehículo Aéreo No Tripulado (UAV, por sus siglas en inglés) diseñado para el transporte de cargas útiles enfocado en el modelado de la dinámica de vuelo compuesto por un Sistema de Entrega Aérea de Precisión (PADS, por sus siglas en inglés).

Uniendo ambos temas, este caso de estudio pretende emplear procedimientos ingenieriles para construir una metodología que sirva para analizar el diseño de un vehículo aéreo no tripulado llevando a cabo los estudios necesarios con respecto a la calidad, seguridad y confiabilidad. Particularmente la metodología consiste en: definir los objetivos y requerimientos de calidad del vehículo, identificar los subsistemas del vehículo con sus componentes y finalmente estudiar la historia de las pruebas a través de un análisis de fallas.

1.2. Descripción de la problemática percibida que justifica la investigación

Los problemas de calidad, seguridad y confiabilidad de un UAV se han convertido en un tema considerable en los últimos años, debido a que la ingeniería aeronáutica ha evolucionado tan rápido que sale de los límites de control del ser humano. Hoy en día, el sofisticado sistema del UAV tiene un fracaso global del 25%. Los estudios en marcha se basan en la optimización de las actividades relacionados con el cuidado de cada subsistema de acuerdo con su criticidad y a los requisitos de protección, garantía y defensa (Petritoli, Leccese y Ciani, 2018).

> La aviación no tripulada es tan antigua como la tripulada, pero en los últimos tiempos el mercado se está desarrollando muy rápidamente [...] Del mismo modo, también han surgido un gran número de plataformas con configuraciones y rendimientos muy diferentes. Sin embargo, para una perfecta integración de las operaciones civiles y comerciales de estas aeronaves, habrá que resolver varios problemas (Cuerno, García, Sánchez, Carrio y Sánchez, 2016).

1.3. Análisis del contexto y escenario del objeto de estudio

1.3.1. Entorno del objeto de estudio

El uso de los UAV tiene varias funciones en el campo y se afirma que es un tema que se expande a ser investigado en el futuro cercano. Los vehículos están siendo utilizados en diferentes campos como militar, agricultura, comercial y científico. Aparte del avance tecnológico que claramente es un punto interesante, el impacto social es el primordial. Principalmente son diseñados para entregar cargas que en su contenido lleven medicina, muestras de sangre, equipo de rescate y otros suplementos médicos a zonas donde el acceso vehicular es muy complicado. Si el apoyo al sector salud no es suficiente, ante un desastre natural los UAV sirven para entregar todo tipo de elementos en zonas donde el terreno ha sido afectado y vehículos terrestres no puedan llegar. Para los casos de desastres relacionados a la minería, estos vehículos pueden colaborar en actividades de búsqueda y rescate (García, González y Villalón, 2020).

Directivos de Lucintel, la consultora líder de gestión y mercado a nivel mundial, aseguran que los UAV son un sector emergente de la industria aeroespacial. Afirman que cuentan con gran oportunidad y demanda de la que se puede obtener una alta rentabilidad en el futuro cercano (2011).

1.3.2. Descripción del escenario que se planea investigar

Existen modelos UAV que usan una tecnología muy costosa que involucra componentes delicados; en caso de que los vehículos fallen los elementos pueden ser dañados en distintas etapas del traslado y es ahí donde el sistema de precisión es requerido. El PADS hace uso de una guía controlada que aumenta la probabilidad que el equipo tenga un aterrizaje con éxito. Con el modelo se ha trabajado desde 1970 y con el pasar de los años se han creado diferentes prototipos con sus propias características técnicas. Los participantes del proyecto han diseñado y estudiado uno compuesto por un paracaídas y una unidad de control compuesta de sensores y actuadores que ayudan a que la carga útil llegue a su destino.

1.3.3. Validación de las condiciones del escenario

Una vez estudiado el enfoque de la investigación, con el fin de asegurarse de la realización del proyecto, se tomarán en cuenta ciertas condiciones.

- Identificación de actores: Para realizar esta investigación se cuenta con el apoyo del director del proyecto y asesor también del Trabajo de Obtención de Grado (TOG) el doctor Raúl García. En el enfoque sobre calidad el maestro Juan Pablo Zatarain y el profesor Ignacio Alvarez prestarán la guía necesaria.
- Sostenibilidad del proyecto: Dado que es una investigación en curso dentro de la institución se considera que existen las condiciones necesarias para trabajar en el proyecto durante el periodo requerido.
- Tiempo requerido: Se tiene la disponibilidad del tiempo adecuado para la realización de un estudio completo y significativo para el proyecto en curso.

1.4. Objetivos de la investigación

1.4.1. Objetivo general

- Construir una metodología teórica especializada en el estudio de confiabilidad de vehículos aéreos no tripulados guiados por un sistema de entrega aérea de precisión.
- Aplicar la metodología construida en el proyecto del ITESO: Navegación de sistemas de entrega aérea de precisión.

1.4.2. Objetivos particulares

- Realizar una investigación teórica adecuada para justificar un estudio sobre las pruebas de vida de los vehículos.
- Hacer una elección de las herramientas de calidad y confiabilidad significativas para la construcción y posterior aplicación de la metodología.
- Identificar los requerimientos técnicos de construcción para lograr un diseño conceptual y desarrollado del UAV estudiado.
- Reconocer y categorizar los riesgos a través del estudio de la probabilidad de fallas en el pasado, presente y prevención a futuro.

1.5. Relevancia y pertinencia del trabajo

Después de examinar las necesidades del proyecto en marcha, se concluyó que estudiar la confiabilidad es sustancial porque la etapa del diseño es momento adecuado para empezar a tomar acciones en el tema de la seguridad.

La confiabilidad es una característica de la calidad que estudia de un artículo el rango de utilización, sus requerimientos y aspectos de seguridad. “Es un parámetro que realmente une a un equipo de diseño y proporciona un enfoque para la máxima satisfacción del cliente” (Ireson, Coombs y Moss, 1995). Expertos afirman que garantizar un nivel específico abarca todas las etapas de un componente o sistema: planeación, boceto, fabricación, instalación y operación. Por ello, un plan de confiabilidad es tan necesario como el de calidad en el ciclo de vida de un producto.

CAPÍTULO II

2. Marco conceptual de referencia

Toda investigación conlleva una búsqueda previa de lo existente y de lo conceptual que la sustente teóricamente. En este capítulo se presenta el estado de la cuestión y los conceptos y enfoques teóricos relacionados. Un estado de la cuestión es el resultado de un proceso de búsqueda y organización de información relacionada con el problema que quieres intervenir. Éste implica sobre todo un ejercicio de reconocimiento de los principales debates que se tienen con respecto a dicho problema. Por otro lado, para construir el problema no basta con definirlo, sino es necesario el desarrollo de algunos términos para facilitar su comprensión y esclarecer su alcance.

2.1. Estado de la cuestión

Desde el principio de los tiempos, el mundo se encuentra evolucionando constantemente. Hoy en día se vive la llamada Era Industrial 4.0 donde el consumo y los conceptos se han visto transformados, teniendo mayor impacto el área tecnológica en avances como los vehículos aéreos no tripulados, la impresión 3D, la realidad aumentada, entre otros. El presente TOG pretende desarrollar los estudios necesarios para asegurar el uso de un avance tecnológico en desarrollo actualmente: los vehículos aéreos no tripulados. “Los UAV también son considerados avances tecnológicos clave en la Era Industrial 4.0 ya que permiten llevar a cabo tareas repetitivas y peligrosas sin alguna intervención o supervisión humana” (Fernández, Blanco, Suárez y Fraga, 2018).

Los vehículos de este tipo han existido desde los comienzos de la ingeniería aeronáutica solo que últimamente su mercado se ha desarrollado más rápido de lo normal. “UAV expenditures reached more than US$ 3 billion and constituted a growth of more than 12% in 2010” (Lucintel, 2011). Antes abarcaba exclusivamente temas bélicos, ahora los vehículos no tripulados, en el desarrollo de esta era, empiezan a verse como una solución en la mejora de los procesos en actividades relacionadas con la ayuda humanitaria, apoyo en proyectos audiovisuales, inspecciones agrícolas, labores de rescate en desastres naturales, entre otros (Rao, Vinod y Ajit, 2020). Este incorporamiento obliga a los líderes de las compañías manufactureras del producto a asegurar la operación con éxito rotundo y una manera es a través de un estudio completo del mismo.

Cuerno, et al., en su *artículo Evolución histórica de los vehículos aéreos no tripulados hasta la actualidad*, advierten de los desafíos a abordar en un futuro, que se relacionan con el desarrollo y la correcta aplicación de las nuevas tecnologías; pero, sobre todo, afirman que para seguir desarrollando los UAV es necesaria una mayor confiabilidad, un marco normativo adecuado y una cartera estable de pedidos que funjan como requisitos indispensables para lograr un diseño idóneo (2016, pág. 288).

En la Era Industrial 4.0 la tecnología es el instrumento base en el camino a producir las cosas donde realmente la innovación forma parte. Son los avances tecnológicos aquellos que permiten incorporar información, trasladarla y procesarla de forma inteligente. Por ende, la interacción colaborativa y permanente entre los elementos que componen la cadena de valor es uno de los ejes centrales del cambio. Y de esta interacción gracias a la era industrial 4.0 ha nacido la Ingeniería Concurrente (IC) (Guillén, 2019).

En el estudio sobre la confiabilidad de los productos, el aporte de la IC se relaciona con la prevención de defectos que se pueden originar esencialmente durante la manufactura de producto y que se convierten en fallas durante la puesta en uso o durante la vida útil. La relación de ambos conceptos es muy importante, pues muchos de los errores y malfuncionamiento de los productos tienen sus causas en la etapa de concepción y diseño de producto de proceso (Acuña, 2003).

Como actualmente el uso de vehículos aéreos no tripulados involucra muchas industrias, la ingeniería concurrente es la ciencia adecuada para definir por completo los problemas y poderlos solucionar de la manera óptima. Beltrán, Lengerke y Acuña con el fin de controlar la altura del vuelo de su UAV aplicaron metodologías relacionadas con la ingeniería concurrente para entender los diversos sistemas incluyentes al vehículo, entre ellos están el de control, mecánico, computacional y eléctrico (2011).

El estudio de la disciplina sobre Confiabilidad, Disponibilidad, Mantenimiento y Seguridad (RAMS, por sus siglas en inglés) cada vez está siendo más atractivo en la Era Industrial 4.0. Rao, et al., expertos en el tema, mencionan en su libro *Advances in RAMS Engineering* que las actividades típicas de esta especialidad contribuyen significativamente en la etapa de diseño y en la operación de sistemas de soporte para la homologación y regulación (2020).

Hoy en día empresas líderes en la aeronáutica buscan ingenieros de esta disciplina con la capacidad de proveer soporte y asesoría en relación con la confiabilidad de sus productos. SAFRAN, segundo proveedor más grande a nivel mundial en el sector aeronáutico menciona en la descripción de un puesto que como ingeniero de RAMS su candidato tiene que ser capaz de influir en el diseño del producto al proporcionar consejos de seguridad para que los diseños cumplan con la norma y, por lo tanto, faciliten el certificado de aeronavegabilidad (2022).

El estudio de RAMS en los UAV es prácticamente obligado si se tiene la intención de incrementar el grado de confiabilidad y reducir los costos de reparación y mantenimiento. Una vez que la arquitectura del vehículo fue seleccionada, esta evaluación es muy útil para identificar los elementos críticos que incrementan la razón de falla y también facilita la decisión sobre temas relacionados con la seguridad (Petritoli, et al., 2018).

En lo anterior se analizó cómo la etapa de diseño en la creación de un UAV es de suma importancia y criticidad. Se cuenta con la ciencia ingeniería concurrente y la disciplina RAMS que la aplicación de ambas sirve para asegurar que el prototipo cumpla con todas las especificaciones técnicas. Ahora toca preguntarse si ambas pueden ser estudiadas en cualquier tipo de UAV, si hay un momento específico donde se apliquen las herramientas relacionadas a cada una de ellas, si hay requisitos que cumplir o si hay conocimientos técnicos que adquirir previo a la aplicación.

2.2. Conceptos y enfoques teóricos relacionadas

2.2.1. La metodología

Cuando se informa sobre la investigación, la creación de una metodología es una parte esencial de la presentación de los resultados ya que es la misma la ciencia que utilizamos para realizar esa indagación de manera eficaz y conseguir los resultados deseados y a través de ella se obtienen la estrategia a seguir. Una metodología eficaz y bien construida respalda los resultados logrados en un proyecto.

Una metodología debe de ser repetible. Una metodología tiene una justificación para ahondar en la investigación, una estructura sólida para darle razonamiento y una prueba de aplicación para dar veracidad a lo construido.

2.2.2. La Ingeniería Concurrente

La Ingeniería Concurrente (IC) es una ciencia que trata de encontrar nuevas maneras de concebir la ingeniería de diseño y desarrollo de artículos y servicios de forma global e integrada enfocada en el producto, el recurso humano y el material. Reemplaza, usando métodos especializados, el enfoque tradicional secuencial de la fabricación por un rumbo simultáneo más organizado con menos procesos vinculados en serie permitiendo así mejorar el proceso de nuevos productos y las capacidades competitivas (Fernandez, López, Sánchez y Antuña, 2020).

El término concurrente se refiere a la formación de equipos de trabajo formados por personas de diversas áreas con la finalidad de desarrollar y diseñar productos de acuerdo con los requerimientos de cliente; por ende la aportación fundamental de esta ciencia consiste en, una muy evolucionada forma, tratar la información disponible siempre orientado a que el servicio sea eficiente, eficaz y óptimo (Macas, 2017).

Con las herramientas de apoyo de la IC, muchos de los problemas causados en las etapas de planeación y manufactura pueden ser completamente prevenidos. Éstas están basadas en el diseño y rediseño teniendo en cuenta la funcionalidad óptima del producto además de la relación que tienen con todo el conjunto de reglas y requisitos a seguir.

Algunas de las herramientas de alto impacto integradas en el estudio de la ingeniería concurrente es el Diagrama de la Función de Calidad (QFD, por sus siglas en inglés). El QFD es una técnica que combina requisitos del cliente con los técnicos y ayuda a los diseñadores y fabricantes a producir mejores productos, mejorar su competitividad en el mercado y aumentar la satisfacción del consumidor.

2.2.3. Confiabilidad, Disponibilidad, Mantenimiento y Seguridad (RAMS)

RAMS es una disciplina conformada por múltiples herramientas implementada en los departamentos técnicos y de calidad de los sectores ferroviario, automotriz y náutico. Ésta hace posible que un producto cumpla la misión para la que fue diseñado bajo las condiciones de confiabilidad, disponibilidad, mantenimiento y seguridad (Daura, 2020).

- Confiabilidad: la probabilidad que un producto permanezca sin cambios a través del tiempo después de ciertas condiciones de uso basado en el ritmo de falla de cada elemento.
- Disponibilidad: el periodo que un producto está listo para usarse contemplando que todos los medios externos e internos necesarios tengan la capacidad de funcionar sin fallos o cambios a través del tiempo después de ciertas condiciones de uso.
- Mantenimiento: el estudio de asegurar la máxima disponibilidad de un sistema analizando cada componente e identificando los más críticos basados en costos, mayor ritmo de falla y tiempos de reparación.
- Seguridad: el estudio de la ausencia de peligro basado en el control y la mitigación de los riesgos.

El estudio RAMS promueve aplicar metodologías y herramientas para evaluar la afectación que puede tener el mal funcionamiento de un subsistema o equipo sobre el sistema completo. La aplicación se basa en la definición de amenazas. El reto de la disciplina es encontrar el balance entre la seguridad del sistema y su disponibilidad para funcionar, ya que, por norma general, ambos conceptos van en detrimento el uno del otro, es decir que a más seguridad, más mantenimiento y a más mantenimiento, menos disponibilidad. Esto significa que un buen análisis RAMS puede tener implicaciones económicas importantes de cara a la confiabilidad de un producto. El objetivo de RAMS es analizar y predecir de forma cualitativa y/o cuantitativa la capacidad de un sistema, instalación o equipo para desempeñar correctamente su actividad y sus funciones para las que ha sido diseñado y fabricado, en el aspecto técnico, logístico y económico (Daura, 2020).

Hoy en día existen empresas consultoras que operan bajo esta disciplina realizando estudios de confiabilidad, operando en áreas relacionadas con la seguridad y riesgo. A continuación se presentan algunos métodos y herramientas que RELSAFE, una consultora india con presencia a nivel mundial usa para su operación (2022):

- Análisis del Árbol de Fallas (FTA, por sus siglas en inglés): técnica que describe el sistema funcional y permite calcular la probabilidad de ocurrencia de lo que se ha definido como falla a partir de las probabilidades de los eventos básicos y su combinación.
- Análisis del Modo Efecto de Falla (AMEF): herramienta donde se lleva a cabo un análisis de posibles fallos (aleatorios o sistemáticos) estudiados jerárquicamente identificando las causas, efectos y modos.

CAPÍTULO III

3. Marco metodológico construido

Una vez explicada la ciencia de la ingeniería concurrente y la disciplina RAMS, a continuación, se introduce la metodología construida, justificar su orden, definir de donde se inicia, el proceso que se seguirá y las herramientas más afondo que se usarán.

3.1. Justificación con base en el proyecto

Actualmente el proyecto se encuentra en una etapa de confirmación de diseño, momento perfecto para llevar a cabo un análisis de pruebas de vida basado en la disciplina RAMS y la ciencia de la ingeniería concurrente. Éstas permiten, si se conducen correctamente, la solución de problemas críticos antes del proceso de manufactura o puesta en el mercado a través de la reducción de gastos y el control de riesgos. Específicamente, aplicar el método diagrama de función de la calidad, usando adecuadamente las herramientas que se ofrece, da como resultado un examen completo enfocado en los requisitos del producto provenientes de la voz del cliente y del ingeniero. Por otro lado, conducir un estudio sobre la disciplina RAMS mientras que el prototipo aún se está finalizando permite definir el sistema, analizar e identificar peligros y ejecutar revisiones detalladas en cuanto a la seguridad. En el análisis de confiabilidad es significativo considerar el ciclo de vida, pues es la forma más clara de establecer valores que satisfagan las expectativas del cliente. En el diagrama a continuación, Jorge Acuña presenta las siete fases de un producto y se puede observar que el diseño está relacionado directa o indirectamente en la mayoría de las etapas (2003).



Diagrama 1 - El ciclo de vida de un producto

3.2. Definición teórica de la metodología

3.2.1. Diseño conceptual

Esta fase se realiza con el equipo completo involucrando al que trae la voz del cliente hasta los ingenieros expertos en manufactura. El objetivo es reconocer las limitaciones tecnológicas e ingenieriles de materiales y máquinas.

Un diagrama de Despliegue de Función Calidad (QFD, por sus siglas en inglés) es una excelente herramienta para este tipo de análisis. Es un diagrama que estudia en conjunto los requerimientos de cliente, para transformarlos en los puntos clave para el desarrollo de los productos. Esta transformación sucede en un estudio de matrices con una definición de normas para cumplir los requerimientos asegurando que los productos funcionen en todo su ciclo de vida administrando de una forma óptima los recursos. Se debe estudiar esta herramienta desde la etapa de diseño conceptual porque las decisiones tomadas en esta etapa proporcionan alrededor del 70% del éxito del proyecto al menor costo. El siguiente diagrama muestra la estructura base del diagrama (Filippova, 2019).

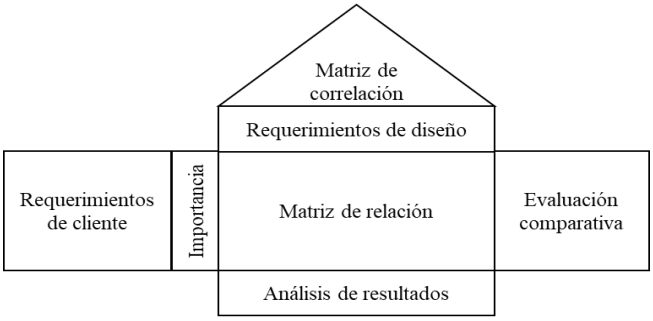


Diagrama 2 - Estructura del QFD

3.2.2. Desagregación del producto

Para productos complejos, la desagregación es una técnica muy útil, ésta consiste en dividir al producto en sus principales sistemas y éstos en sus componentes con el fin de determinar a nivel micro y después macro el valor de la confiabilidad. El diagrama de bloques de confiabilidad (RBD, por sus siglas en inglés) representa una división ordenada en la que no se dejen perdidos componentes esenciales donde se identifican muy bien la relación padre-hijo entre sistemas y partes (Acuña, 2003). Para construirlo es importante primero jerarquizar el sistema para identificar todos los sistemas y subsistemas que tiene el vehículo. Un diagrama de árbol es la mejor opción para este paso y el diagrama 3 nos indica la estructura de este.

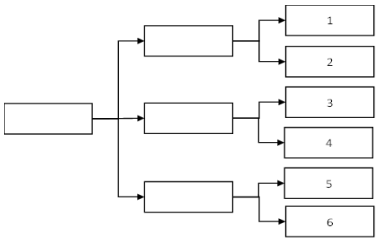


Diagrama 3 - Estructura de un diagrama de árbol

Después ya el diagrama de confiabilidad puede ser construido con el fin de estudiar la relación sistemática de los elementos. El diagrama de bloques de confiabilidad es un diagrama lógico que muestra cómo el sistema funciona, se realiza con el fin de identificar los elementos que se requieren y el orden de éstos para que un sistema opere adecuadamente. Los elementos pueden tener 4 posibles arreglos: serie, paralelo, redundante o híbrido y el cálculo de confiabilidad se ve afectada de forma directa dependiendo del tipo de sistema (Park, Choi, Sikorsky y Stubbs, 2004).

- Sistema en serie: se caracterizan porque el fallo de cualquier elemento conduce a la falla de todo el sistema. La confiabilidad del sistema en serie se calcula con el producto de las confiabilidades individuales de sus componentes.

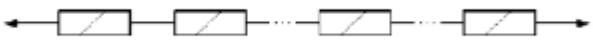


Diagrama 4 - Estructura de un RBD en serie

- Sistema en paralelo: se caracterizan porque el fallo combinado de todos los elementos del sistema resulta en la falla de este. La confiabilidad del sistema en paralelo se calcula con el producto de las redundancias individuales de cada uno de sus componentes.

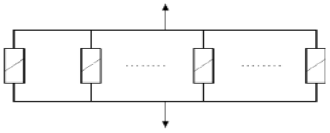


Diagrama 5 - Estructura de un RBD en paralelo

- Sistema híbrido: un sistema donde pocos, algunos o la mayoría deben fallar para que el sistema falle, una combinación entre paralelos y en serie donde el cálculo de la confiabilidad de un sistema así se realiza a través de un desglose, por secciones.

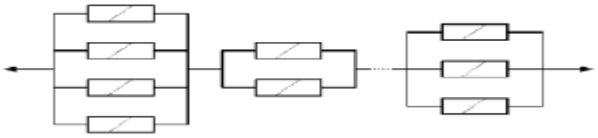


Diagrama 6 - Estructura de un RBD híbrido

3.2.3. Análisis del sistema

Los métodos de análisis de sistemas se clasifican en inductivos y deductivos. En este caso la base del análisis será el estudio de fallas de producto. Para el método de deducción usaremos un Análisis de Árbol de Fallos (FTA, por sus siglas en inglés) y para el de inducción usaremos un análisis de modo efecto de falla (AMEF). Con el análisis de falla se identifica la razón, el motor, y el ritmo del sistema (Acuña, 2003).

El análisis de árbol de fallos es un diagrama desarrollado en la década de los sesenta para facilitar el análisis del sistema de control de lanzamientos de misiles. Hoy en día, el FTA se ha convertido en una de las técnicas más utilizadas para los estudios de fiabilidad y seguridad en plantas de energía nuclear en la industria aeroespacial y en los sistemas de defensa. FTA es una técnica analítica cuya base es la deducción. Para construir un FTA se parte de un evento indeseado y de éste se determinan sus causas. Una vez definido el evento, se representan combinaciones de causas "conformando niveles sucesivos de tal manera que cada suceso esté generado a partir de sucesos del nivel inferior". El fin es obtener "sucesos básicos" con el fin de definir soluciones rápidas de mejora y mantenimiento para eliminar la tendencia de conversión de éstos a causas potenciales de los fallos. Los diagramas FTA y RBD tienen la misma intención ya que en ambos se representan las posibles combinaciones de éxito de componentes que llevan a un estado o nivel de rendimiento específico de un sistema. El diagrama 7 presenta tanto la estructura de un FTA como su conversión a un diagrama RBD (Xing y Amari, 2008).

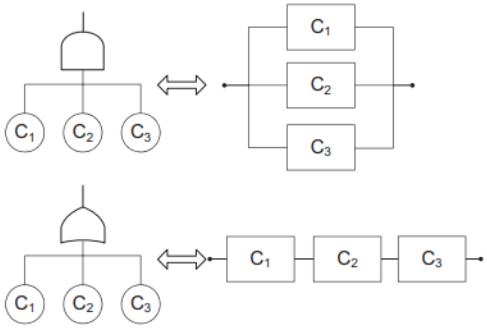


Diagrama 7 - Estructura del FTA con conversión a RBD

AMEF es de las herramientas más comunes en un análisis de fallas. Esta herramienta consiste en priorizar para cada falla su probabilidad de ocurrencia, severidad de los efectos y los niveles de detectabilidad. Esta priorización se realiza por medio del cálculo del Número de Prioridad de Riesgo (NPR) el cual es obtenido gracias al producto de los números indicados referentes a la severidad, detección y ocurrencia para cada falla analizada. Para esto se maneja un estándar para evaluar un artículo donde los 3 factores son asignados en un rango de 1 al 5 como se muestra en las tablas siguientes (1 – 3). Con este cálculo se define que el máximo valor posible del NPR es 125 y se tiene establecido que un resultado mayor a 30 es el valor crítico definiendo que es una falla con alta prioridad para corregir. (Osmic, Tahirbegovic y Tahirovic, 2018).

Escala	Descripción	Severidad
5	Daño físico a personas / Exposición de datos personales	Mayor
4	Daños materiales / Violación de datos confidenciales	Importante
3	Malfuncionamiento que resulte en desconformidad o escalación / Efecto moderado en el comportamiento	Significativa
2	Desconformidad menor / Pequeño efecto en el comportamiento	Regular
1	Tema inadvertido o que no afecta	Menor

Tabla 1 - Escala para la severidad

Escala	Descripción	Ocurrencia
5	Fallas persistentes | 80% o +	Muy probable
4	Fallas frecuentes | 60% < 80%	Probable
3	Fallas ocasionales | 40% < 60%	Creíble
2	Fallas relativamente pocas | 20% < 40%	No probable
1	Fallas atípicas | 20% o - de probabilidad	Raro

Tabla 2 - Escala para la ocurrencia

Escala	Descripción	Detección
5	Defecto no puede ser detectado ni corregido	Nula
4	Defecto no detectado al momento correcto y puede ser corregido.	Pequeña
3	Defecto puede ser detectado y puede ser corregido	Mediana
2	Defecto obvio y difícil de prevenir	Alta
1	Defecto obvio y fácil de prevenir	Muy alta

Tabla 3 - Escala para la detección

CAPÍTULO IV

4. Aplicación de la metodología

En este capítulo se detalla la aplicación de la metodología presentada, así como la línea base, los imprevistos que se detectaron previo a y el desarrollo mismo.

4.1. Línea base para la aplicación de la metodología

Previo a la aplicación de la metodología y la prueba de su veracidad y practicidad, es importante mencionar la línea base de dónde se partió para la aplicación. Actualmente el proyecto cuenta con un objetivo claro que define el porqué de la construcción de un vehículo de este tipo y cuál es el escenario ideal a donde se quiere llegar. Se tienen prototipos que ya fueron construidos, probados y algunos destruidos de los cuales se cuenta con evidencia documental, métricas de desempeño, dibujos computarizados sobre la estructura de estos y restos físicos. Se tienen registrados los cambios entre los prototipos y eso permite tener una historia de éxitos y fracasos lo que lleva a poder construir indicadores que aumentan las probabilidades de éxito. Hoy en día se está trabajando en el quinto prototipo basado en la historia y de éste se tiene un plan, un listado de su estructura y un estudio de la conectividad de sus componentes, este último es la primera vez que se realiza. Para la planeación de este nuevo prototipo y en apoyo con los antecedentes, se pretenden realizar pruebas de caracterización en componentes específicos. Las tablas presentadas a continuación describen los cambios entre el cuarto y el quinto prototipo.

¿Qué se mantiene igual?	¿Qué cambió?
Sensores de temperatura, presión y aceleración, el microprocesador y el sistema de almacenamiento.	Las cámaras, receptores de GPS, sistemas de baterías independientes entre subsistemas y el tipo de paracaídas.

Tabla 4 - Prototipo 4 vs Prototipo 5 (cambios)

Prototipo 4	Prototipo 5
Con el objetivo de obtener datos atmosféricos	Con el objetivo de probar tecnología de vuelo y controlar el descenso
¿Cómo va a subir?	
Globo de ascenso	Propela
¿Cómo va a almacenar información para recuperarla después?	
Componentes electrónicos, sensores y actuadores	
Sistema de almacenamiento alámbrico	Sistema de almacenamiento inalámbrico
¿Cómo va a bajar?	
Paracaídas, sin control	Paracaídas controlando su trayectoria
¿Cómo lo voy a recuperar?	
Sensor de ubicación cada vez mejorado	

Tabla 5 - Prototipo 4 vs Prototipo 5 (descripción)

4.2. Imprevistos de la aplicación

La principal controversia es comprender las dificultades teóricas y conceptuales de aplicar una metodología en el campo. El diseño metodológico es cualitativo, orientado por una lógica inductiva por lo que al momento de aplicarla se debe de poseer la capacidad para proponer estrategias que contribuyan a sacarle provecho a la historia del proyecto y así dar buenos resultados. El conocimiento en profundidad de estas dificultades y de los factores que las generan podrá servir de base para diseñar en el futuro aquellas estrategias alternativas para a mejorar los procesos de enseñanza y de aprendizaje de metodología de la investigación.

4.3. Desarrollo de la aplicación

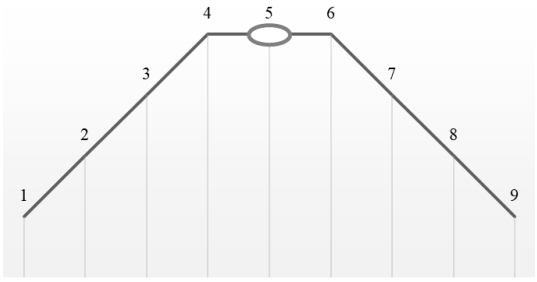
4.3.1. Definición de objetivos y requerimientos de calidad del producto a través del diseño conceptual

La aplicación para la construcción del diagrama QFD se divide en 3 secciones de análisis.

- Planificación del producto (enumeración de los deseos del cliente y traducción a características técnicas del producto)

La necesidad principal de este proyecto se desarrolla en que un vehículo aéreo no tripulado mientras esté en operación pueda reconocer datos atmosféricos y así actuar y liberar su carga en el momento y lugar adecuado. Al principio el proyecto se enfocó en la obtención y posterior recuperación de datos atmosféricos durante el vuelo a gran altura. Hoy en día el prototipo tiene otro objetivo.

Sabiendo esto, se definieron 3 etapas de la misión, base para la confirmación de la arquitectura representadas en la Tabla 6 cada una con su objetivo. Como complemento en la imagen se representa la intención de vuelo de un UAV (2007).



Etapa	Objetivo de la etapa	Imagen
Despegue	Preparación del vehículo para realizar la función	1 – 3
Vuelo	Entregar carga y almacenar información atmosférica	4 – 6
Descenso	Llegar a tierra y recuperar el sistema	7 - 9

Tabla 6 - Etapas principales durante la misión de un UAV

De la mano de esta información, se estudió que durante una misión, algunas fallas son más críticas que otras, éstas como la pérdida de la estabilidad, la pérdida de información recolectada, o la pérdida completa del sistema. Por lo tanto fue necesario establecer varios niveles de gravedad tanto para agilizar el enfoque objetivo de la construcción del sistema como para facilitar el análisis posterior de las fallas en los siguientes pasos. La Tabla 7 muestra cada nivel de falla a consideración con su respectiva descripción.

Nivel de falla	Descripción de la falla
Catastrófico	Daños irreparables del sistema que tienen como consecuencia daños a un tercero
Severo	Daños irreparables del sistema, sin daños a terceros
Moderado	Mal funciones del sistema que pueden llevar a cancelar la misión
Suave	Mal funciones del sistema pero no conducen a cancelar la misión

Tabla 7 - Fallas de un UAV por criticidad

Se definieron los parámetros más importantes que el diseño del sistema debe considerar basado en las características y componentes, el nivel de fallas posibles, su criticidad y etapas de la misión del sistema, definiendo esto como la voz del cliente. De cada parámetro se identificó la voz del ingeniero para que los requerimientos de diseño sean analizados. La Tabla 8 muestra dicha definición.

Etapa de operación	Voz del cliente	Voz del ingeniero
Despegue	Despegue acomedido	Operatividad
Despegue	Costo promedio	Costo
Vuelo	Vuelo controlado	Estabilidad
Vuelo	Resistencia	Materiales
Vuelo	Almacenar datos obtenidos	Sistema de memoria
Vuelo	Entrega directa	Automatización
Descenso	Descenso controlado	Operatividad
Descenso	Recuperación efectiva	Sistema de localización

Tabla 8 - Voz del cliente vs Voz del ingeniero

De cada requerimiento identificado se evaluó su importancia. Los resultados son presentados en las 5 primeras columnas de la Tabla 12. Los requerimientos más importantes son: vuelo controlado, entrega directa y recuperación efectiva.

- Planificación del diseño (justificación y análisis de características técnicas del producto elegidas)

Si bien para crear un producto es necesario basarse en las necesidades del cliente, estudiar las capacidades de los competidores también es un medio eficaz. La evaluación comparativa es un método para determinar fortalezas y debilidades del proyecto y así elegir la dirección de mejora. Actualmente existen 2 grandes empresas las cuales están trabajando día con día en mejorar el diseño de sus vehículos aéreos no tripulados especializados en entregas de carga ligera.

Amazon - Prime Air



El líder actual del comercio electrónico, Amazon, está diseñando unos drones para transportar los bienes desde los centros de distribución directamente hasta el cliente. Para el diseño de estos vehículos, Amazon tuvo que reconocer las especificaciones técnicas en el diseño para no dañar la operación así como carga máxima, alcance y tiempo de vuelo todo eso acorde a su mercado.

“Los drones deben de ser capaces de realizar las entregas con cargas con un tope de 2.3 kilos a 16 kilómetros a la redonda del almacén durante un vuelo de 30 minutos. Envíos por debajo de 2.3 kilos representan el 86% de todas las entregas” (Jung y Kim, 2017).

Durante el proceso de entrega, el dron recoge la carga en el almacén y es a través de un sistema de GPS que realizan el vuelo y posteriormente la entrega. A su vez, durante el vuelo el dron tiene un sistema de detección de obstáculos que les permite sortearlos con el fin de garantizar seguridad en sus operaciones tanto en vuelo como en descenso (Redacción CIO México, 2022).

Zipline



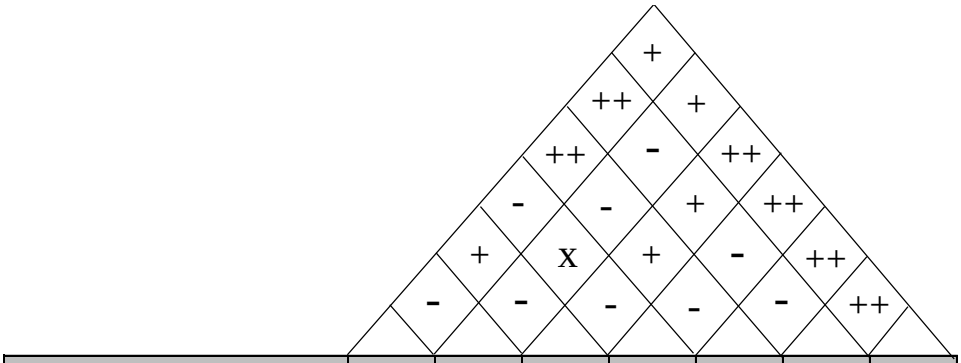
La compañía estadounidense Zipline tiene como labor “emplear drones no tripulados que lanzan a tiempo los suministros vitales allá donde hagan falta” (Barker, 2019). Hoy en día, cuenta con aviones miniatura volando y entregando suplementos médicos en diferentes zonas de África. Si bien el dueño sabe que es un logro a nivel mundial, también desea crear conciencia en los admiradores de todo lo que implica llevar a cabo el proyecto y lograr que cada entrega sea segura.

Los drones de Zipline son autónomos, son drones eléctricos que entregan a la gente lo necesario. La flota que tiene se compone de diferentes modelos médicos con diferentes limitaciones tecnológicas en cuanto a velocidad, resistencia y complejidad. Cada uno de los drones está configurado con equipos y sistemas de vuelo supervisados y controlados por seres humanos cuando es necesario. Desde octubre del 2016 esta compañía ha volado más de 2 millones de millas y entregado más de 60,000 suplementos médicos en Ghana, Ruanda y la India (Lamptey y Serwaa, 2020).

En este paso, los resultados del *benchmarking* nos permiten concluir que las características de diseño más importantes a cubrir son: operatividad, automatización y seguridad. Gracias al *benchmarking* también se dio pie a estudiar la correlación entre cada una de las características técnicas para comprender como los cambios en algunas pueden afectar a otras. También se identificaron las direcciones de mejora para evaluar el rendimiento futuro de cada característica técnica. Este análisis se muestra en las tablas 9 y 10.

Leyenda	
++	Correlación positiva fuerte
+	Correlación positiva
-	Correlación neutral
x	Correlación negativa
xx	Correlación negativa fuerte
⬇	Objetivo: minimizar
⬆	Objetivo: maximizar
⊙	Objetivo: puntual

Tabla 9 - Leyenda para el QFD



Columna #	1	2	3	4	5	6	7
Dirección de mejora	⬆	⬆	⬆	⊙	⊙	⊙	⬇
Voz del ingeniero / Voz del cliente	Operatividad	Estabilidad / Seguridad	Automatización	Materiales	Sistema de memoria	Sistema de ubicación	Costo

Tabla 10 - Análisis de la voz del ingeniero

- Despliegue de componentes (relación gráfica de la voz del cliente y las características técnicas)

Para este paso se construyó una segunda matriz donde se relaciona la voz del cliente y las características técnicas previamente escogidas y justificadas. La escala que se usó se presenta en la Tabla 11 y el resultado del análisis en la Tabla 12.

Grado	Puntaje	Símbolo
Fuerte	9	●
Mediano	3	◑
Débil	1	○

Tabla 11 - Escala de relación para el QFD

				Columna #	1	2	3	4	5	6	7
				Dirección de mejora	↑	↑	↑	⊙	⊙	⊙	↓
Fila #	Valor máximo	Peso relativo	Peso / Importancia	Voz del ingeniero / Voz del cliente	Operatividad	Estabilidad / Seguridad	Automatización	Materiales	Sistema de memoria	Sistema de ubicación	Costo
1	9	8.33	3	Despegue	●	◑				○	
2	9	5.56	2	Costo promedio		◑	○	◑			●
3	9	22.22	8	Vuelo controlado	●	●	◑		◑		
4	9	11.11	4	Resistencia		◑		●			◑
5	9	13.89	5	Alamcenar datos obtenidos	○		◑		●		
6	9	19.44	7	Entrega directa	◑		●	○			
7	9	2.78	1	Descenso controlado	●	◑	◑			◑	
8	9	16.67	6	Recuperación efectiva	●	◑				●	○
				Valor máximo	9	9	9	9	9	9	9
				Peso / Importancia	522.2	333.3	297.2	136.1	191.7	166.7	100.0
				Peso relativo	29.9	19.1	17.0	7.8	11.0	9.5	5.7

Tabla 12 - QFD del UAV

Una vez que se evaluó la relación entre los requerimientos del cliente vs los técnicos, se calculó la importancia y el peso relativo, últimas 2 filas de la Tabla 12. Se vuelve a concluir que los requerimientos técnicos más importantes son: operatividad, estabilidad/seguridad y automatización.

4.3.2. Desagregación del producto en componentes y estimación de confiabilidad.

Una vez entendido los requerimientos técnicos, es momento de estudiar la estructura con el fin de centralizar el cumplimiento acorde a lo incluido en la sesión pasada. El estudio dará pie a entender la posible distribución de fallas del sistema dando lugar, directamente durante la etapa de diseño, a tomar medidas específicas para reducir la criticidad y mejorar las partes o subsistemas críticos con anticipación, aumentando así el nivel general de fiabilidad. Para este paso de desagregación se realizó un análisis de los subsistemas y los componentes que los conforman. A continuación, se presenta un desarrollo de los 3 subsistemas más importantes en el UAV estudiado.

- Sistema estructural: la estructura de un UAV debe ser la parte más resistente de todo el sistema, puesto que en ella va implantados el resto de los componentes. Es este sistema el que determina el tamaño, las características y la cantidad de los otros componentes del vehículo. De hecho, aunque el tema de la resistencia conduce a un peso extra, sin duda es considerable pensar en un pequeño precio de más a pagar por un sistema estructural más seguro. La elección de materiales de este sistema es clave para lograr el objetivo de reducir el peso y aumentar la resistencia. Las fallas más comunes de este sistema están relacionadas a la unión de los componentes con la estructura misma y para contrarrestarlas se recomienda realizar diferentes pruebas previas a la misión como de resistencia de los materiales.

- Sistema de navegación: este es el más importante del vehículo, es el sistema con mayor número de subpartes por el alto nivel de miniaturización electrónica que un UAV posee. Para mitigar los riesgos relacionados a estos componentes, la redundancia es la técnica más adaptable. Este sistema es el que más requiere mantenimiento, puesto que dentro de él se incluyen también los elementos de entrega de potencia y una buena conservación de éstos asegurará un buen funcionamiento del vehículo. Relacionado con la navegación, el mundo aeroespacial cuenta con componentes electrónicos altamente confiables. Ésto asegurado gracias al desarrollo tecnológico con el cual funcionan como el avance que actualmente existe sobre los circuitos eléctricos y la capacidad de cómputo para el control manejado desde tierra.

- Sistema de sensores: Separado con la navegación, los sensores son componentes clave para el funcionamiento del UAV porque gracias a la recolección de datos y la respuesta de los actuadores se asegura un buen nivel de confiabilidad. Éstos pueden ser de velocidad, posición, presión, humedad, altura, temperatura, un giroscopio, un magnetómetro, entre otros. Las fallas más comunes de este sistema recaen en la limitación tecnológica de los mismos puesto que estudiarlos es una simple solución para evitarlas.

Posterior a la descripción de los principales subsistemas, en la siguiente tabla se muestran algunas fotos de los componentes utilizados para la construcción del prototipo en marcha.

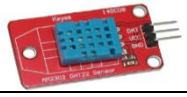
Ejemplificación de los componentes electrónicos del UAV		
Módulo GNSS ublox NEO-M8N	Acelerómetro con giroscopio MPU9250 y sensor digital de presión BMP280	Módulo indicador *Buzzer*
		
Arduino compatible BMP180 sensor de presión	DHT11 - Sensor de humedad y temperatura	Sensor de corriente continua INA219
		
Tarjeta de desarrollo ESP32-CAM	ESP32 DevkitC V4	Adaptador SD para Arduino
		
Servomotores 20kg	Cable Ethernet STP CAT 7, de 5 m, plano	Plug RJ45 de 8 contactos CAT 5e, para cable plano
		
Batería LiPo 7.4V	Paracaídas - parafoil	
		

Tabla 13 - Visualización de componentes para el UAV

Una vez estudiados los subsistemas más importantes de un UAV e identificados los componentes se construyó el diagrama de árbol donde se presenta la relación entre ambos.

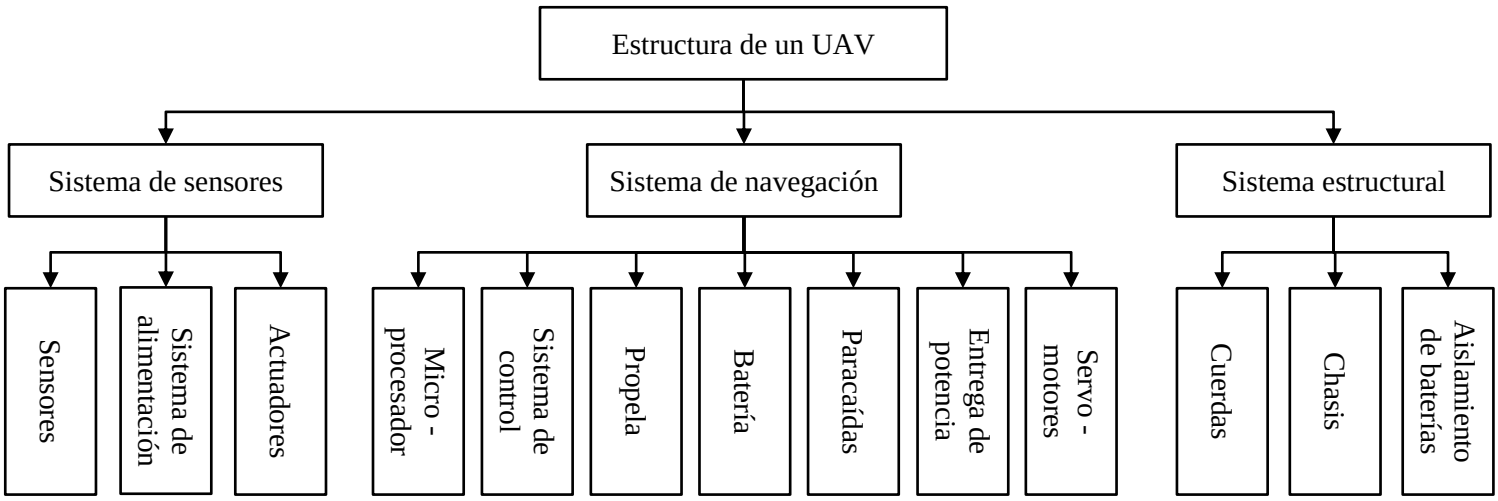


Diagrama 8 - Diagrama de árbol para la desagregación del UAV

En este paso se estudiaron, definieron y detallaron los sistemas principales de un vehículo aéreo no tripulado, siendo el estructural el más resistente, el de navegación el más importante y el de sensores el cual funciona como el cerebro de la operación, gracias al microprocesador.

4.3.3. Análisis del producto para aprovechar nuevas oportunidades de mejora.

Para este análisis se utilizó la herramienta de FTA y AMEF con el fin de descubrir y analizar todo modo de falla posible del sistema determinando su criticidad en los métodos inducción y deducción. De Oliveira y Sandoval en su artículo *Failure Analysis Methods in Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Applications* (2007) construyeron la base del diagrama presentado a continuación el cual sirve para identificar y reconocer a los componentes que pueden causar las fallas más comunes que pueden suceder en un vehículo aéreo no tripulado. La falla principal analizada se decidió por la pérdida de propulsión puesto que es gracias a una propela con lo que el UAV va a ascender y empezar la misión, si eso falla no hay misión que analizar para después mejorar.

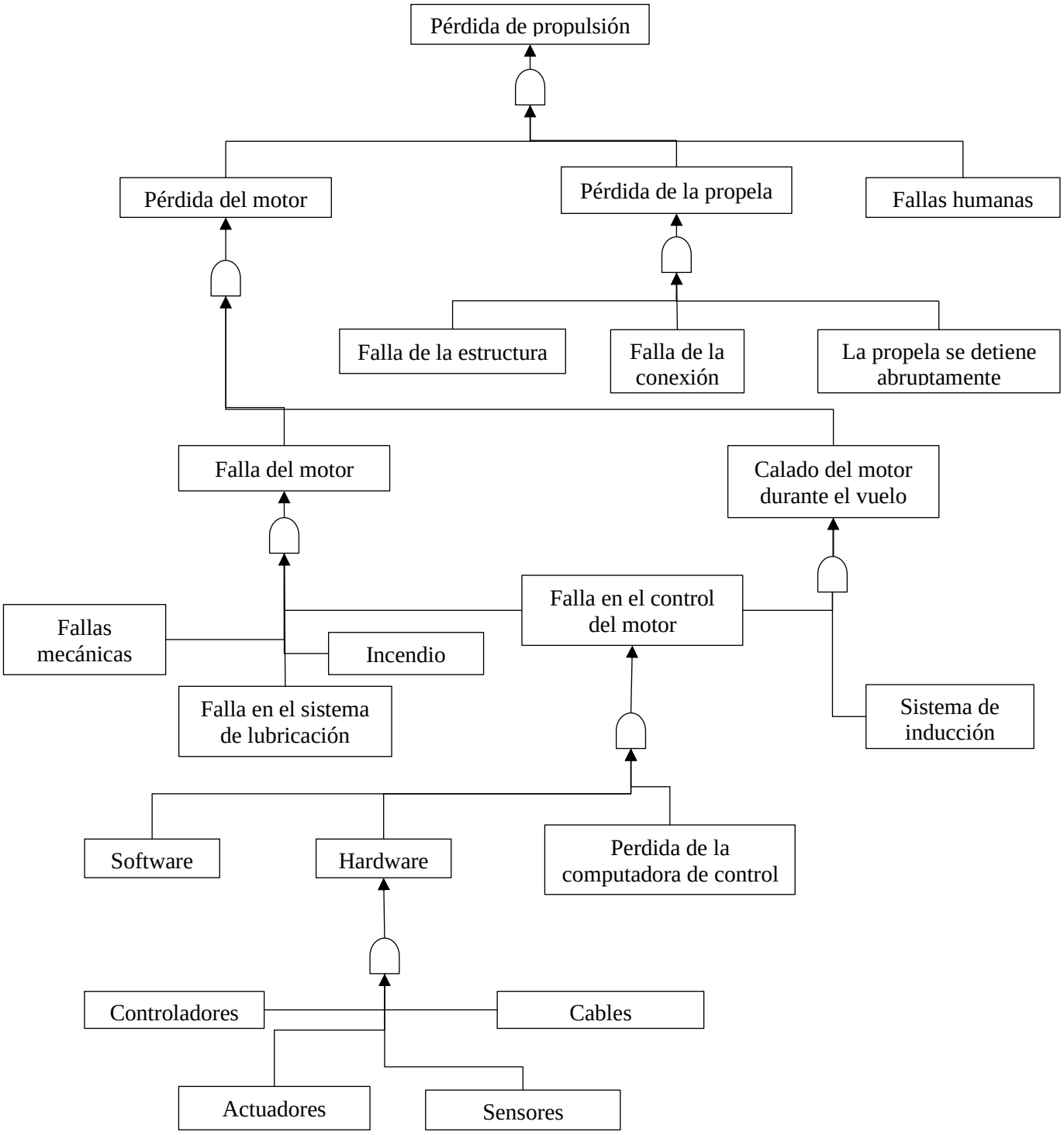


Diagrama 9 - FTA del UAV

Para enfatizar y no pasar de largo, en el diagrama anterior se indican 2 modos de fallas mecánicas y humanas. A continuación se muestra una división más relacionada con estos modos.

- Fallas mecánicas: mal mantenimiento, operación inapropiada, errores de diseño, materiales inadecuados, mal procesamiento de manufactura, sobrecalentamiento, vibraciones excesivas, entre otras.
- Fallas humanas: incorrecta reacción a las fallas, entrenamiento inadecuado, fatiga, fallas relacionadas a la ergonomía, entre otros.

Con el fin de analizar la historia de los prototipos, se construyeron 3 AMEF los cuales representan las fallas que se han presentado en las pruebas del proyecto durante las 3 etapas principales. Para cada posible falla se analizó el efecto a través de su severidad, la ocurrencia de su causa y después la propia ponderación de detección fue asignada.

#	Falla	Efecto	S	Causa	O	Control correctivo	D	RPN	Control para el cambio
1	Desconexión de componentes internos	Malfuncionamiento del sistema	3	Traslado ajetreado a zona de despegue	4	Validar componentes antes del despegue	4	48	Alertas sonoras en caso de desconexión

Tabla 14 - AMEF de Despegue

#	Falla	Efecto	S	Causa	O	Control correctivo	D	RPN	Control para el cambio
2	Sensores de lectura bloqueados	Lectura incompleta del vuelo	3	Limitación tecnológica sobre temperatura alcanzada	5	Recuperación de la lectura a una temperatura adecuada	3	45	Cambio del equipo del sensor (módulo telefónico a receptor GNSS)
3	Sensores de lectura bloqueados	Lectura incompleta del vuelo	3	Limitación tecnológica sobre altura alcanzada	5	Recuperación de la lectura a una altura adecuada	3	45	Actualización del equipo del sensor (receptor GNSS)
4	Alimentación insuficiente de energía a las tarjetas	Malfuncionamiento del sistema	3	Limitación tecnológica sobre temperatura alcanzada	5	Recuperación del sistema a una temperatura adecuada	4	60	Cobertor de baterías

Tabla 15 - AMEF de Vuelo

#	Falla	Efecto	S	Causa	O	Control correctivo	D	RPN	Control para el cambio
5	Margen de la ubicación inicial muy amplio	Recuperación nula o lenta del sistema	4	Descenso descontrolado y sensor incorrecto de recuperación	4	Uso de la alerta sonora del sensor	3	48	Cambio del equipo del sensor (módulo telefónico a receptor GNSS)
6	Inexistente ubicación para recuperación	Recuperación nula o lenta del sistema	4	Descenso descontrolado y sensor incorrecto de recuperación	4		5	80	Actualización del equipo del sensor (receptor GNSS)
7	Pérdida momentánea del vehículo	Recuperación nula o lenta del sistema	4	1 sensor no es suficiente para la recuperación	5	Uso de cámaras en el sistema para facilitar la recuperación	4	80	Alertas sonoras referente a la cercanía de sistema vs receptor de ubicación
8	El vehículo se apagó	Recuperación nula o lenta del sistema	4	Fin de la batería por consumidores de energía todavía en función	5	Reconocimiento del tiempo de la recuperación	4	80	Implementar modo de aterrizaje sobre el sistema para ahorrar batería
9	Cambio de ubicación de recuperación	Recuperación nula o lenta del sistema	4	Sensores y otros componentes todavía en función	5	Reconocimiento del tiempo de la recuperación	4	80	Implementar modo de aterrizaje sobre el sistema para ahorrar batería

Tabla 16 - AMEF de Descenso y recuperación

En resumen, a continuación se presenta el diagrama Ishikawa de las fallas detectadas del diseño, con la intención de agrupar sus causas y hacer que la selección de métodos para su solución sea más fácil.

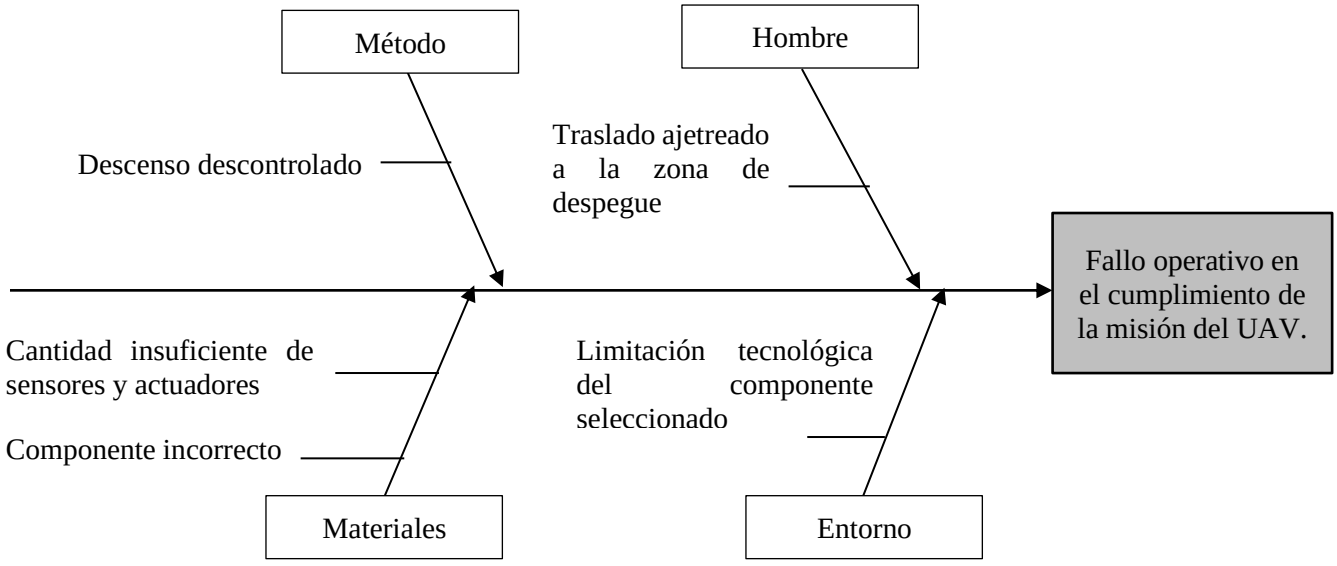


Diagrama 10 - Ishikawa de las fallas encontradas

Recordando el estándar de la herramienta, cualquier RPN mayor a 30 es definido como una falla crítica con alta prioridad para corregir y en cuanto a lo analizado todas las fallas tienen un con estas características. A continuación, se presenta un análisis de causa raíz para identificar las causas de este tema al analizar la situación del proyecto (operación) y los controles actuales.

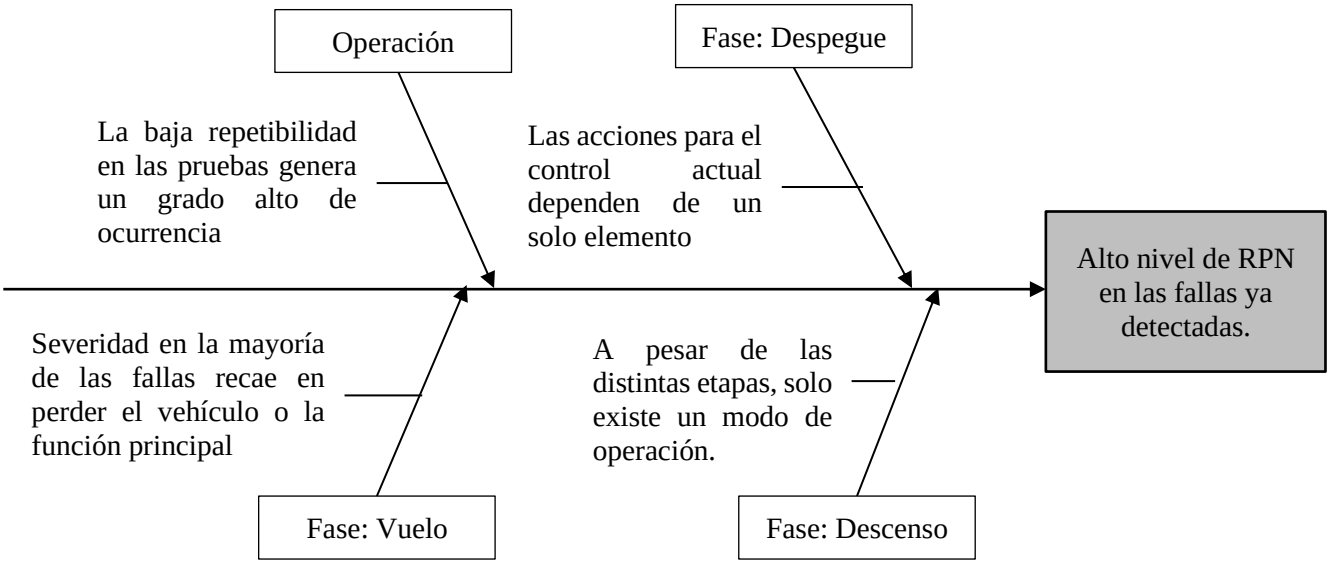


Diagrama 11 - Ishikawa sobre el alto RPN actual

Sin embargo, algunas de las acciones definidas previamente ya se llevaron a cabo, por lo que como se muestra en el siguiente AMEF, pudo ocurrir un decremento significativo del RPN y como se observa si bien el riesgo de la falla aún existe el nivel calculado es mucho menor y ya no es una falla crítica al momento.

#	Falla	Efecto	Control correctivo	RPN	Control para el cambio	S	O	D	RPN
2	Sensores de lectura bloqueados	Lectura incompleta del vuelo	Recuperación de la lectura a una temperatura adecuada	45	Cambio del equipo del sensor (módulo telefónico a receptor GNSS)	3	1	3	9
3	Sensores de lectura bloqueados	Lectura incompleta del vuelo	Recuperación de la lectura a una temperatura adecuada	45	Actualización del equipo del sensor (receptor GNSS)	3	1	3	9
4	Alimentación insuficiente de energía a las tarjetas	Lectura incompleta del vuelo	Recuperación del sistema a una temperatura adecuada	60	Cobertor de baterías	3	1	3	9
5	Margen de la ubicación inicial muy amplio	Recuperación nula o lenta del sistema	Uso de la alerta sonora del sensor	48	Cambio del equipo del sensor (módulo telefónico a receptor GNSS)	4	1	3	12
6	Inexistente ubicación para recuperación	Recuperación nula o lenta del sistema		80	Actualización del equipo del sensor (receptor GNSS)	4	1	4	16

Tabla 17 - AMEF de acciones controladas

CAPÍTULO V

5. Exposición de hallazgos

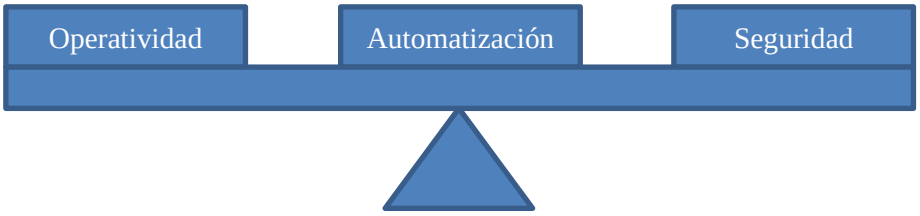
En este capítulo se presentan los resultados e impactos generados durante el proceso de investigación remarcando el cumplimiento de los objetivos previamente planteados.

5.1. Organización de la información obtenida

Los vehículos aéreos no tripulados especializados en entregas de carga ligera en lugares con poca accesibilidad son actualmente un producto innovador que, cuando se utilicen, sin duda mejorarán la industria logística y muchas otras relacionadas debido a sus múltiples posibles usos. Debido a esta tendencia, grandes compañías y equipos especializados han mostrado interés en construir y evolucionar los procesos a estos sistemas. Sin embargo, todos los interesados han enfrentado, enfrentan y seguirán enfrentando los mismos desafíos, por lo que realizar un estudio de confiabilidad es importante para poder controlar y solucionar estos problemas.

Cuando se trata de crear una metodología, la teoría y las lecciones aprendidas sirven como base para la definición. Sin embargo, para aplicarla y comprobar su efectividad, es necesario que los expertos y involucrados trabajen juntos para lograr los resultados esperados. Para su aplicación, se realizó un análisis de la situación actual para comprender en lo que se había trabajado y cuál era la intención oficial del proyecto. Éste definió la aplicación de las herramientas y se basó en las 3 etapas principales: despegue, vuelo y descenso, así como la recuperación de los elementos necesarios.

Cuando hablamos de drones de reparto, es común pensar en empresas líderes de la industria como Amazon, sin embargo, su sistema aún se encuentra en fase de pruebas. Por otro lado, los UAV de Zipline ya están operando en los cielos de África desde el 2019. Al utilizar el diagrama de QFD, se logró identificar que el principal desafío para las empresas que se involucran en la industria de estos vehículos es encontrar un equilibrio entre la operatividad, la automatización y la seguridad.



Uno de los puntos clave en el análisis del vehículo fue el tema de la desagregación, identificando los subsistemas más importantes: estructural, de navegación y de sensores. De igual manera, el apoyo visual de los diferentes componentes electrónicos que posee un UAV aporta al proyecto una mejor comprensión para el posterior análisis del producto. En este paso, se obtuvo un nivel de detalle sobre la función de cada sistema, los componentes que lo conforman, el tipo de falla que se puede presentarse y los métodos más comunes para contrarrestar los riesgos.

Uno de los principales retos para la aplicación de la metodología fue orientar el análisis del producto. Si bien la teoría presenta 2 métodos para este tipo de estudio, la elección de herramientas era clave para poder obtener resultados relevantes y significativos para el proyecto. A su vez, el análisis de la historia del UAV en cuestión fue fundamental. Para el método deducción, se realizó un FTA enfocado en lo que se está definiendo para el prototipo 5, mientras que para plasmar lo aprendido entre prototipos, aplicar el método de inducción con un AMEF era la mejor opción.

Se presentó un FTA ya construido para aprender de las fallas más comunes de un UAV. En dicho diagrama se definió como falla principal la perdida de propulsión, lo cual hace una combinación perfecta con el vehículo estudiado y el prototipo actual, ya que uno de los cambios más significativos en cuanto a la estructura es el método de despegue, ahora con una propela. Al buscar el equilibrio entre operatividad, automatización y seguridad, esta herramienta nos permitió identificar las fortalezas y debilidades del proyecto.

Aunque es necesario realizar un análisis de fallas para el prototipo en marcha con fines de prevención, el estudio de la historia a través de las fallas resultó fundamental. El análisis utilizando el AMEF arrojó un registro de los cambios que se han realizado y los que se deben de realizar. Tras revisar con detenimiento, se detectaron 9 fallas en los AMEF creados, de las cuales 7 están relacionadas con la operatividad del vehículo, 2 están relacionadas con los sensores (automatización) y ninguna implica daños a terceros. Además, ya se han controlado 5 de esas acciones, lo que han mostrado una reducción promedio del 20% en el número de prioridad de riesgo. Sobre las restantes 3 acciones, a continuación se presenta una matriz de prioridades para analizar el posible momento de implementación. De dicho análisis se concluye que las acciones a tomar en cuenta son sobre la implementación de alertas sonoras para evitar problemas de desconexión de componentes y tener otro apoyo al momento de recuperar el UAV.

Acciones	Dificultad	Impacto	Urgencia	Total
Alertas sonoras en caso de desconexión de componentes	2	3	2	7
Alertas sonoras referente a la cercanía de sistema vs receptor de ubicación	3	2	2	7
Implementar modo de aterrizaje sobre el sistema para ahorrar batería	1	2	1	4

Tabla 18. Matriz de prioridades para acciones futuras

5.2. Impacto de la estrategia en el objeto de estudio

Al definir mi participación como analista de calidad del proyecto titulado: Navegación de sistemas de entrega aérea de precisión, se presentó un gran reto para mí. Comencé leyendo artículos interesantes relacionados 100% con estos vehículos, de los cuáles rescato el gran énfasis que hacían sobre el crecimiento exponencial que ha tenido el uso de los UAV en los últimos años y como son un objeto altamente representativo de la Era Industrial 4.0. En estos artículos, para realizar estudios relacionados con la calidad y confiabilidad, se hacía uso de diversas herramientas enfocadas en la prevención de riesgos y en el tema de la mejora continua.

En este trabajo, se pretendía construir y aplicar una metodología teórica especializada en el estudio de confiabilidad de vehículos aéreos no tripulados guiados por un sistema de entrega aérea de precisión. Basado en la teoría revisada, se construyó la metodología y se aprobó para comenzar con su aplicación.

Para iniciar la aplicación, se realizó un estudio detallado de la situación actual, ya que el proyecto lleva en marcha desde el 2019. Fue importante destacar que el prototipo en marcha era el quinto y que se tiene un listado de su estructura y un estudio de la conectividad de sus componentes. Ahora, gracias a la aplicación de la metodología, se construyó una base esencial para el proyecto enfocada en su orientación, el estudio de los componentes y su relación dentro de los subsistemas del UAV y los riesgos que se deben controlar para no afectar la operatividad del vehículo.

Con la construcción del QFD se logró identificar específicamente las necesidades y expectativas de los clientes, priorizar la satisfacción de estas expectativas en función de su importancia y focalizar los recursos en la satisfacción de dichas expectativas. Además, gracias a la identificación de subsistemas y a la desagregación de cada uno, se pudo proporcionar una visión rápida y visualmente clara de la labor de cada elemento dentro del sistema global. Finalmente, el análisis del producto a través de sus fallas brindó un estudio completo de las fallas principales y su relación tanto con las etapas de la operación de un UAV como con los diferentes grupos de componentes que existen.

La aplicación de estas herramientas y su interrelación traen consigo otros beneficios, como la reducción de los tiempos de desarrollo para nuevos productos o servicios, la optimización del producto, una mayor eficacia a través del enfoque de las actividades y una mayor eficiencia relacionada directamente con la reducción de costos por fallos. Sin embargo todos estos beneficios secundarios no producirán si no se continúa buscando oportunidades de corrección. Esto hace que la aplicación de la metodología, en lugar de ser un proceso de 3 pasos, se convierta en un ciclo, con el fin de que en cada análisis y estudio se determinen los objetivos internos correspondientes al ciclo en curso.

CAPÍTULO VI

En este capítulo se presentan una interpretación personal de los resultados y el impacto de lo que significó realizar la investigación.

6. Discusión final

6.1. Aspectos de mejora para futuras investigaciones

Como se mencionó anteriormente, una metodología relacionada con el estudio de confiabilidad se convierte en un ciclo en el que cada cambio y mejora guían al proyecto hacia una mejora permanente y sostenible en el tiempo. Si bien en la metodología construida se eligieron 4 herramientas dentro del mundo de la confiabilidad y calidad, relacionadas con la ciencia de la ingeniería concurrente y la disciplina RAMS existen un sin fin de herramientas que se pueden aplicar durante todo el ciclo de vida de un producto.

Recordando la ingeniería concurrente, ésta se basa en 2 ideas principales que "todos los componentes del producto final deben ser tomados en cuenta desde las fases más tempranas del diseño y que todas las actividades de diseño precedentes a la consecución del producto deben de ir avanzando simultáneamente en el proceso" (Delgado, 2017). Siguiendo estos principios, todas las tecnologías relacionadas con el dibujo técnico, como *AutoCAD* o *SolidWorks*, son programas relacionadas a la IC y el área de procesos de manufactura. Como otro ejemplo, la metodología guiada por el diseño para la fabricación y ensamblaje es muy útil si se tiene la intención de optimizar tanto el producto en sus cantidades de materiales como el proceso en cuanto a sus tiempos de ensamble.

Por el otro lado, en relación con los 4 pilares de la disciplina RAMS, existen las 7 herramientas básicas de la calidad, tales como la hoja de recogida de datos, el histograma, el Pareto, los diagramas de dispersión y de causa y efecto, la técnica de estratificación y los gráficos de control. Además, para probar hipótesis en la etapa de pruebas, existen diferentes análisis estadísticos que se pueden realizar, como el cálculo de la capacidad del proceso o el diseño de experimentos para comprobar la significancia de los factores relacionados a la operatividad del vehículo.

La regla principal de todas estas herramientas es que cada una tiene su momento para ser implementada, sus reglas y sus condiciones, y si no se respetan, el uso de estas herramientas quedará desaprovechado y no se lograrán los beneficios que se buscan.

Por ejemplo, para obtener la capacidad del proceso se requieren las especificaciones del cliente en cuanto a los límites superior e inferior de sus requisitos, así como datos históricos para determinar la variabilidad del proceso. Por otro lado, para realizar un Diseño de Experimentos se necesitan variables, factores con sus respectivos niveles y un plan de experimentación basado en la reproducibilidad y repetibilidad. Aunque esta información teóricamente se presentó en la aplicación de la metodología, se sugiere seleccionar alguna de estas herramientas en el siguiente ciclo de su aplicación para comprobar numérica y realmente la capacidad del proceso y la relación de sus factores y variables. En apoyo a esta sugerencia, se prevé que el prototipo 6 que actualmente está en construcción permitirá realizar estas pruebas.

6.2. Relevancia y trascendencia disciplinaria de la investigación

Después de todo lo vivido, me queda analizar el camino que me queda por recorrer. En mi preparación para ser maestra en Ingeniería y Gestión de la Calidad, he aprendido a buscar las maneras adecuadas para mejorar la eficiencia de los procesos, incidiendo positivamente en aspectos técnicos, administrativos y humanos, clave para el logro de los objetivos estratégicos de las organizaciones. He reafirmado y aumentado mis conocimientos relacionados con la calidad en un proceso, a través de la especialización en análisis estadísticos y procesos de mejora continua.

Especificamente, al realizar este trabajo, he aprendido a entender las necesidades y objetivos de las organizaciones, para poder aplicar mis conocimientos y construir una estrategia que le permita a un proyecto mejorar su eficiencia y aumentar su nivel de competitividad. Me queda claro que cuando una persona quiere participar en el desarrollo de un proyecto de tal impacto como este, uno quiere participar y realizar todo tipo de actividades, sin embargo definir un alcance concreto de participación es clave para obtener resultados fructíferos y de gran nivel de beneficio para el proyecto.

Ahora sé cómo guiar a un grupo de personas hacia un mismo objetivo, sabiendo que para llegar ahí necesitan estar mejorando continuamente. Con este trabajo de obtención de grado, me volví capaz de realizar una investigación adecuada para traducir lo aprendido en acciones que estén alineadas con los objetivos de un proyecto en marcha, demostrando así que lo que sugiero es por el bien de la empresa y que está en línea con sus estrategias.

Entendí que el rol de un ingeniero de calidad implica asegurar que durante todo el ciclo de vida, el producto cumpla con los requisitos da calidad establecidos por los clientes. Pero para entender su importancia, clientes no solo son aquellos que adquieren el producto sino también son todos los involucrados directa e indirectamente con él. El ingeniero de calidad trabaja identificando y resolviendo problemas durante todo el ciclo de vida del producto.

El mundo está evolucionando tan rápido que me exijo a mí misma, como máster en el área de calidad, estar al pendiente de los avances tecnológicos y mantenerme actualizada con las herramientas que surgen, para poder aplicar mis conocimientos cuando sea necesario. Entiendo las necesidades del entorno en el que me encuentro, mejorando los procesos y logrando un control sobre la adaptabilidad a los cambios tecnológicos. Ahora puedo vivir el día a día bajo las mejores prácticas del área de calidad, con la ambición de mejorar cada día para lograr una vida al nivel 6σ.

BIBLIOGRAFÍA

Acuña, J. (2003). Introducción. En J. Acuña. (Ed.), *Ingeniería de confiabilidad* (pp. 15 - 31). Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.

Barker, P. (2019). *Zipline utiliza drones para salvar vidas*. Red Bull. Recuperado de https://www.redbull.com/mx-es/zipline-drones-suministros-medicos.

Beltrán, S., Lengerke, O. y González, H. (2011). CONTROL PID DE ALTURA DE UN QUADROTOR. REVISTA COLOMBIANA DE COMPUTACIÓN. *Revista Colombiana de Computación, 12* (2), 81 – 95.

Cuerno, C., García, L., Sanchez, A., Carrio, A., Sanchez, J. y Campoy, P. (2016). Evolución histórica de los vehículos aéreos no tripulados hasta la actualidad. *Colaboración, 91*(3), 282 – 288. doi: 10.6036/7781.

Daura, F. (2020). El análisis de RAMS (Reliability, Availability, Maintainability & Safety) y la CEM (Compatibilidad Electromagnética). *Leedo Engineering*. 74 – 81.

De Oliveira, B. y Sandoval, L. (2007). FAILURE ANALYSIS METHODS IN UNMANNED AERIAL VEHICLE (UAV) APPLICATIONS. 19th International Congress of Mechanical Engineering.

Delgado, R. (2017). *Ingeniería concurrente: ¿filosofía o herramienta de trabajo?*. INESEM Business School. Recuperado de https://www.inesem.es/revistadigital/gestion-integrada/ingenieria-concurrente/.

Fernández, T., Blanco, O., Suárez, M. y Fraga, P. (2018). A UAV and Blockchain-Based System for Industry 4.0 Inventory and Traceability Applications. *Proceedings 4* (26), 1 – 7. doi: 10.3390/ecsa-5-05758.

Fernandez, J., López, V., Sánchez, R. y Antuña, R. (2020). Diseño para Fabricación y Montaje. Asturias, España: Prodintec.

Filippova, T. (2019). Quality function deployment as a tool of risk management at early stages of an unmanned aircraft design. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 666* (01204), 1 – 8, doi: 10.1088/1757-899X/666/1/012046.

Garcia, R., González, L. y Villalon, I. (2020). Sensor Fusion Algorithm Using a Model-Based Kalman Filter for the Position and Attitude Estimation of Precision Aerial Delivery Systems. *Sensors, 20* (5227), 2 – 21. doi: 10.3390/s20185227.

Guillén, R. (2019). *De la Cuarta revolución industrial HA NACIDO LA INGENIERIA CONCURRENTE*. DIPROMIN. Recuperado de https://www.dipromin.com/noticias/notiempresas/triple-impacto-de-la-cuarta-revolucion-industrial-ha-nacido-la-ingenieria-concurrente/.

Ireson, W., Coombs, C., y Moss, R. (1995). Introduction, Definitiosn and Relationships. En W. Grant, C. Coombs y R. Moss. (2 Ed.), *Handbook of reliability engineering and management.* Wisconsin, Estados Unidos: McGraw – Hill Companies.

Jung, S. y Kim, H. (2017). Analysis of Amazon Prime Air UAV Delivery Service. *Journal of Knowledge Information Technology and Systems (JKITS), 12* (2). doi: 10.34163/jkits.2017.12.2.005.

Lamptey, E. y Serwaa, D. (2020). The Use of Zipline Drones Technology for COVID-19 Samples Transportation in Ghana. *HighTech and Innovation Journal, 1* (2). 67 – 71. doi: 10.28991/HIJ-2020-01-02-03.

Lucintel. (2011). *Growth Opportunity in Global UAV Market*. Recuperado de https://www.lucintel.com/GrowthOpportunityinGlobalUAVMarket.pdf.

Macas, E. (2017). "Definición y Estado del Arte de la Ingeniería Concurrente la Manufactura por Computer y la Mecatrónica". *INNOVA Research Journal, 2* (10), 44 – 60.

Ning, H., Guoqing, W., Mingfei, X. y Xiaocong, W. (2015). Reliability Analysis of UAV Aviation Electronic System Based on FMEA. *5th International Conference on Information Engineering for Mechanics and Materials (ICIMM 2015)*. 983 - 988.

Osmic N., Tahirbegovic, A., Tahirovic, A. y Bodan, S. (2018). Failure Mode and Effects Analysis for large scale multirotor Unmanned Aerial Vehicle Controlled by Moving Mass System. doi: 10.1109/SysEng.2018.8544444.

Park, S., Choi, S., Sikorsky, C., y Stubbs, N. (2004). Efficient method for calculation of system reliability of a complex structure. *International Journal of Solids and Structures, 41*(2004), 5035–5050. doi: 10.1016/j.ijsolstr.2004.04.028.

Petrioli E., Leccesse, F., y Ciani, L. (2018). Reliability and Maintenance Analysis of Unmanned Aerial Vehicles. *Sensors, 18* (371), doi: 10.3390/s18093171.

Rao, D., Vinod, G., y Ajit, S. (2 Eds.). (2020). *Advances in RAMS Engineering*. doi: 10.1063/1.5066715.

Redacción CIO México (2022). *Amazon Prime Air calienta motores: las entregas con drones vuelven a la carga.* CIO. Recuperado de: https://cio.com.mx/amazon-prime-air-calienta-motores-las-entregas-con-drones-vuelven-a-la-carga-en-ee-uu/.

RELSAFE PRA Consulting. (2022). *Reliability Studies*. Relsafe. Recuperado de https://www.relsafe.co.in/reliability-studies/.

SAFRAN. (2022). *Reliability, Availability. Maintainability and Safety (RAMS) Engineer*. SAFRAN. Recuperado de https://www.safran-group.com/es/ofertas/pitstone-bucks/reliability-availability-maintainability-and-safety-rams-engineer-93075.

Villaseñor, A. y Galindo, E. (2020). Conceptos y reglas de Lean Manufacturing. (2 Ed). Ciudad de México, México: LIMUSA

Xing, L. y Amari, S. (2008). Fault Tree Analysis. En K. Misra. (1 Ed.), *Handbook of Performability Engineering* (pp. 595 – 620). Rajasthan, India: Springer.

Zapata, C. (2011). Conceptos generales. En C. Zapata. (Ed.), *Confiabilidad en Ingeniería* (pp. 1 – 11). Dosquebradas, Colombia: Publiprint Ltda.

REFERENCIA DE IMÁGENES

Amazon Staff (2022). *Amazon Prime Air Prepares for drone deliveries.* Amazon. Recuperado de: https://www.aboutamazon.com/news/transportation/amazon-prime-air-prepares-for-drone-deliveries

Zipline (2023). *Opening access to all people, everywhere*. Zipline. Recuperado de: https://www.flyzipline.com/company

GLOSARIO

Concepto	Definición	Fuente
Análisis de Modo Efecto de Falla (AMEF)	Técnica estandarizada para evaluar equipos y herramientas durante la fase de diseño y producción, para mejorar la seguridad, confiabilidad y robustez de la maquinaria. Tiene varios propósitos como: identificar los modos potenciales de falla, los efectos de modo de falla, el rango de severidad de cada defecto, causas potenciales de falla iniciando con el rango más alto de severidad, acciones correctivas requeridas para prevenir disminuir y mejorar los métodos para detectar de manera temprana las fallas y establecer prioridad para las acciones.	Villaseñor, A. y Galindo, E. (2020). Conceptos y reglas de Lean Manufacturing. (2 Ed). Ciudad de México, México: LIMUSA.
Benchmarking	Proceso que puede utilizarse para entender y conocer cualquier organización, competidora o no, grande o pequeña, pública o privada. La clave para su buen funcionamiento consiste en aislar medidas comunes en funciones como manufactura, ingeniería, mercadotecnia, ventas, finanzas, etcétera; y posteriormente compararlas con las prácticas de su propio negocio.	Villaseñor, A. y Galindo, E. (2020). Conceptos y reglas de Lean Manufacturing. (2 Ed). Ciudad de México, México: LIMUSA.
Benchmarking competitivo	Análisis y comparación de variables entre competidores directos, que venden a la misma base de clientes.	Manuales Administrativos: Análisis de Técnicas De Organización
Confiabilidad	Que cumpla su función durante el tiempo requerido bajo unas condiciones operativas especificadas.	Autoría propia
Control de calidad del proceso	Proceso de control de las características de calidad de productos manufacturados y materias primas a fin de prevenir defectos o inconsistencias que no permitan llenar las expectativas del cliente. Su aporte a la confiabilidad se relaciona con la prevención de defectos que se puedan originar esencialmente durante la manufactura de producto y que se conviertan en fallas durante la puesta en uso o durante la vida útil del producto.	Acuña, J. (2003). Introducción. En J. Acuña. (Ed.), Ingeniería de confiabilidad (pp. 15 - 31). Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
Desagregación	Desglose de las observaciones dentro de una rama común de una jerarquía, a un nivel más específico al que se llevan las observaciones detalladas.	Los ODS y la demanda por datos desagregados (cepal.org)

Concepto	Definición	Fuente
Diagrama de árbol	Herramienta que permite identificar de una rama común todos sus elementos.	Autoría propia
Diagrama Ishikawa	Herramienta que ayuda a identificar las causas - raíces de un problema, analizando todos los factores involucrados en la ejecución de un proceso.	Diagrama de Ishikawa: ¿qué es y para qué sirve?
Era Industrial 4.0	Era que implica la promesa de una nueva revolución que combina técnicas avanzadas de producción y operaciones con tecnologías inteligentes que se integrarán en las organizaciones, las personas y los activos.	¿Qué es la Industria 4.0? | Deloitte España
Estimar	Atribuir valor a una persona o cosa, o reconocer el mérito que tiene.	*Oxford Languages*
Falla	Evento que ocurre sobre un producto o proceso que hace que éste salga abrupta o paulatinamente fuera de servicio, provocando toda clase de acciones improductivas qué se reflejan en el costo y en el comportamiento productivo de los sistemas. Las fallas pueden ser causadas por agentes internos o externos y la función esencial de un sistema de confiabilidad es detectar esas Fuentes y poner controles sobre ellas.	Acuña, J. (2003). Introducción. En J. Acuña. (Ed.), Ingeniería de confiabilidad (pp. 15 - 31). Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
***Failure Tree Analysis* (FTA)**	Análisis sistemático que permite identificar la causa raíz de un fallo a través de un diagrama. Un árbol de fallos permite el análisis de una sola ocurrencia indeseada, pero también puede utilizarse sistemáticamente para evaluar el funcionamiento de un conjunto de componentes, lo que hace que esta herramienta sea muy versátil.	Análisis de árbol de fallos: definición y aplicación | Infraspeak
Ingeniería concurrente	Conjunto de actividades que un equipo multidisciplinario de trabajo efectúa a fin de prevenir defectos y fallas por medio de un diseño simultaneo del producto que lo fabricará. El aporte de la ingeniería concurrente a la confiabilidad es sumamente importante, pues muchos de los errores y malfuncionamiento de productos tienen sus causas en la etapa de concepción y diseño de producto y proceso.	Acuña, J. (2003). Introducción. En J. Acuña. (Ed.), Ingeniería de confiabilidad (pp. 15 - 31). Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.

Concepto	Definición	Fuente
Intrínseco	Que es propio o característico de la cosa que se expresa por sí misma y no depende de las circunstancias.	*Oxford Languages*
Mantenimiento	Conservación de una cosa en buen estado o en una situación determinada para evitar su degradación.	*Oxford Languages*
Método inductivo	Constituye el razonamiento desde casos específicos hacia una conclusión general. En un análisis de sistema inductivo, postulamos una falla o evento iniciador particular e intentamos averiguar el efecto de esta falla en el fracaso de todo el sistema.	Autoría propia
Método deductivo	Constituye en la postulación de un fallo del sistema e intentamos descubrir qué modos de comportamiento del sistema o componente contribuyen al fallo del sistema. Los métodos inductivos se aplican para determinar qué estados del sistema (generalmente estados fallidos) son posibles; los métodos deductivos se aplican para determinar cómo puede ocurrir un estado particular del sistema.	Autoría propia
Metodología	Conjunto de métodos que se siguen en una investigación científica, un estudio o una exposición doctrinal.	*Oxford Languages*
Miniaturizar	Fabricar una cosa, especialmente un objeto o un mecanismo, en el tamaño más reducido posible que permita su pleno funcionamiento.	Autoría propia
Prototipo	Ejemplar que se fabrica de una figura, un invento u otra cosa, y que sirve de modelo para fabricar otras iguales, o molde original con el que se fabrica.	*Oxford Languages*
***Quality function deployment* (QFD)**	Es un proceso de planeamiento del producto y proceso que se inicia con un estudio detallado a las necesidades o requerimientos del cliente, colocando la información obtenida en un conjunto de matrices que transforman estos requerimientos del cliente en planes y programas de producción. Un equipo interdisciplinario determina los valores numéricos de las especificaciones técnicas y las acciones prioritarias a seguir con el fin de cumplir a cabalidad con la expresada por el cliente. Éstas se combinan en matrices con las capacidades y limitaciones del proceso de manufactura a fin de producir el producto bajo lo requerido por el cliente.	Acuña, J. (2003). Introducción. En J. Acuña. (Ed.), Ingeniería de confiabilidad (pp. 15 - 31). Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.

Concepto	Definición	Fuente
Redundancia	Existencia de más de un medio (repuesto en línea, por ejemplo) para ejecutar una determinada función. Si falla uno de los medios hay otro u otros que pueden reemplazarlos.	Acuña, J. (2003). Introducción. En J. Acuña. (Ed.), Ingeniería de confiabilidad (pp. 15 - 31). Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
Riesgo	Posibilidad de que se produzca un contratiempo o una desgracia, de que alguien o algo sufra perjuicio o daño.	*Oxford Languages*
***Unmanned Aerial Vehicle* (UAV)**	Aquellos vehículos que vuelan sin piloto a bordo y son el elemento principal de los UAS, sistemas aéreos no tripulados, que a su vez engloban la aeronave, la estación en tierra y el enlace de comunicaciones.	¿UAV, UAS, RPAS o drones (inta.es)
Voz del ingeniero	Término que describe la funcionalidad y principales características de un producto transformados en características a parámetros medibles.	Autoría propia
Voz del cliente	Término que describe el *feedback* de los clientes sobre sus experiencias y las expectativas que tienen de los productos o servicios de una marca. Se centra en las necesidades del cliente, sus expectativas, sus concepciones y en la mejora del producto.	¿Qué Es La Voz Del Cliente (VoC)? - Qualtrics - ES LA