

PROPUESTA DE UN PROCEDIMIENTO PARA LA CERTIFICACIÓN DE
DISEÑO Y PRODUCCIÓN DE COMPONENTES AERONÁUTICOS CLASE II O III
DESARROLLADOS MEDIANTE INGENIERÍA INVERSA.

OSCAR FERNANDO LUCERO FIGUEROA

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA AERONÁUTICA
BOGOTÁ
2020

PROPUESTA DE UN PROCEDIMIENTO PARA LA CERTIFICACIÓN DE
DISEÑO Y PRODUCCIÓN DE COMPONENTES AERONÁUTICOS CLASE II O III
DESARROLLADOS MEDIANTE INGENIERÍA INVERSA.

OSCAR FERNANDO LUCERO FIGUEROA

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO AERONÁUTICO

CT. CARLOS ARTURO HERNÁNDEZ RAMÍREZ.
Ingeniero Aeronáutico
Especialista en Certificación – JOL - SECAD
Fuerza Aérea Colombiana

Msc. Ing. DIDIER ALDANA RODRÍGUEZ.
Ingeniero Aeronáutico
Fundación Universitaria Los Libertadores

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA AERONÁUTICA
BOGOTÁ
2020

NOTAS DE ACEPTACIÓN

FIRMA DEL PRESIDENTE DEL JURADO

FIRMA DEL JURADO

FIRMA DEL JURADO

DEDICATORIA

A mis padres *Clara Emilia Figueroa Montenegro* y *Carlos Justiniano Lucero* quienes apoyaron mi desarrollo académico y estuvieron junto a mí en el camino entregando todo el esfuerzo y sacrificio.

A la familia *Jojoa Millan* quienes me ayudaron a superar las dificultades durante el transcurso de este proyecto de grado y en la vida misma.

AGRADECIMIENTOS

A la **Fuerza Aérea Colombiana, JOL, SECAD** quienes trabajan fuertemente día a día para hacer que la industria aeronáutica siga creciendo. Ellos me aportaron gran conocimiento aeronáutico, me dieron capacitaciones y criterios por medio del **INTA**, sus oficiales suboficiales. Ellos me prestaron sus instalaciones, equipos y demás para que esta investigación sea efectiva y relevante para Colombia. Espero que tengan bien ver esta información como relevante para desarrollar y publicar las circulares de asesoramiento colombianas, referentes a la ingeniería inversa y la certificación.

A la **CIAC** (Corporación de la industria aeronáutica colombiana), que me permitió hacer las prácticas empresariales y tener mis primeros pasos en la fabricación de partes aeronáuticas, certificación aeronáutica y desarrollo de proyectos Aero-industriales.

A mis **profesores de la Fundación Universitaria Los Libertadores**, que gracias a ellos pude tener bases teóricas y criterio ingenieril para desarrollar este proyecto de grado.

A los **directivos de la Fundación Universitaria Los Libertadores**, que confían en mi experiencia y conocimiento para que este proyecto tenga impacto en la industria aeronáutica

CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABLAS	12
LISTA DE ECUACIONES	13
LISTA DE ANEXOS	14
GLOSARIO	15
1. RESUMEN	16
2. INTRODUCCIÓN	17
3. JUSTIFICACIÓN	18
4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	19
4.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.	19
4.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.	19
4.3 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.	19
5. OBJETIVOS	20
5.1 GENERAL	20
5.2 ESPECÍFICOS.....	20
6. MARCO TEÓRICO	21
6.1 MARCO CONTEXTUAL.....	24
6.1.1 Modelado de procesos con IDEF0	24

7.	METODOLOGÍA	28
8.	GUÍA PARA EL DESARROLLO DE COMPONENTES AERONÁUTICOS CLASE II O III MEDIANTE INGENIERÍA INVERSA.....	29
8.1	DIAGRAMA DE CONTEXTO DE NIVEL SUPERIOR	29
8.1.1	Propósito y punto de vista	29
8.1.2	Entradas.....	30
8.1.3	Controles.....	30
8.1.4	Salida	30
8.1.5	Mecanismos	31
8.2	ÍNDICE DE NODOS	31
8.3	NODO A0, DIAGRAMA SECUNDARIO DE NIVEL SUPERIOR: PROCESO PRINCIPAL DEL DESARROLLO DE PRODUCTOS AERONÁUTICOS CLASE II O III MEDIANTE INGENIERÍA INVERSA.....	35
8.3.1	Nodo A1, Análisis económico / funcional	36
8.3.2	Nodo A2, Desensamble	47
8.3.3	Nodo A3, Análisis de hardware	53
8.3.4	Nodo A4, Diseño y desarrollo.....	68
8.3.5	Nodo A5, Manufactura	74
8.3.6	Nodo A6, Inspección y pruebas	82
9.	GUÍA PARA SOLICITAR UNA APROBACION DE FABRICANTE DE PRODUCTOS AERONAUTICOS (PMA, DE DISEÑO) DESARROLLADOS MEDIANTE INGENIERÍA INVERSA	86
9.1	DIAGRAMA DE CONTEXTO DE NIVEL SUPERIOR	86
9.1.1	Propósito y punto de vista	87

9.1.2	Entradas.....	87
9.1.3	Controles.....	88
9.1.4	Salidas	88
9.1.5	Mecanismos	88
9.2	ÍNDICE DE NODOS	88
9.3	NODO A-11 DIAGRAMA SECUNDARIO DE NIVEL SUPERIOR: ACTIVIDADES PARA SOLICITAR UN PMA (DE DISEÑO) PARA PRODUCTOS AERONÁUTICOS CLASE II O III MEDIANTE INGENIERÍA INVERSA.	89
9.3.1	Nodo A-111, Inicio del proceso	90
9.3.2	Nodo A-112, Plan de ensayos.....	100
9.3.3	Nodo A-113, Elaboración de ensayos y cálculos	100
9.3.4	Nodo A-115, Inspecciones y ensayos	102
9.3.5	Nodo A-115, Manual del producto, declaración del diseño y prestaciones 104	
9.3.6	Nodo A-116, Paquete de datos técnico finalizado.....	104
10.	GUÍA PARA CERTIFICAR UNA PRODUCCION APARTIR DE UN PMA, DE DISEÑO PARAPRODUCTOS DESARROLLADOS MEDIANTE INGENIERÍA INVERSA	106
10.1	DIAGRAMA DE CONTEXTO DE NIVEL SUPERIOR	106
10.1.1	Propósito y punto de vista	106
10.1.2	Entradas.....	107
10.1.3	Controles.....	107
10.1.4	Salidas	107
10.1.5	Mecanismos	107
10.2	ÍNDICE DE NODOS	108

10.3	NODO A-21, DIAGRAMA SECUNDARIO DE NIVEL SUPERIOR: ACTIVIDADES PARA SOLICITAR UN CERTIFICADO DE PRODUCCIÓN AERONÁUTICA PARA PRODUCTOS AERONÁUTICOS CLASE II O III MEDIANTE INGENIERÍA INVERSA.	109
10.3.1	Nodo A-211, Inicio del proceso de certificación de producción.	110
10.3.2	Nodo A-212, Revisión de la documentación del PMA (de diseño).	110
10.3.3	Nodo A-213, Sistema de inspección de fabricación.	110
10.3.4	Nodo A-214, Auditoria	110
10.3.5	Nodo A-215, Fabricación de los productos aeronáuticos y aplicación del control de calidad	111
10.3.6	Nodo A-216, Mantenimiento de certificación continuada	111
11.	CONCLUSIONES	113
12.	RECOMENDACIONES	115
13.	BIBLIOGRAFÍA	116
	ANEXOS	118
	ANEXO A: PROCEDIMIENTO PARA LEVANTAMIENTO DIMENSIONALES POR MEDICIÓN DIRECTA.....	118
	ANEXO B: INSTRUCTIVO INTERFAZ GRÁFICA “AERONAUTICALMETROLOGIC” PARA MEDICIONES DIRECTAS.....	124
	ANEXO C: SOFTWARE AERONAUTICALMETROLOGIC	129

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Cuadro de funciones y flechas de datos	25
Figura 2 Diagrama de contexto con numeración de nodo negativo	26
Figura 3. Estructura del modelo IDEF0	27
Figura 4. Diagrama de contexto de nivel superior de ingeniería inversa de productos aeronáuticos.	29
Figura 5. Diagrama secundario de nivel superior: Proceso principal del desarrollo de productos aeronáuticos clase II o III mediante ingeniería inversa	36
Figura 6. Análisis funcional / económico	37
Figura 7. Estimación de la información faltante	41
Figura 8. Estimación de requisitos de pruebas	43
Figura 9. Procedimientos de desensamble	48
Figura 10. procedimientos antes del desensamble	49
Figura 11. Procedimientos después del desensamble.....	52
Figura 12. Análisis de hardware.....	54
Figura 13. Análisis dimensional	55
Figura 14. Técnicas de selección de datos de medición	57
Figura 15. Caracterización de materiales	59
Figura 16. Análisis de ingeniería.....	61
Figura 17. Reconstrucción del diseño	62
Figura 18. Diagrama de flujo de la evaluación de la información metrológica	64
Figura 19. Diseño y desarrollo	69
Figura 20. Especificaciones de ingeniería	70
Figura 21. Manufactura.....	74

Figura 22. Planeación de manufactura	75
Figura 23. Revisión de la producción.....	79
Figura 24. Inspección y pruebas	83
Figura 25 Diagrama de contexto de nivel superior de certificación de PMA para productos desarrollados mediante ingeniería inversa.	87
Figura 26 Diagrama de contexto de nivel superior de certificación de PMA	90
Figura 27 Inicio del proceso de aplicación para obtener un PMA	91
Figura 28 Revisión del manual de calidad	92
Figura 29 Plan de certificación de parte específica.....	94
Figura 30 Diagrama de contexto de nivel superior de certificación de producción a partir de un PMA desarrollado mediante ingeniería inversa.	106
Figura 31 Actividades para solicitar una certificación de producción aeronáutica a partir de un PMA.....	109

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Índice de Nodos del desarrollo de Ingeniería Inversa de Productos Aeronáuticos.....	31
Tabla 2 Índice de Nodos del proceso de solicitud de un PMA para productos aeronáuticos desarrollados mediante ingeniería inversa.	88
Tabla 3 Índice de Nodos del proceso de solicitud de una calificación de producción aeronáutica basada en un PMA desarrollado mediante ingeniería inversa. .	108

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Calculo del costo del proceso de ingeniería inversa	45
Ecuación 2. Valuar de compra anual de procesos antes de realizar la ingeniería inversa	46
Ecuación 3, Ahorro anual de ingeniería inversa	46
Ecuación 4. Valor de compra anual	46
Ecuación 5. Calculo del costo del primer año de ingeniería inversa.	46
Ecuación 6. Calculo del costo mínimo sobre la vida útil estimada.....	47

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A: PROCEDIMIENTO PARA LEVANTAMIENTO DIMENSIONALES POR MEDICIÓN DIRECTA	118
ANEXO B: INSTRUCTIVO INTERFAZ GRÁFICA “AERONAUTICALMETRLOGIC” PARA MEDICIONES DIRECTAS.....	124
ANEXO C: SOFTWARE AERONAUTICALMETROLOGIC	129

GLOSARIO

ACUERDO DE LICENCIA: permiso otorgado por un poseedor de PMA, para fabricar sus componentes por un tercero.

ARTICULO AERONÁUTICO: Cualquier material, parte o componente, subconjunto, conjunto o accesorio usado en un producto aeronáutico con certificado de tipo.

AVIACIÓN DE ESTADO: Operación aérea desarrollada por fuerzas militares.

CERTIFICADO DE PRODUCCIÓN: aprobación requerida para fabricar un componente aeronáutico en serie.

CERTIFICADO DE TIPO: certificado otorgado por la autoridad aeronáutica del estado de diseño de un producto aeronáutico cumpliendo todas las operaciones de seguridad y aeronavegabilidad.

CERTIFICADO DE TIPO SUPLEMENTARIO: aprobación requerida para una modificación mayor de un certificado de tipo.

ESPÉCIMEN: pieza utilizada para el estudio de ingeniería inversa.

ENTE CERTIFICADOR: Entidad que califica y certifica productos y servicios aeronáuticos.

PMA: aprobación de fabricación de partes.

PARTES CATEGORÍA I: parte cuya falla puede prevenir continuación, vuelo y aterrizaje seguro, estas afectan el desempeño de la aeronave y su falla podría poner en riesgo la seguridad de la misma.

PARTES CATEGORÍA II: parte cuya falla no podría prevenir la continuación, vuelo y aterrizaje seguro de la aeronave, esta reduciría la maniobrabilidad de la aeronave.

PARTES CATEGORÍA III: parte cuya falla no tendría efecto en la continuación, vuelo y aterrizaje seguro de la aeronave.

1. RESUMEN

Este proyecto de investigación tiene como resultado una serie de guías para gestionar, fabricar y certificar componentes aeronáuticos desarrollados por ingeniería inversa, desde el diseño hasta su producción. Esta documentación está basada en estándares de la FAR, LAR, RAC y reglamentos vigentes relacionados. Aplica para partes aeronáuticas clase II o III.

Los instructivos a desarrollar en este proyecto son:

- a. Procedimiento de ingeniería inversa: Abarca la recepción de la pieza, su medición, análisis, fabricación e inspección.
- b. Guía de certificación de diseño: aplica para los solicitantes de PMA que hayan desarrollado productos a partir de ingeniería inversa demostrada a través de ensayos y cálculos, también se empleará para partes idénticas sin un acuerdo de licencia.
- c. *Procedimientos solicitar un certificado de producción:* partir de un PMA de productos desarrollados mediante ingeniería inversa.

2. INTRODUCCIÓN

Este proyecto de grado da como resultado una serie de procedimientos optimizados, para el diseño, la certificación y la producción de un componente desarrollado mediante ingeniería inversa en Colombia.

La finalidad de este proyecto es dar una pauta a los empresarios, nuevos emprendedores, comunidad académica y demás interesados, para desarrollar hardware aeronáutico en el territorio colombiano, basados en procedimientos avalados que garanticen con éxito el desarrollo de proyectos de este tipo.

Si bien, el estado del arte presenta una gran cantidad de información, esta se encuentra de manera ambigua y no cuenta con el suficiente detalle para establecer estos procesos dentro de las empresas que lo requieren. Así que en este proyecto desarrollo una serie procesos modelados bajo una metodología específica del sector aeronáutico denominada IDEF0, el cual permitió ahondar de manera genérica y sintetizada en la mayor cantidad de procesos posibles, sin ahondar en un componente en particular. Esta es una manera certera de hacerle frente a la correcta utilización de la información y su fácil entendimiento.

La información proveniente de este proyecto de grado dará una base de entrada para que la sección de certificación aeronáutica de la defensa (SECAD), publique una circular de asesoramiento con estos procesos avalados. Será obligación de las entidades que desarrollen estas actividades dar mayor detalle a los procesos particulares que se puedan presentar para cada componente.

3. JUSTIFICACIÓN

la relevancia de este proyecto para la ingeniería aeronáutica en Colombia, se ve reflejada en la importancia de producir herramientas que orienten a las empresas que quieran fabricar partes aeronáuticas mediante ingeniería inversa; esta investigación, se enfocará en el desarrollo de guías y protocolos pertinentes para desarrollar esta actividad, donde se expliquen conceptos necesarios para desarrollar o mejorar procesos, razón por la cual se establecen algunos criterios requeridos para las buenas prácticas de ingeniería inversa, basadas también en la documentación actual pertinente, la carece de detalle y contiene información ambigua. En casos como la metrología se desarrollará un programa en el software Matlab que permitirá acortar tiempos y evitar reprocesos en el momento de hacer un levantamiento dimensional o un control de calidad, basado en un protocolo de medición directa, ambos con el aval de la SECAD.

Los motivos que nos llevaron a desarrollar esta investigación son:

- a. Fomentar el desarrollo industrial-tecnológico en materia aeronáutica, debido a que es necesario que Colombia tenga una carrera aeronáutica basado en conceptos de aeronaves desarrolladas en otros países para así lograr producir proyectos de impacto, como lo es la fabricación de partes en particular o de aeronaves en general.
- b. Apoyar el concepto de sustitución de importaciones de partes aeronáuticas, con costos reducidos.
- c. Promover la competencia de la industria aeronáutica a nivel internacional.
- d. Proponer una solución para proveer partes que no se encuentren en el mercado debido a la obsolescencia de las mismas
- e. Este proyecto servirá como apoyo en la documentación que será publicada por la sección de certificación aeronáutica de la defensa SECAD como una circular de asesoramiento (CA) estatal, para que las empresas agremiadas tengan la posibilidad de certificar sus productos y procesos con mayor asertividad.

4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

4.1 Definición del problema.

La única manera para que un ente certificador apruebe réplicas de productos aeronáuticos que no tengan un acuerdo de licencia, desarrolladas mediante ingeniería inversa, es por medio de los ensayos y cálculos (dependiendo de la criticidad). Estos productos deberán demostrar la misma o mayor capacidad de operación que la de los especímenes originales. La comunidad académica, el Estado y las empresas del sector aeronáutico en Colombia han evidenciado la necesidad de obtener circulares de asesoramiento oficiales en Colombia con información optimizada para la certificación de sus productos aeronáuticos bajo certificación PMA (aprobación de fabricación de producto).

4.2 Descripción del problema.

El reglamento federal de aviación (FAR), norma norteamericana pertinente para este proceso (capítulo 21¹) describe una serie de criterios genéricos para lograr desarrollar un producto certificable a partir de ingeniería inversa, razón por la cual esta investigación necesitará poner esta normatividad en el contexto colombiano y para ello se plantean varios interrogantes desde tres puntos de vista:

- a. *Ingeniería inversa*: ¿Cuál es el procedimiento técnico para replicar una pieza metálica los estándares de calidad pertinentes, demostrando las mismas o mejores propiedades que la original?
- b. *Certificación de diseño*: ¿Cuál es el paso a paso que debe llevar una empresa para que pueda aprobar una solicitud de fabricación de partes (PMA)?
- c. *Certificación de Producción*: ¿Cuál es el procedimiento que se debe llevar para aprobar una solicitud de una producción de partes aeronáuticas a partir de un PMA basado en ingeniería inversa?

4.3 Pregunta de investigación.

¿Cuál es el procedimiento optimizado para diseño, certificación y producción de un componente desarrollado mediante ingeniería inversa en Colombia?

¹ U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, Parts Manufacturer Approval (PMA) (Página web) 2016, [Citado 20 agosto de 2019], Disponible en: <<http://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=da23626c21aa97af26bbc2622a9f78d8&mc=true&node=pt14.1.21&rgn=div5>>

5. OBJETIVOS

5.1 General

Proponer un procedimiento para el diseño, producción y certificación de productos aeronáuticos, certificados como PMA, desarrollados mediante ingeniería inversa y evaluar su aplicabilidad.

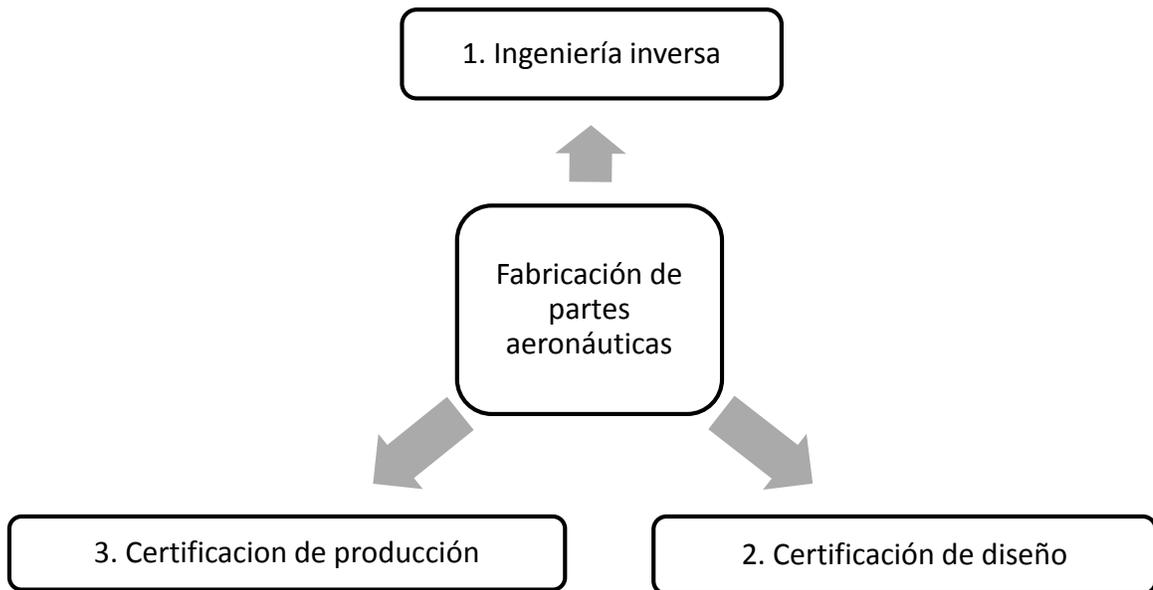
5.2 Específicos

- a. Diseñar una guía para el desarrollo de componentes aeronáuticos clase II o III mediante ingeniería inversa.
- b. Desarrollar una guía para solicitar un PMA para productos aeronáuticos desarrollados mediante ingeniería inversa.
- c. Proponer una guía de procedimientos de aprobación de producción de un PMA.

6. MARCO TEÓRICO

En este proyecto se plantea la propuesta de una serie de guías que acompañen la certificación de productos aeronáuticos, visto desde tres puntos de vista: la ingeniería inversa, la certificación del diseño y la certificación de producción como se observa en la Figura 1. El propósito, es llevar los estándares existentes (a nivel nacional, como lo es la normativa militar evaluada por la SECAD y la normativa civil que concierne a la UAEAC y a nivel internacional, las LAR, FAR, EASA, basados en políticas de la OACI) para certificación de partes aeronáuticas desarrolladas mediante ingeniería inversa. En cuanto a la guía aplicable al ente certificador (para calificación de productos) se debe resaltar que es necesario revisar la normativa pertinente para así optimizarla y funcione de manera síncrona con el resto de ítems abordados en este proyecto. Esta a su vez servirá como un norte para el solicitante, puesto que allí se le explicará cuál es el enfoque de validación del producto al que se está aplicando.

Figura 1. Componentes de la certificación de productos aeronáuticos, desarrollados mediante ingeniería inversa.



Fuente: Elaboración Propia.

La ingeniería inversa es un proceso de medición que se utiliza para reconstruir la imagen de un componente o investigar un evento pasado², el reciente avance de las nuevas tecnologías fomentaron el desarrollo en materia aeroespacial, automotriz, consumibles electrónicos, dispositivos médicos, equipos deportivos juguetes y joyería entre otros. Esta tecnología también es usada en ciencias forenses e investigación de accidentes

Esta tecnología aplica para el sector aeroespacial, aeronáutico, sino que también se utiliza en medicina, investigación de accidentes, sector petrolífero y en la informática, entre muchos otros). Las razones por las cuales la ingeniería inversa es importante para el sector aeroespacial son:

- a. Preserva elementos históricos de importancia.
- b. Fomenta la evolución industrial debido a la posibilidad de hacer reingeniería de piezas obsoletas.
- c. Existe la necesidad comercial de desarrollar productos con esta tecnología.

Según (WANG, 2011), instructor técnico e investigador en ingeniería mecánica y ciencia de los materiales, son necesarias las siguientes capacidades para el desarrollo exitoso de un proyecto de ingeniería inversa:

- a. Matemáticas, ingeniería y ciencia, en el análisis e interpretación de datos.
- b. El uso de técnicas, instrumentos y herramientas en aplicaciones de ingeniería inversa.
- c. La realización de experimentos y pruebas apropiadas para obtener los datos necesarios en la ingeniería inversa.
- d. Identificar, formular y resolver problemas relacionados con la ingeniería inversa.
- e. Entender las responsabilidades éticas y legales pertinentes a la ingeniería inversa.
- f. Evaluar documentos y fomentar el logro de los objetivos de un proyecto de ingeniería inversa.

Para certificar una copia de un componente aeronáutico (PMA) o la modificación del mismo (STC) y que no se tenga unos derechos de fabricación (PAH) se utiliza

² WANG, Wewo. Reverse engineering, technology of reinvention, New York, Taylor and Francis Group, 2011, P.1-2

la ingeniería inversa, la cual obligatoriamente tendrá que ser trazable para efectos de seguridad y confiabilidad.

6.1 Marco Contextual

Este proyecto apunta al fomento del impulso industrial en Colombia, más específicamente en el nicho de fabricación y venta de componentes aeronáuticos. Si bien, las guías desarrolladas esta investigación, están enfocadas en las empresas que actualmente se encuentran dentro de agremiaciones referentes a la fabricación de productos aeronáuticos, también aplica para la comunidad académica, completando así los componentes importantes para el desarrollo de una tecnología, el Estado, la academia y la industria. Esta serie de guías será aplicable a la aviación de estado y la aviación civil, también para certificar productos bajo normatividad FAA, EASA u otra entidad internacional.

6.1.1 Modelado de procesos con IDEF0

La definición de integración para el modelado de funciones (IDEF0) es un estándar desarrollado por el Estándar Federal de Procesamiento de Información (FIPS) y la fuerza aérea de estados unidos (USAF), con el fin de fomentar el aumento de la productividad de la fabricación aeronáutica a través de la aplicación sistemática de la tecnología informática, desde el punto de vista de la fabricación asistida por computadora (ICAM).

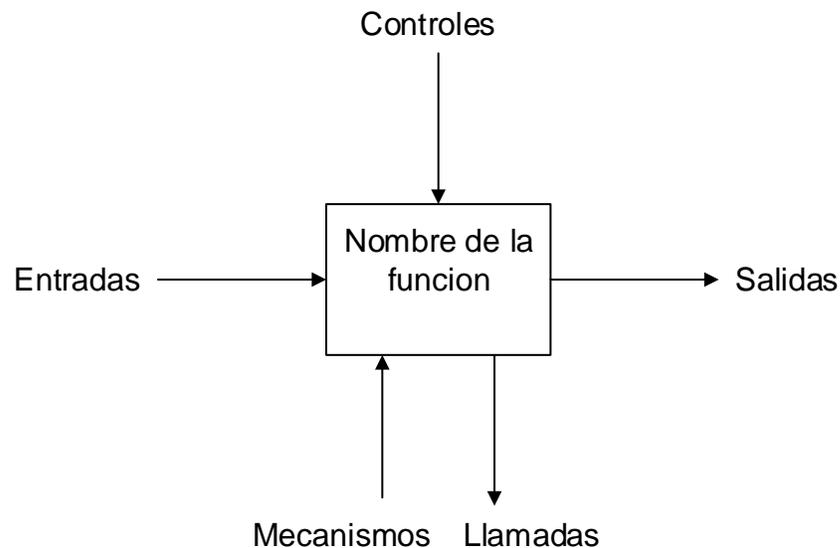
Estos estándares definen parámetros representados gráficamente con reglas de semántica y sintáctica, de manera general se enumeran a continuación:

- a. El modelo de esquema que se visualiza en la sección Índice de nodos de cada guía desarrollada en este documento es parte fundamental para la navegación y comprensión del modelo IDEF0. Todos los números de nodo, junto con los títulos de los diagramas o los nombres de los cuadros, se presentarán en forma de sangría que exhibe la estructura jerárquica anidada del modelo. A esta numeración se le conoce como numero C.
- b. Todas las funciones e interfaces se representan como cuadros (funciones) y flechas (interfaces de datos u objetos) en los diagramas, donde establecen las entradas, los procesos, las salidas y los mecanismos de cada proceso como se muestra en la Figura 1.
- c. Todos los modelos deben iniciar con un diagrama de nivel superior cuya denominación es A-0 (A menos cero), el cual está representado por una sola casilla con sus flechas delimitadoras. Las flechas en este diagrama interactúan con funciones fuera del área temática para establecer el enfoque del modelo que también representa el conjunto completo de interfaces externas. El diagrama A-0 también establece el alcance o límite del modelo y la orientación. El diagrama de contexto A-0 también presentará breves declaraciones que especifican el punto

de vista y el propósito del modelo, que ayudan a guiar y restringir la creación del modelo.

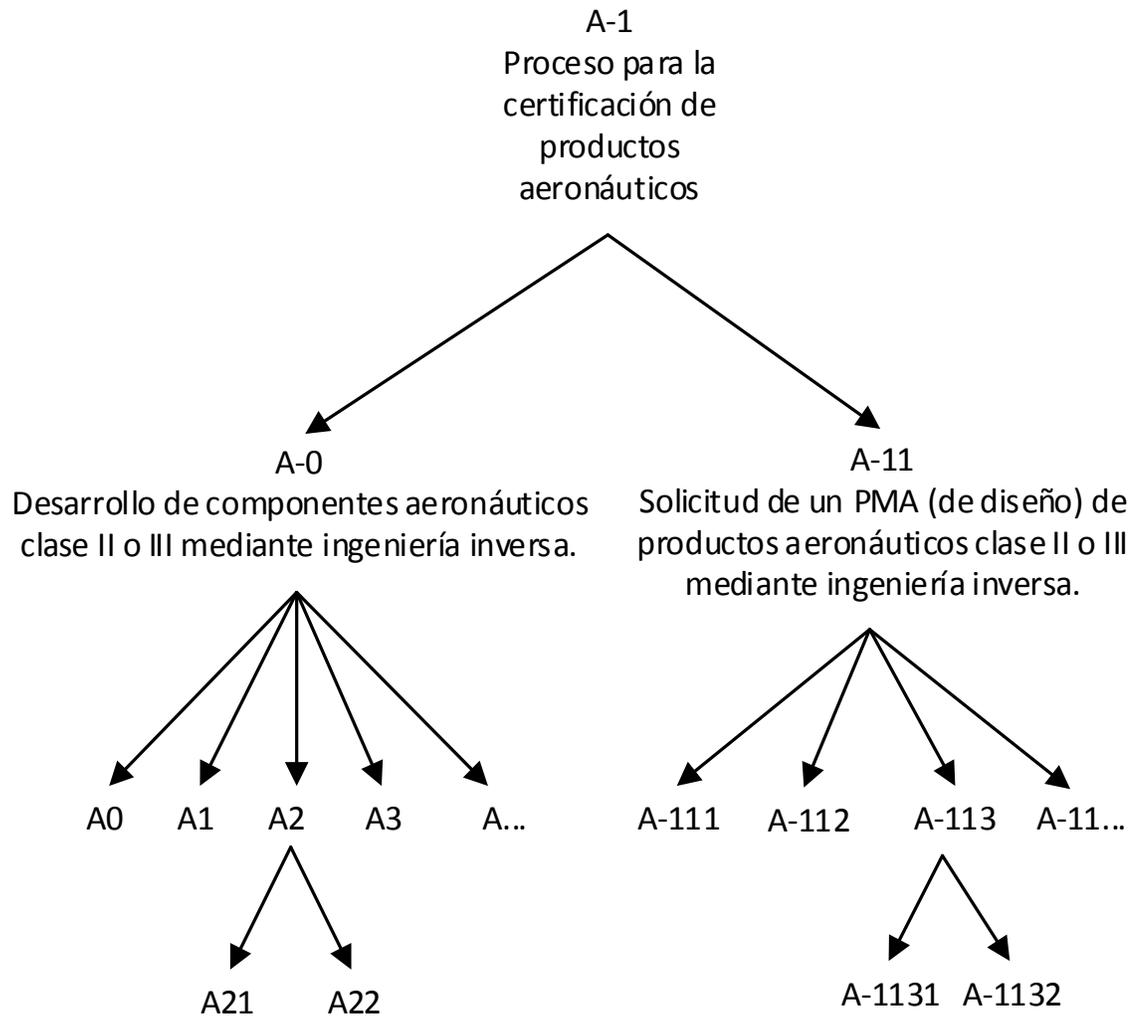
- d. La estructura se debe ir detallando de lo general a lo específico de manera jerárquica de acuerdo con el índice de nodos, donde cada cuadro tendrá un cuadro hijo que representa con detalle cada función como se muestra en la Figura 3, el límite máximo de funciones por cuadro son seis y mínimo tres.
- e. La manera de agrupar varios modelos que se relacionan entre sí pero que hacen parte de modelos distintos, es creando numeración de contexto de la forma de la forma A-n, para n mayor que uno, Por lo tanto, A-1 es un diagrama de contexto, es un diagrama “padre” por apropiación (de A0), pero no es de alto nivel. Un ejemplo aplicable en este caso particular se muestra en la Figura 2

Figura 1 Cuadro de funciones y flechas de datos



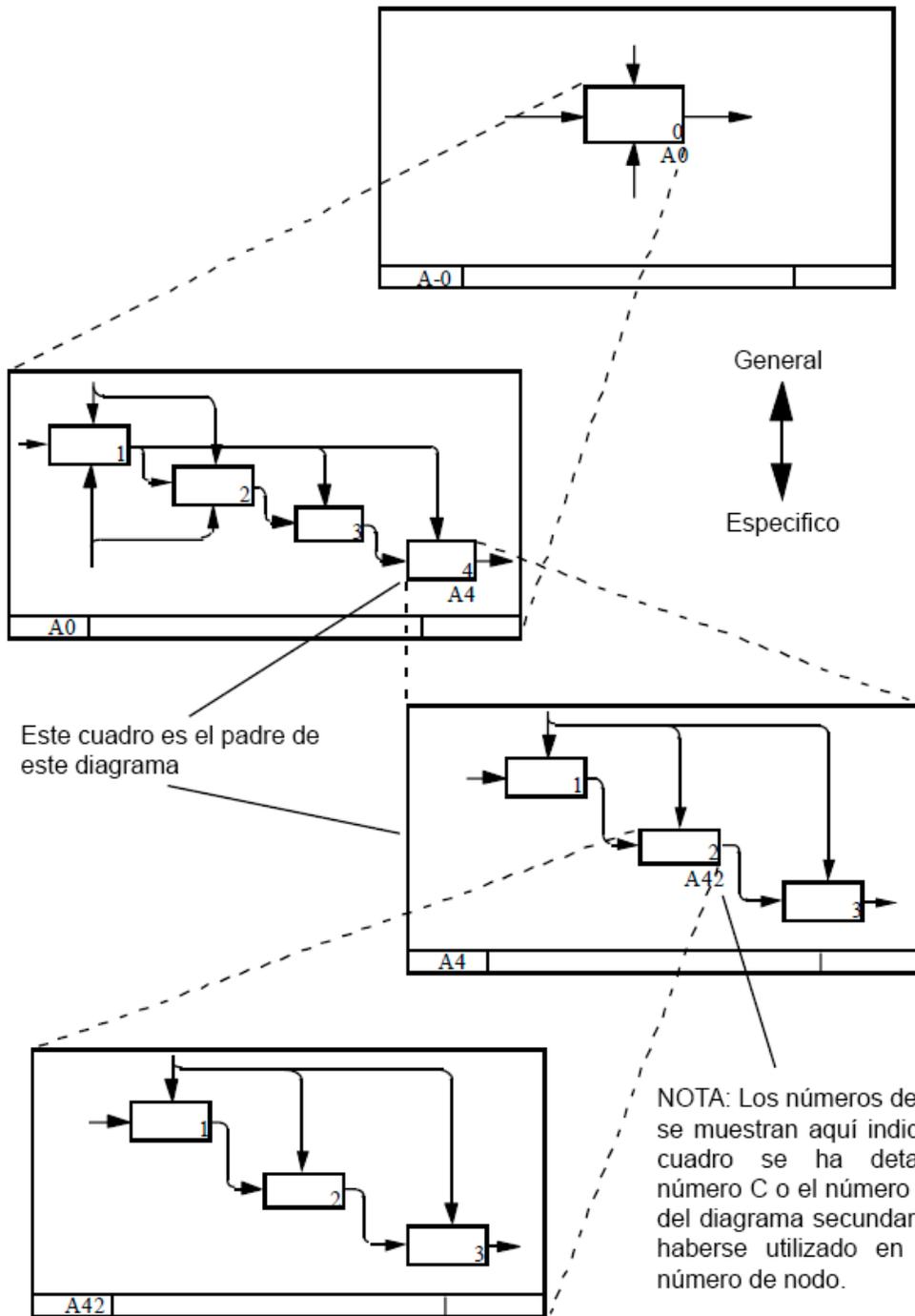
Fuente: Draft Federal Information Processing Standards. Integration Definition for Function Modeling (IDEF0). 1993, P 11; Modificado por el autor

Figura 2 Diagrama de contexto con numeración de nodo negativo



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 3. Estructura del modelo IDEF0



Fuente: Draft Federal Information Processing Standards. Integration Definition for Function Modeling (IDEF0). 1993, P 16; Elaborado por el autor

7. METODOLOGÍA

Esta investigación de tipo tecnología aplicada, se desarrolló como primera medida, mediante una investigación documental donde se estableció un estado del arte que sirvió de punto de partida para modelar los procesos requeridos para desarrollar los objetivos propuestos en este proyecto de grado. Se obtuvo la oportunidad de recoger la información de documentos como el manual militar de ingeniería inversa (115C) desarrollado por el departamento de defensa de los Estados Unidos, circulares de asesoramiento como la 21.303-4 referente a la aplicación para la solicitud de un PMA de diseño y Ordenes como la 81.22 donde se refiere a la solicitud de una certificación de producción aeronáutica, toda esta información contrastada con la normativa colombiana de la UAEAC y los conocimientos de la SECAD. Información complementaria encontrada para apoyar conceptos de fondo, con publicaciones como el “Desarrollo y evaluación de un marco de ingeniería inversa para piezas de repuesto” y “Un método de modelado integrado para la evaluación de los sistemas de calidad aplicados a las cadenas de suministro de fabricación aeroespacial”. También, se usó como base conceptual, el libro de Wewo Wang, “Ingeniería inversa, la tecnología de la reinención”

Como segunda etapa, se desarrolló una fase exploratoria, donde se encontró ambigüedad en la presentación de la información, con poco nivel de detalle, dando a la oportunidad de desarrollar la fase de investigación descriptiva, donde se clasificó la información,

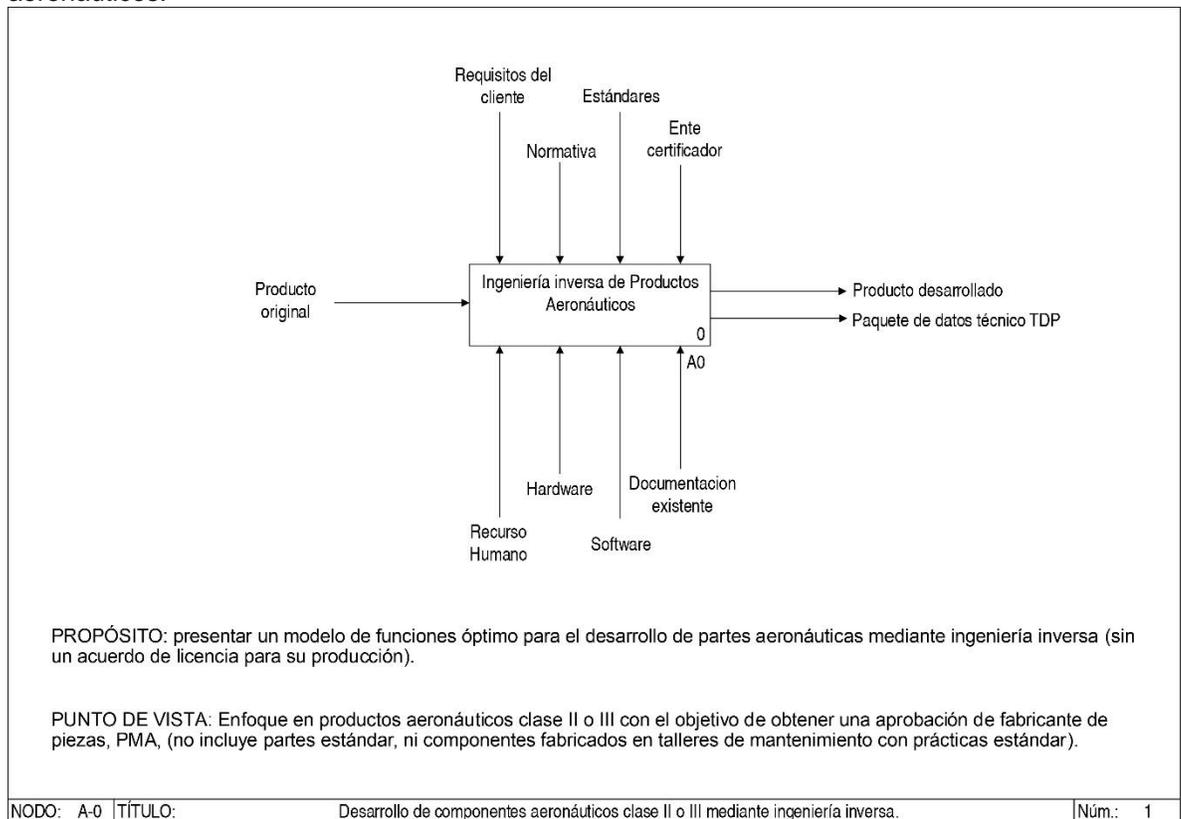
Por último, se desarrolló la fase de investigación correlacional, donde se desarrolló cada objetivo, con la metodología de modelado de procesos IDEF0. Esta etapa tuvo varias iteraciones y pruebas de escritorio en el cual se corrigieron errores para lograr un modelado optimizado. En este proceso, se estableció el protocolo de levantamiento dimensional y desarrollo de un software requerido para desarrollar el proceso de medición directa

8. GUÍA PARA EL DESARROLLO DE COMPONENTES AERONÁUTICOS CLASE II O III MEDIANTE INGENIERÍA INVERSA.

8.1 Diagrama de contexto de nivel superior

A continuación en la Figura 4 se detalla la información referente a diagrama de contexto de nivel superior, desarrollada en el nodo A-0.

Figura 4. Diagrama de contexto de nivel superior de ingeniería inversa de productos aeronáuticos.



Fuente: Elaborado por los autores

8.1.1 Propósito y punto de vista

8.1.1.1 Propósito

presentar un modelo de funciones óptimo para el desarrollo de hardware aeronáutico mediante ingeniería inversa (sin un acuerdo de licencia para su producción). plasmado en este diagrama de contexto de nivel superior de la Figura 4, corresponde con el primer objetivo específico planteado en este proyecto de grado, que proporciona entradas y retroalimentaciones al resto de los objetivos que

tienen como fin proponer procedimientos para la certificación de diseño y producción de componentes aeronáuticos clase II o III desarrollados mediante ingeniería inversa.

8.1.1.2 Punto de vista

Enfoque en productos aeronáuticos clase II o III con el objetivo de obtener una aprobación de fabricante de piezas (PMA)), corresponde con las limitaciones del presente proyecto de investigación (véase limitaciones del proyecto, numeral d). Este no incluye partes estándar, ni componentes fabricados en talleres de mantenimiento con prácticas estándar.

8.1.2 Entradas

De acuerdo con las entradas presentadas en este nivel, se tiene como primera medida el componente original a ser desarrollado mediante ingeniería inversa, cabe aclarar que este modelo puede aplicarse a una sola pieza, un sub ensamble o ensamble general que cumpla con las características para ser replicado y certificado.

8.1.3 Controles

Los controles tienen la finalidad es especificar las condiciones requeridas para que la función produzca salidas correctas. De manera general se encuentran:

- a. Los requisitos del cliente, los cuales dependen principalmente de la necesidad que este requiera, basado principalmente en la normativa y en segunda medida el plan de calidad que este requiera.
- b. La normativa, que depende estrictamente del gobierno nacional quien es que al final otorga la aprobación de fabricación del o los productos. Basados en los estándares.
- c. Los estándares. Existen una gran cantidad de estándares, donde establecen procesos, para desarrollar determinadas tareas.
- d. El punto de vista del ente certificador. Es la entidad física que aplica la normativa, de acuerdo a la criticidad de los componentes, es quien califica un producto basado en la normativa.

8.1.4 Salida

Como salida se obtiene el componente fabricado, ya sea como prototipo, como elemento individual o como una producción (en esta guía no se tendrá en cuenta la gestión frente a el ente certificador, debido a que esto hace parte del último objetivo

específico planteado al principio de este proyecto), esta a su vez viene acompañada con toda la documentación, de diseño, fabricación, trazabilidad etcétera, que se liberó durante el proceso de ingeniería inversa. A esta matriz de información se le llama el TDP (paquete de datos técnicos por sus siglas en inglés).

8.1.5 Mecanismos

Son importantes los componentes que se enumeran a continuación, debido a que posibilitan el desarrollo de la ingeniería inversa competitiva, entre ellos están el talento humano, hardware y el software puesto que desde aquí se puede evidenciar si tiene la capacidad instalada, y recurso humano para desarrollar el componente candidato a desarrollar mediante ingeniería inversa y cuál sería el alcance que tendrá la entidad que lo desarrolle.

Un mecanismo importante es la información que acompañan los componentes aeronáuticos, como por ejemplo el historial de mantenimiento, los manuales disponibles, la información de mercado etc. Más adelante, en un análisis económico/funcional se darán pautas más detalladas para desarrollar este mecanismo.

8.2 Índice de nodos

El índice de nodos que se representa a continuación es parte fundamental para la navegación y comprensión del modelo IDEF0, está representado en un modelo de “esquema”. Todos los números de nodo, junto con los títulos de los diagramas o los nombres de los cuadros, se presentarán en forma de sangría que muestra la estructura jerárquica anidada del modelo, como se visualiza en la Tabla 1 a continuación.

Tabla 1. Índice de Nodos del desarrollo de Ingeniería Inversa de Productos Aeronáuticos.

A0	Proceso principal del desarrollo de productos aeronáuticos clase II o III mediante ingeniería inversa
A1	Análisis económico / funcional
A11	Recopilación de información
A12	Evaluación de la información
A13	Estimación de la información faltante
A131	Identificación de información técnica general
A132	Evaluación de consideraciones de información faltante

	A133	Diligenciamiento de hojas de llamada de datos
	A14	Estimación del hardware requerido
	A15	Estimación de requisitos de pruebas
	A151	Inspección inicial
	A152	Establecimiento del plan de ensayos
	A153	Análisis del peor de los casos
	A16	Estimación del costo de ingeniería inversa, cronograma y plan de gestión
A2		Desensamble
	A21	Procedimientos antes del desensamble
	A211	Inspección y pruebas iniciales
	A212	Auditoria de configuración física
	A213	Mediciones iniciales
	A22	Procedimientos de desensamble, registro y control de partes
	A23	Procedimientos después del desensamble
	A231	Identificación/selección de partes apropiadas
	A232	Análisis económico optimizado
	A233	Investigación de documentos
A3		Análisis de hardware
	A31	Análisis dimensional
	A311	Clasificación de componentes
	A312	Técnicas y procedimientos
	A313	Selección de herramientas de medición
	A314	Desarrollo de la metrología
	A315	Generación de Informe metrológico
	A32	Caracterización de materiales
	A321	Establecimiento del tamaño de la muestra
	A322	Análisis de composición y método de fabricación del material

	A323	Determinación de propiedades mecánicas
	A324	Aplicación de otras técnicas de caracterización
A33		Análisis de ingeniería
	A331	Reconstrucción del diseño
	A3311	Evaluación
	A3312	Matriz de puntos
	A3313	Modelo de alambrado 3D
	A3314	Superficies
	A3315	Sólidos
	A3316	Optimización
	A332	Simulaciones y cálculos
	A333	Conclusiones y reportes
A34		Estudio de producibilidad
A4		Diseño y desarrollo
	A41	Reingeniería
	A42	Especificaciones de ingeniería
	A421	Dimensiones/ Tolerancias
	A422	Materiales
	A423	Tratamiento térmico
	A424	Acabados
	A425	Métodos de limpieza y unión
	A426	Recubrimientos
	A43	Planos nivel 3
A5		Manufactura
	A51	Planeación de manufactura
	A511	Matriz de materiales seleccionados
	A512	Selección del proceso de manufactura
	A513	Clasificación del proceso de manufactura
	A514	Definición de las condiciones del proceso de manufactura
	A515	Programación CAM
	A516	Disposiciones de QC (QAP)

A52	Revisión de producción
A521	Costos
A522	¿Hacer, contratar o comprar?
A523	Cronogramas
A524	Adquisiciones
A53	Adquisiciones
A54	Preproducción
A55	Fabricación de prototipo
A6	Inspección y pruebas
A61	Inspección de fabricación
A62	Revisión y aprobación
A63	Disposición de tarjetas
A64	Revisión del cliente
A65	Pruebas
A66	Ensamble

Fuente: Elaborado por los autores

8.3 Nodo A0, Diagrama secundario de nivel superior: Proceso principal del desarrollo de productos aeronáuticos clase II o III mediante ingeniería inversa

En el diagrama secundario de nivel superior como se puede observar en la Figura 5, se desarrollan seis actividades principales iniciando en la A1: el análisis funcional / económico, cuya determinación se encuentra en establecer la viabilidad del proyecto, es donde se estipula de manera general los recursos que se encuentran disponibles. Es donde se recopila la documentación disponible, se determinan los datos faltantes, los requisitos de pruebas para certificación y los cronogramas, costos y planes de gestión preliminares, que se irán perfeccionando a medida que transcurre el proceso de ingeniería inversa.

A continuación, se inician los procesos antes, durante y después del desensamble, como se identifica en el nodo A2, esta tarea se desenvuelve dentro de múltiples perspectivas, como por ejemplo la documentación, la marcación, la generación de un control de configuración, notas recomendatorias, metrología preliminar y demás. En este punto se puede dar retroalimentación al análisis económico / funcional (A1).

Cuando el proyecto se recomienda viable se inician los procesos de ingeniería de análisis donde se incluyen, en términos dimensionales, estructurales, de materiales y composición química además de la identificación de procesos de fabricación como recubrimientos, tratamientos especiales, acabados etc. Esto es desarrollado en la actividad A3, en el análisis de hardware.

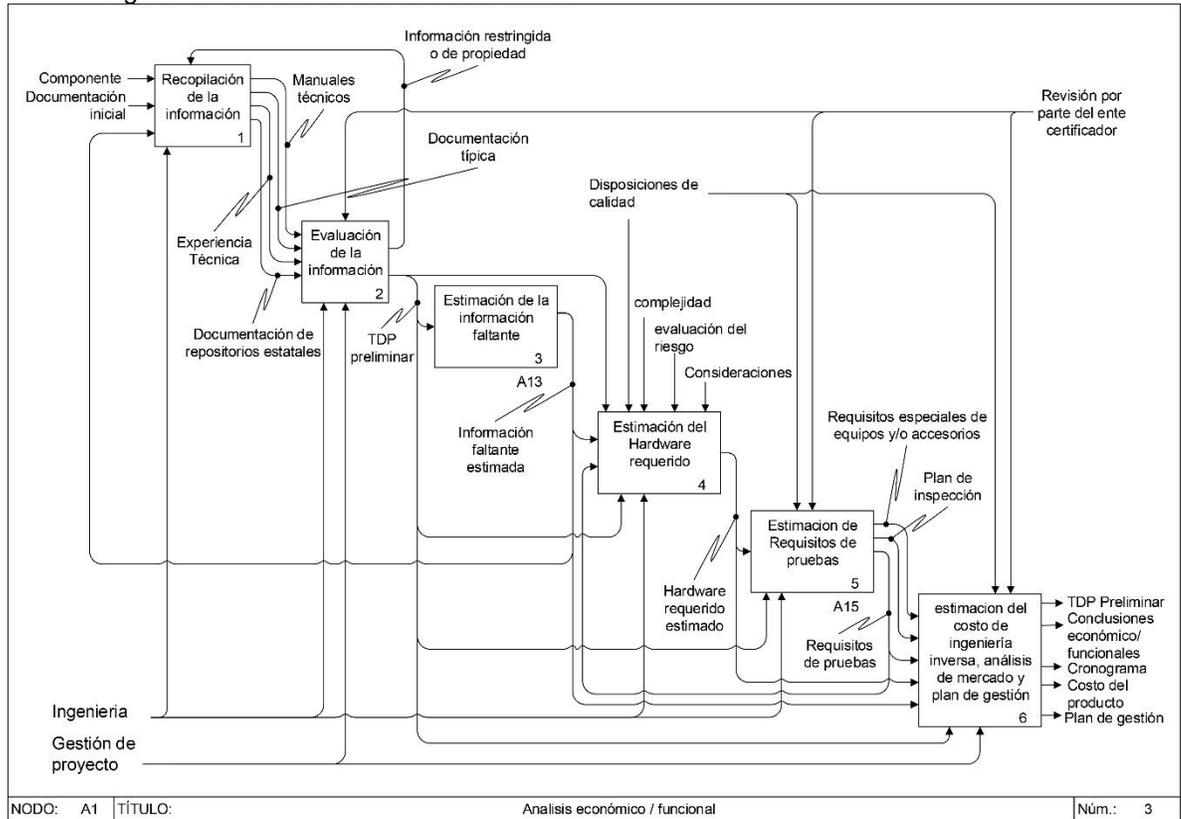
La actividad A4 permite abordar temáticas ingenieriles en función del diseño de detalle, reingeniería y desarrollo del producto. Este punto se generan la matriz de materiales adecuados, las especificaciones de fabricación los planos de manufactura, es donde se hace un análisis de producibilidad preliminar de las partes aeronáuticas.

La manufactura desarrollada en la actividad del nodo A5 tiene en cuenta la planeación de la manufactura, la preproducción y la producción de un prototipo.

Por último y de gran importancia se tiene la actividad de control de calidad (A6), que recopila toda la información que se ha logrado descifrar en cuanto a identificación se refiere, esta actividad también retroalimenta las otras actividades. Se tiene en cuenta las disposiciones de garantía, la documentación y su revisión bajo los estándares establecidos por la empresa que desarrolla el proyecto de ingeniería inversa.

A continuación, se detalla de manera más efectiva las funciones representadas en el diagrama secundario de nivel superior, en diagramas y secundarios de nivel inferior

Figura 6. Análisis funcional / económico



Fuente: Elaborado por los autores

8.3.1.1 Nodo A11, Recopilación de información

Se tiene como entrada el componente aeronáutico a evaluar y la documentación que lo acompaña, esta recolección tiene como finalidad buscar y ordenar la información bruta que se pueda encontrar. Dentro de esta fase de recopilación se recomienda tener³:

- a. Siguiente ensamble superior, que proporciona información sobre los parámetros de entrada / salida, piezas de acoplamiento, uso final, etc.
- b. Siguiente ensamble inferior, que identifica interfaces, parámetros de entrada / salida, piezas de acoplamiento, etc.

³ Department Of Defense Handbook. US ARMY, MIL-HDBK-115C (2016). P. 9.

- c. Especificaciones, como especificaciones de prueba; Examen de ingreso Procedimientos, descripciones de compra, etc.
- d. Lista de partes / lista de datos, que identifica todas las partes e indica si son números estándar nacionales (NSN), piezas estándar militares (MIL-STD), etc. La lista de datos debe indicar los planos y especificaciones necesarios y proporcionar información valiosa sobre detalles que deben investigarse para eliminar los requisitos restrictivos.
- e. Esquemas, que proporcionan información básica para la auditoría de configuración física (PCA), verifican la lista de piezas y ahorran tiempo
- f. Dibujos de patrones maestros, que proporcionan copias de los empaques, ahorrando tiempo y el costo necesario para volver a dibujar.

La documentación típica que nos arroja información importante en gran medida puede ser:

- a. Manual técnico del sistema.
- b. Manual de operación / mantenimiento.
- c. Detalle ilustrado de las piezas.
- d. Cuadro de asignación de mantenimiento.
- e. Siguiendo dibujo de ensamblaje más alto.
- f. Dibujo de ensamblaje inferior.
- g. Dibujos de piezas.
- h. Lista de piezas calificadas.
- i. Requisitos de prueba del sistema
- j. Catálogos comerciales / folletos de ventas.

Además de la documentación típica se podrá recopilar, repositorios estatales y experiencia técnica del personal involucrado. cabe aclarar que dicho personal no tuvo que ser participe de la fabricación y/o certificación de tipo del elemento original.

8.3.1.2 Nodo A12, Evaluación de la información

Toda esta información bruta producto de la actividad A11, debe ser evaluada, en la actividad 2 de este nodo se puede observar que se tienen dos puntos de vista para dicho fin, la entidad misma que desarrolla el procedimiento de recopilación de la información y el ente certificador. Es en este punto se informa a la agencia de gobierno pertinente para certificación PMA (bajo las características de enfoque en este documento), la intención de desarrollar el proceso de ingeniería inversa junto con la información recopilada, es este ente certificador el que dará aval para continuar el proceso de ingeniería inversa, en el caso que la información sea restringida o de propiedad y que por tanto no se puede utilizar se deberá revisar de

nuevo la fase de recopilación de la información. Los datos técnicos recopilados en este proceso deberán tener el estatus de "derechos ilimitados". La información de salida de este proceso se denomina "paquete de datos técnico preliminar (TDP por sus siglas en inglés).

8.3.1.3 Nodo A13, Estimación de la información faltante

La actividad 3, detallada en A13, se enfoca en apreciar la información que aún no se ha obtenido y que es necesaria, esto es importante en el momento de establecer la viabilidad del proyecto en cuanto a costos, debido a que esta información puede tener un valor en cuanto a dinero o dificultad para conseguirla.

Para lograr estimar la información faltante se debe ir de lo general a lo específico, se recomienda utilizar el siguiente listado de verificación de información⁴:

- a. Planos de ingeniería
- b. Especificaciones de ingeniería
- c. Esquemas
- d. Diagramas de cableado
- e. Listas de partes
- f. Estándares y especificaciones militares aplicables
- g. Desglose de piezas ilustradas
- h. Hojas de instrucciones de fabricación
- i. Descripciones de compra
- j. Disposiciones de garantía de calidad
- k. Procedimientos de prueba de aceptación
- l. Especificaciones de prueba
- m. Equipos / accesorios de prueba
- n. Cambios / revisiones pertinentes de ingeniería
- o. Próximos dibujos de ensamblaje superiores
- p. Dibujos de ensamblaje inferior

Esta estimación de la información faltante también puede desarrollarse al responder las siguientes preguntas⁵:

⁴ Ibid., P. 12

⁵ Ibid., P. 13

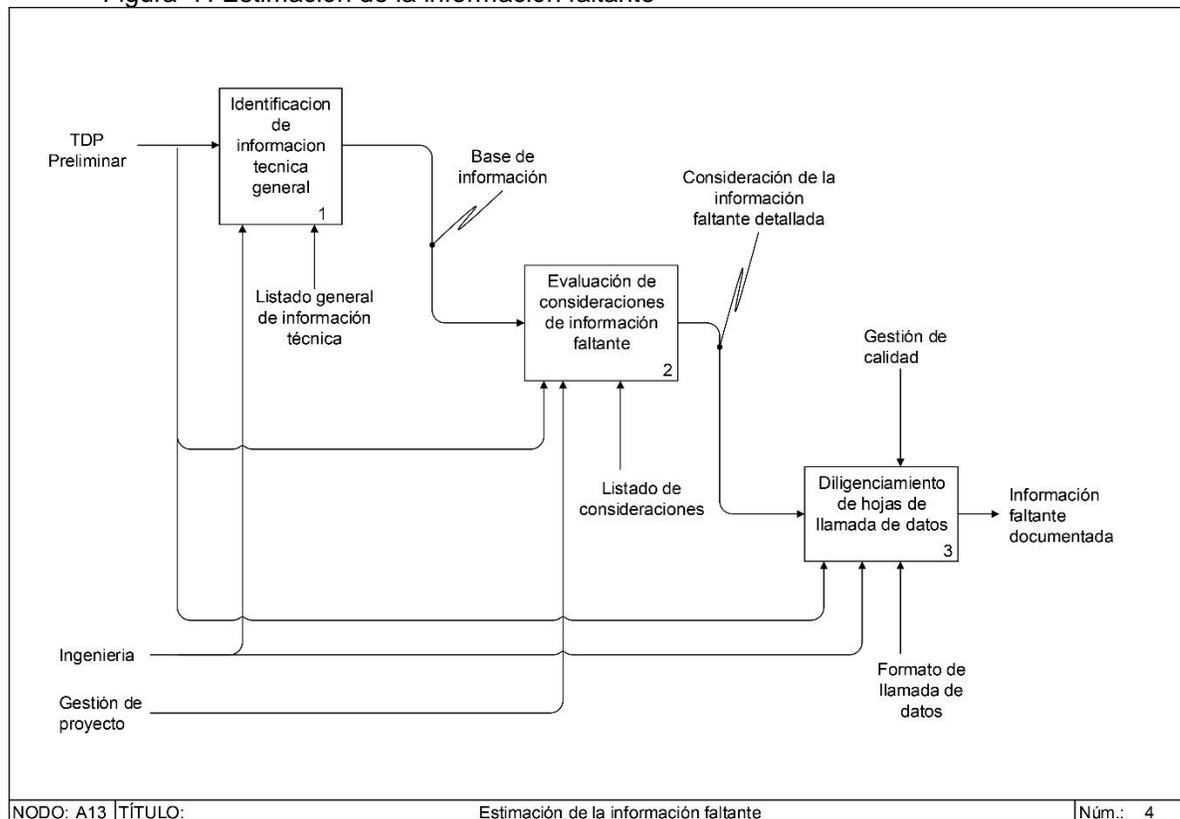
- a. ¿Están todos los materiales de fabricación requeridos especificados en facturas, notas, especificaciones militares o de proceso, o en otro lugar dentro de los datos aplicables? (Se debe especificar cualquier eliminación u omisión).
- b. ¿Están todas las partes completamente dimensionadas o definidas por completo? (Se debe especificar cualquier eliminación u omisión).
- c. ¿Son todos los procesos, acabados, especificaciones de materiales y otros elementos necesarios anotados en los datos? (Se debe especificar cualquier eliminación u omisión. Se deben tomar notas sobre cualquier información conflictiva o posibles errores en los datos).
- d. ¿Los datos indican que el artículo o sus componentes son "Fuente controlada", "Artículo alterado", "Artículo seleccionado"? , de lo contrario, ¿es fuente restringida? (De ser así, se deben identificar la restricción aplicable y la (s) fuente (s).) ¿Se notan los requisitos de la prueba de aceptación? (De ser así, dichos requisitos deberían identificarse).
- e. ¿Se anotan en los datos disponibles todos los requisitos de inspección que serían requeridos por las prácticas normales de ingeniería de la industria? como el tinte penetrante, pruebas de dureza, etc. (De lo contrario, se debe identificar el tipo de información faltante).
- f. ¿Los datos indican que la parte es crítica o tiene características críticas? Si es así, ¿se identifican y definen las características críticas? (Los hallazgos deben resumirse).
- g. ¿La fabricación del artículo requiere un perfil generado por coordenadas o un dibujo de contorno? Si es así, ¿se identifica el dibujo o se describe adecuadamente el contorno requerido? (Si se requieren dibujos de contorno o perfiles generados por coordenadas para la fabricación del artículo, pero no están contenidos en los datos, este hecho debe tenerse en cuenta).
- h. ¿La pieza está hecha de forja o fundición? Si es así, ¿los números de dibujo de forjado o fundición están establecidos en los datos? (Si los dibujos de fundición o forja están disponibles, deben incluirse en el paquete. La ausencia de forjados o dibujos de fundición necesarios debe tenerse en cuenta en la evaluación. También se debe tener en cuenta si los datos disponibles restringen las fuentes de forjado o fundición a firmas particulares)
- i. Si la pieza se acopla con otras partes, como los patrones de orificios, ¿están identificadas las piezas de acoplamiento en los datos? (De lo contrario, se debe incluir una nota sobre la ausencia de dicha información).
- j. ¿La fabricación del artículo requiere el uso de maestro o herramientas coordinadas? En caso afirmativo, ¿se identifica el maestro o la herramienta coordinada en los datos? (El uso de plantillas o accesorios

para facilitar la fabricación o el montaje no debe considerarse una herramienta maestra).

- k. ¿Se puede sustituir una especificación o estándar militar o federal, o más preferiblemente un estándar de la industria, por la especificación o estándar del contratista principal establecido en los datos? (Si es así, se debe tener en cuenta la posible sustitución aplicable).
- l. ¿Son necesarios los datos de propiedad para fabricar la pieza? (De ser así, se debe tener en cuenta la ausencia de datos e identificar los datos de propiedad en la medida de lo posible, sobre la base de los datos disponibles sin restricciones).

Para finalizar esta actividad, es importante documentar de manera adecuada estas observaciones, las cuales deben ser estandarizadas con un formato de llamada de datos, esto dependerá del plan de calidad que utilice de la empresa que desarrolle el proceso de ingeniería inversa para este proceso, es necesario crear un formato de llamado de datos.

Figura 7. Estimación de la información faltante



NODO: A13	TÍTULO: Estimación de la información faltante	Núm.: 4
-----------	---	---------

Fuente: Elaborado por los autores

8.3.1.4 Nodo A14, Estimación del Hardware requerido

Volviendo de nuevo al nodo A1, se realiza enseguida la actividad 4, donde se estimarán las características del hardware requerido para ello se necesitará:

- a. Conocer la disponibilidad del hardware adecuado tan pronto como sea posible para desarrollar los datos necesarios a través de la ingeniería inversa.
- b. Estimar la cantidad de piezas necesarias según la complejidad de la pieza y los requisitos de prueba. Dicha cantidad de piezas se deben determinar según la complejidad y la evaluación del riesgo.
- c. Considerar la posible destrucción de un artículo durante el desmontaje y el análisis del material. Siempre que sea posible, solo se deben usar nuevos elementos del inventario, ya que es difícil establecer los criterios de rendimiento o las tolerancias en las piezas usadas. El uso de nuevos artículos del inventario impide que el proceso de ingeniería inversa resulte en una parte inadecuada, debido a defectos existentes. En ocasiones puede ser necesario obtener el hardware de otras fuentes, como unidades de campo o artículos disponibles comercialmente, directamente del proveedor.

8.3.1.5 Nodo A15, Estimación de requisitos de pruebas

8.3.1.5.1 Nodo A151, Inspección inicial

Inicialmente en la actividad número 1 de la actividad A15 (ver Figura 8) se establece una inspección inicial del componente destinado a ser copiado mediante ingeniería inversa; se desarrollan lineamientos del ente certificador para aceptación del prototipo que será construido y probado, teniendo como entrada el TDP completado hasta este punto. En esta actividad, se identifican las pruebas esenciales y los requisitos de equipos/accesorios de prueba.

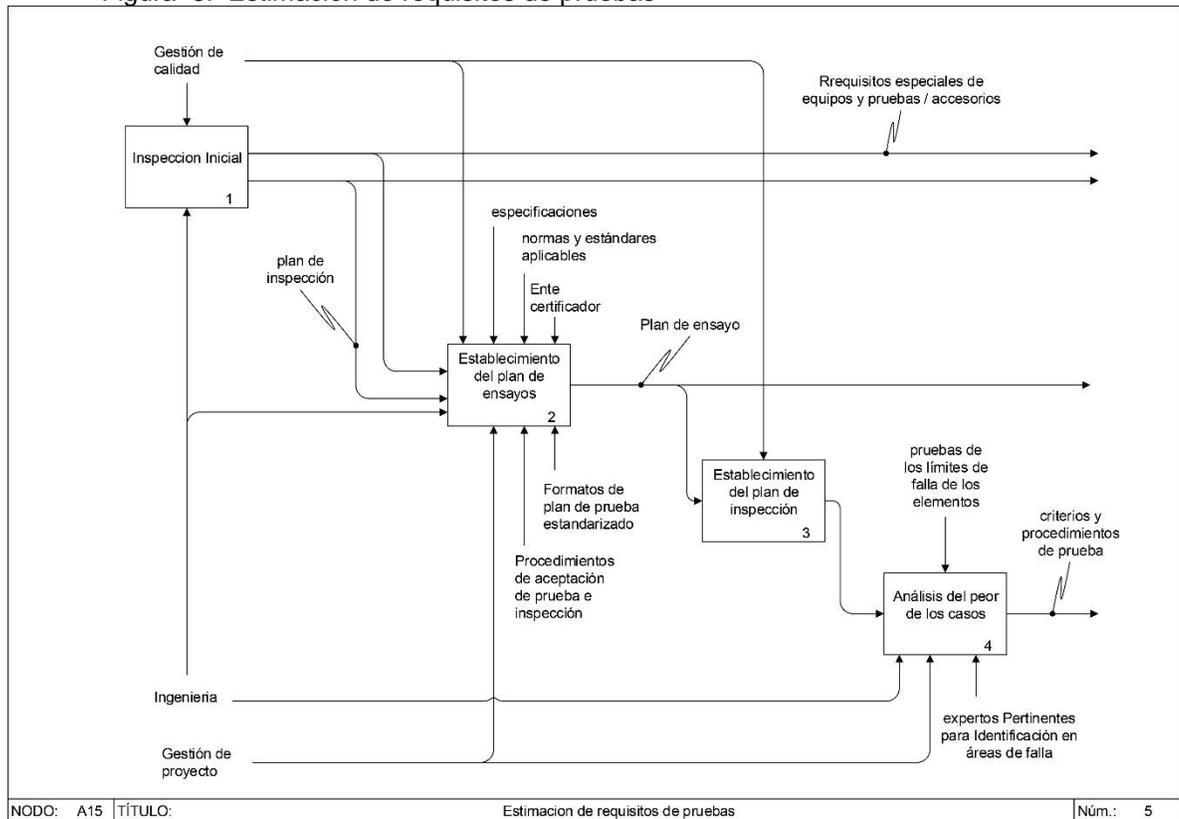
8.3.1.5.2 Nodo A152, Establecimiento del plan de ensayos e inspección

El plan de ensayo(s) e inspección, se desarrolla en la segunda actividad de este nodo. El objetivo es verificar el cumplimiento de los requisitos delineados en las especificaciones y normas aplicables, incluida la verificación del rendimiento, la determinación de la fiabilidad y la resistencia, la verificación de la integridad estructural y la verificación dimensional del producto. Es necesario tener Formatos de plan de prueba estandarizados

8.3.1.5.3 Nodo A153, Análisis del peor de los casos

La actividad que se dónde se realiza un análisis del peor de los casos se desenvuelve en la actividad 3; Si la documentación disponible carece de suficientes datos de prueba, se debe realizar un análisis del peor de los casos para desarrollar, incluidos los modos de falla crítica y las limitaciones. Se debe contactar a expertos en el campo para identificar áreas comunes de falla. Las pruebas para los límites de falla del artículo, como sobrecarga, fatiga, vibración y temperatura, son los medios más convincentes para garantizar la equivalencia de fabricación. Los Procedimientos de prueba de aceptación deben definir estos requisitos y especificar los procedimientos de prueba de acuerdo con las especificaciones y estándares aplicables.

Figura 8. Estimación de requisitos de pruebas



Fuente: Elaborado por los autores

8.3.1.6 Nodo A16, Estimación del costo de ingeniería inversa, análisis de mercado y plan de gestión

Si la empresa que desarrolla el proceso de ingeniería inversa, ya ha desarrollado proyectos de esta índole seguramente ya tiene un “know-how”

desarrollado y documentado, es en este punto donde dichos criterios de estimación de costos y tiempos se aplican. Por otro lado, también pudieron ser estimadas algunos costos sin tener la disponibilidad del hardware. En este punto se hace una nueva iteración en la estimación de costo retroalimentándose de la nueva información. Se recomienda tener las siguientes consideraciones⁶:

- a. Se debe revisar la información preliminar de estimación de costo (si la hay)
- b. El cronograma debe realizarse de acuerdo a la complejidad y la cantidad de los componentes
- c. La estimación de costos de ingeniería inversa y la tabla de hitos se deben desarrollar e incluir en el archivo de candidato que posteriormente será revisado por el ente certificador. Los valores para la producción y prueba de prototipos pueden estimarse en este momento y revisarse más adelante en el proceso cuando se reciben las ofertas reales de los fabricantes.
- d. El plan de gestión se puede desarrollar desde el principio del proyecto, pero no es sino hasta cuando se revisen el hardware y los datos que esta actividad finaliza.
- e. Se recomienda utilizar la metodología PERT (Técnica para la revisión y evaluación de programas, por sus siglas en inglés), con el fin de evitar variaciones en el proceso de ingeniería inversa, en la mínima cantidad de tiempo, con costos más bajos y sin reprocesos.
- f. Establecer el precio final del o los componentes, de acuerdo con la rotación del elemento, las condiciones y las características requeridas, este ítem puede definir explícitamente si el proyecto continúa o no.

Las actividades que pueden identificar parte de estimación del costo de ingeniería inversa y cronograma aplicada a componentes aeronáuticos militares pueden ser⁷:

- a. Recibir el artículo e ingresarlo en el sistema de gestión de ingeniería inversa (rems).

⁶ Ibid., P. 18

⁷ Department Of Defense Handbook. US ARMY, *MIL-HDBK-115C* (2016). EN Appendix D. P. 64

- b. Revisar el equipo suministrado por el gobierno (GFE) y recuperar datos adicionales.
- c. Identificar/revisar datos de la prueba. validar o desarrollar procedimientos de prueba.
- d. Identificar piezas y dibujos requeridos.
- e. Auditoria de configuración física (PCA) del desensamble
- f. Desarrollar el programa y el plan de ingeniería inversa.
- g. Desarrollar los análisis dimensionales.
- h. Desarrollar dibujos nivel tres.
- i. Realiza la producibilidad y el análisis del aseguramiento de la calidad (Q/A).
- j. Dibujos de revisión y costo del prototipo con el cliente.
- k. Desarrollar la adquisición inicial para prototipo y/o partes.
- l. Recibir prototipos, inspeccionar, ensamblar, probar.
- m. Generación de reportes técnicos.

Se recomienda calcular los siguientes costos para el desarrollo de ingeniería inversa⁸:

- a. el costo de realizar proceso de ingeniería inversa se re calcula con la Ecuación 1.

Ecuación 1. Calculo del costo del proceso de ingeniería inversa

$$PII = \text{horas totales} \times \text{tasa compuesta}$$

Fuente: Department Of Defense Handbook. US ARMY, MIL-HDBK-115C (2016). EN: APPENDIX D., P.65.

- b. Costo del equipo de alquiler para análisis y prueba
- c. Costo de laboratorio (análisis de material)
- d. De laminación de tableros complejos ELEX
- e. Costo del prototipo (por lo menos costo de la unidad) x cantidad de la unidad
- f. Costo especial de herramientas (mejor estimación)
- g. Costo total estimado de ingeniería inversa

Los costos estimados de contratación se pueden desarrollar con estos ítems:

- a. Costo estimado de adquisición por unidad
- b. Cantidad de compra anual

⁸ Department Of Defense Handbook. US ARMY, MIL-HDBK-115C (2016). EN Appendix D. P. 65-66

- c. valor de compra anual de pre-ingeniería inversa, se puede calcular con la Ecuación 2.

Ecuación 2. Valor de compra anual de procesos antes de realizar la ingeniería inversa

(estimado de adquisición por unidad x cantidad de compra anual)

Fuente: Department Of Defense Handbook. US ARMY, MIL-HDBK-115C (2016).
EN: APPENDIX D., P.65.

El Ahorro anual estimado después de la ingeniería se puede calcular con la ecuación 3.

Ecuación 3, Ahorro anual de ingeniería inversa

(25% x Valor de compra anual de pre ingeniería inversa)

Fuente: Department Of Defense Handbook. US ARMY, MIL-HDBK-115C (2016).
EN: APPENDIX D., P.65.

El Valor de compra anual estimado después de la ingeniería inversa se calcula con la ecuación 4

Ecuación 4. Valor de compra anual

*(Valor de compra anual de pre ingeniería inversa
– El Ahorro anual estimado después de la ingeniería)*

Fuente: Department Of Defense Handbook. US ARMY, MIL-HDBK-115C (2016).
EN: APPENDIX D., P.65.

El Costo del primer año después de ingeniería inversa se puede obtener de la ecuación 5.

Ecuación 5. Calculo del costo del primer año de ingeniería inversa.

*(Costo total estimado para el ingeniería inversa
+ El Valor de compra anual estimado después de la ingeniería inversa)*

Fuente: Department Of Defense Handbook. US ARMY, MIL-HDBK-115C (2016).
EN: APPENDIX D., P.65.

El Costo mínimo estimado (ahorro o pérdida) sobre la vida útil estimada restante se puede calcular con la ecuación 6.

Ecuación 6. Calculo del costo mínimo sobre la vida útil estimada.

$$\begin{aligned} & (\text{Valor de compra anual de pre ingeniería inversa}) \times (\# \text{ de años}) \\ & - (\text{costo de ingeniería inversa}) \\ & + (\text{Valor de compra anual estimado después de la ingeniería inversa}) \times \\ & \qquad \qquad \qquad (\# \text{ de años}) = \end{aligned}$$

Fuente: Department Of Defense Handbook. US ARMY, MIL-HDBK-115C (2016). EN: APPENDIX D., P.65.

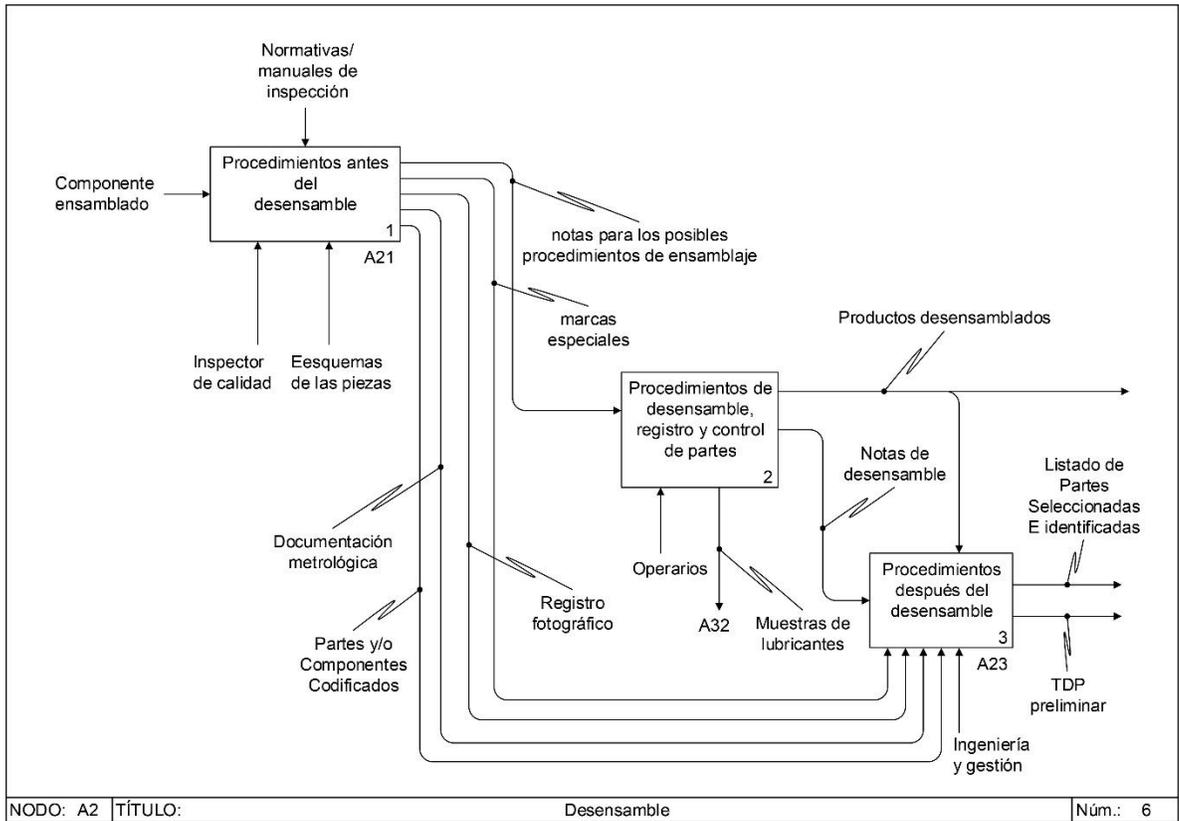
El costo del ahorro considerado por el servicio se puede estimar (Utilizando una tasa de interés del 10%) Pago mensual de la cantidad de (El Costo mínimo estimado (ahorro o pérdida) sobre la vida útil estimada) de la tabla de intereses X 12 meses X # de años.

8.3.2 Nodo A2, Desensamble

Cuando se tienen componentes aeronáuticos cuya fuente está ensamblada en una aeronave y no existe otra posibilidad de obtener piezas o información que refleje el componente candidato a ingeniería inversa es necesario desarrollar protocolos para desmontar estos componentes pues el desensamble juega un papel importante en el sentido en que al momento de hacer el despiece físico de un componente se obtiene información significativa que de otra manera no se pudiese conseguir, si bien estas piezas ya están “gastadas” y algunas dimensiones pueden no ser relevantes (en algunos casos) para un desarrollo de un TDP competitivo, se podrá tener información como tipos de lubricantes, tipos que quincallería, tolerancias, etc. A continuación, se presenta el proceso A2 gráficamente en la Figura 9⁹.

⁹ Eldessouky, Hossam and Aziz, E and El-Sayed, Development and Assessment of a Reverse Engineering Framework for Spare Parts, 2010. EN: Node A1 – Disassembly P. 36

Figura 9. Procedimientos de desensamble

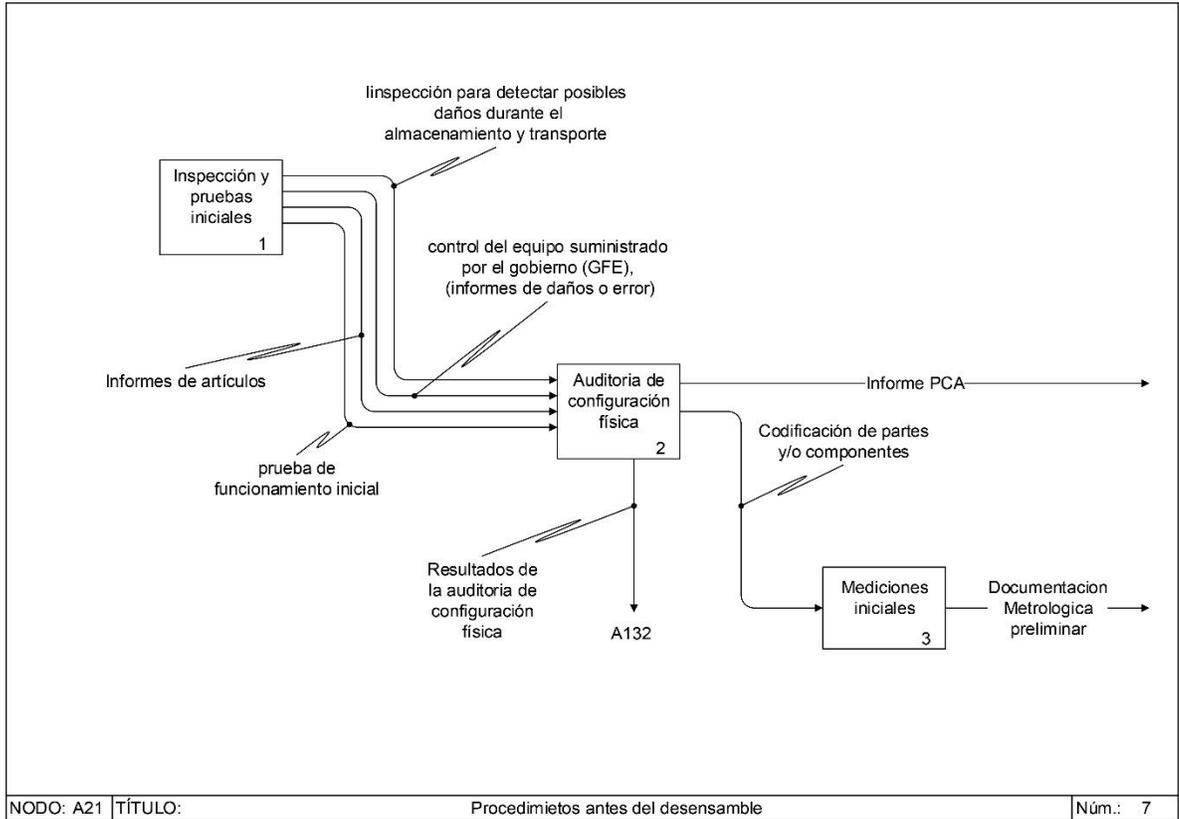


Fuente: Elaborado por los autores

8.3.2.1 Nodo A21, Procedimientos antes del desensamble

Es útil hacer un procedimiento antes del desensamble, puesto que desde allí se podrá inspeccionar si una parte sirve como candidato para ingeniería inversa, la Figura 10 detalla este procedimiento.

Figura 10. procedimientos antes del desensamble



Fuente: Elaborado por los autores

8.3.2.1.1 Nodo A211, Inspección y pruebas iniciales

Se recomienda hacer una última inspección técnica antes de desensamblar este componente, es de gran importancia reportar imperfecciones o daños que pueden tener los ensambles, debido al almacenamiento, el transporte y otros factores que podrían influir en el desarrollo efectivo de la ingeniería inversa.

Se debe realizar una prueba de funcionamiento inicial para garantizar que el elemento funcione de acuerdo con las especificaciones de rendimiento establecidas.

8.3.2.1.2 Nodo A212, Auditoria de configuración física

La auditoría de configuración física (PCA)¹⁰ es el examen formal de la versión de construcción de un elemento de configuración con su documentación técnica para establecer la línea base del producto de la configuración. Se debe llevar a cabo una auditoría de configuración funcional (FCA) para garantizar que el artículo funciona de acuerdo con las especificaciones de rendimiento establecidas.

El hardware provisto para la ingeniería inversa debe examinarse en contra de la técnica no restringida documentación disponible, como manuales, dibujos, especificaciones, etc., para asegurarse de que el hardware esté reflejado en la documentación. El hardware debe ser comparado por la uniformidad de los componentes, especialmente las piezas fabricadas. En el caso de que se descubran discrepancias o inconsistencias, el hardware debe tener prioridad sobre la documentación existente para fines de ingeniería inversa, y todas las discrepancias deben ser informadas al comando competente. A menudo, los conjuntos electrónicos usarán componentes de una clase de confiabilidad más alta y se requerirá una decisión sobre qué tiene prioridad, el hardware o la documentación existente. Esto debe hacerlo el ingeniero de la familia del proyecto con la prueba inicial del elemento durante el ciclo de adquisición.

8.3.2.1.3 Nodo A213, Mediciones iniciales

Antes del desmontaje, se deben registrar todas las dimensiones y los datos electrónicos, como los parámetros de entrada / salida, los espacios libres, los valores de torque y las dimensiones críticas del ensamblaje que no se podrían obtener después del desmontaje¹¹. En los PCB en particular, los "pads" u otra información pueden destruirse durante el desmontaje. Las mediciones deben tomarse en todas las partes móviles y su envolvente de trabajo, incluidos los ángulos de rotación, los espacios libres entre tolerancias cercanas y las dimensiones no críticas.

8.3.2.2 Nodo A22, Procedimientos de desensamble, registro y control de partes

Para el registro y control de las partes se deben Identificar pieza por pieza en un control de configuración los componentes que se encuentran en los esquemas obtenidos anteriormente en la recopilación de la información, en caso de no tener un catálogo de partes ilustrada o un documento que tenga la misma finalidad la

¹⁰ Department Of Defense Handbook. US ARMY, *MIL-HDBK-115C* (2016). EN Physical configuration audit (PCA). P. 16

¹¹ Ibid., P. 17.

realización de un control de configuración será de gran valor para este fin, las recomendaciones en el momento de desensamblar los componentes son¹²:

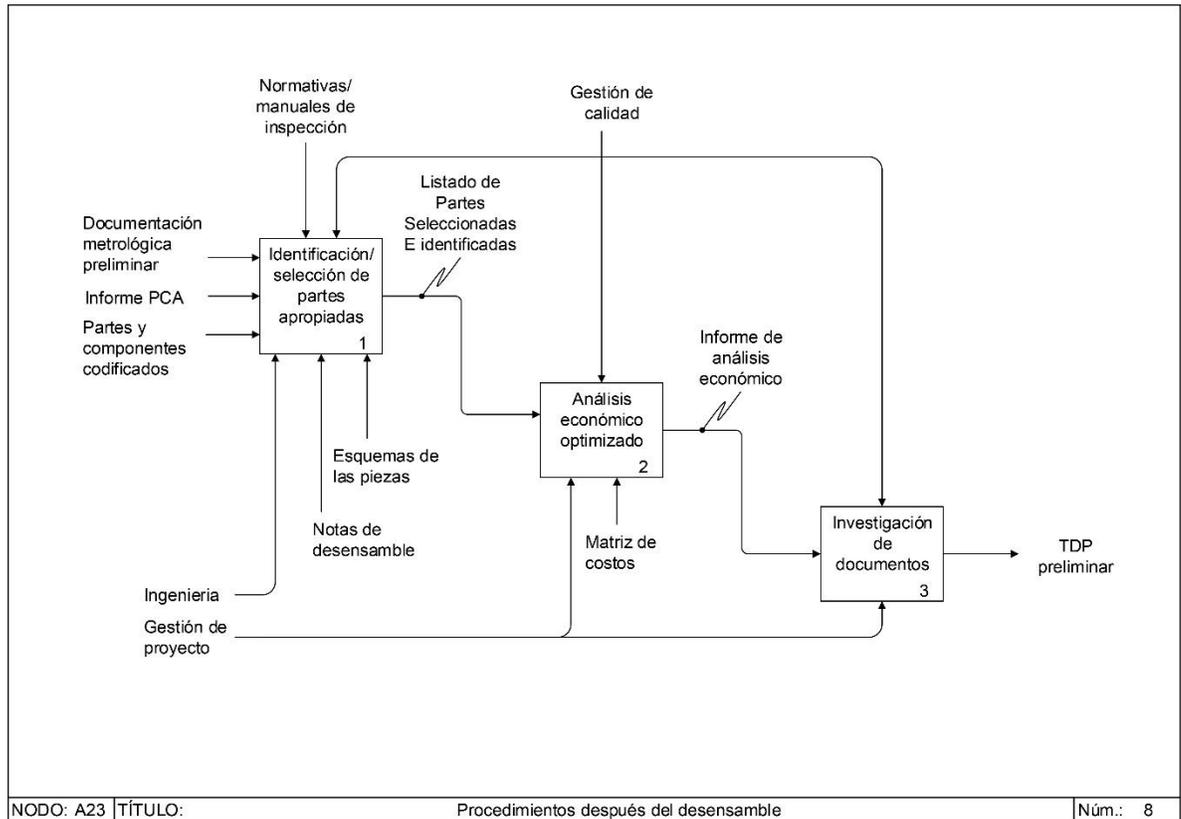
- a. Obtener una codificación que identifique cada parte, ya sea la que el fabricante original determine o la que la entidad que desarrolla la ingeniería inversa propone
- b. Examinar el componente para determinar el fabricante real, es decir, marca registrada, FSCM (código de suministro federal para fabricantes), nombre del fabricante, número de pieza, marca de patente, marca de molde, etc.
- c. ¿En qué parte está lubricado componente?
- d. buscar las marcas en los accesorios de grasa que pueden indicar los requisitos de aceite lubricante.
- e. Se deben tomar muestras de los lubricantes
- f. Los elementos que están unidos, soldados o unidos permanentemente deben tratarse como un conjunto inseparable.
- g. Cada extremo de los terminales eléctricos debe estar claramente marcado, en la mayoría de los casos en el propio cable se puede encontrar estampada esta información
- h. cree un listado de cableado eléctrico
- i. haga un registro fotográfico
- j. hacer un protocolo de etiquetado y embolsado

8.3.2.3 Nodo A23, Procedimientos después del desensamble

En los procedimientos después de hacer el desensamble de las piezas, se corroborará si la información desarrollada antes y durante el desensamble es efectiva. Esto se representa en la Figura 11

¹² Ibid., P. 36.

Figura 11. Procedimientos después del desensamble



Fuente: Elaborado por los autores

8.3.2.3.1 Nodo A231, Identificación/selección de partes apropiadas

Después del desmontaje, cada parte pieza/componente debe investigarse para identificar NSN existentes, hardware disponible comercialmente, piezas MIL-STD y piezas no estándar. Es indispensable decidir si el espécimen a ser desarrollado mediante ingeniería inversa cumple con los requisitos para ser un candidato de ingeniería inversa, o por el contrario debería usarse otro(s) componente(s) para dicho fin¹³.

¹³ Department Of Defense Handbook. US ARMY, MIL-HDBK-115C (2016). EN: Parts identification/screening (PCA). P. 17

8.3.2.3.2 Nodo A232, Análisis económico optimizado

Se debe realizar un análisis económico de todas las piezas/componentes de una sola fuente y no estándar para determinar la rentabilidad de la ingeniería inversa de estos. Todos los datos suministrados por el fabricante del componente deben ser seleccionados adecuadamente para datos de propiedad antes de proporcionarlo a la agencia / contratista que realiza la ingeniería inversa.

8.3.2.3.3 Nodo A233, Investigación de documentos

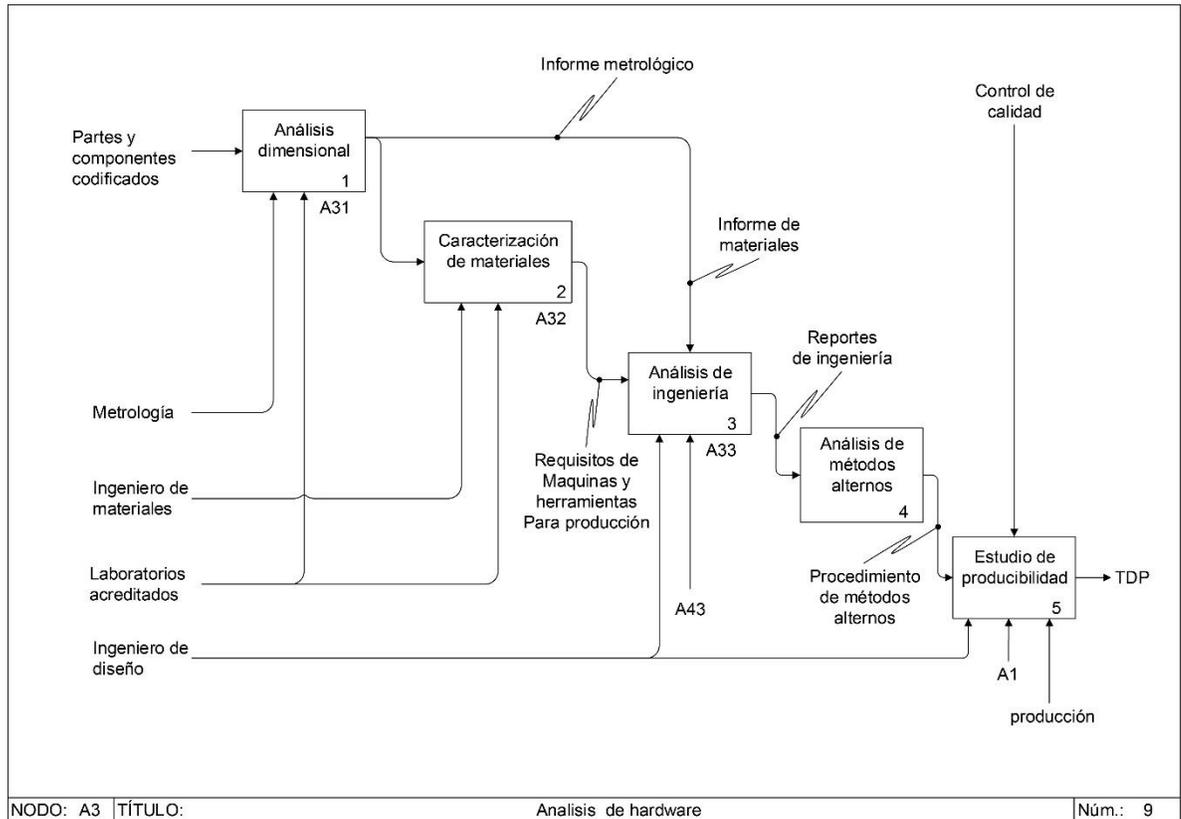
Se debe realizar una investigación sobre la existencia de especificaciones o dibujos de control de fuentes¹⁴. Podría existir un dibujo de artículo similar y un dibujo de tabulación simple podría recrearse para agregar la nueva pieza al sistema. La mayoría de los sistemas de control de configuración incluyen una lista de partes y dibujos relacionados.

8.3.3 Nodo A3, Análisis de hardware

El análisis de hardware se refiere a la comprensión del espécimen que será replicado, es donde se obtiene información relevante para la fabricación, desde la materia prima, el diseño y el método de fabricación del mismo, estas tareas se representan en la Figura 12.

¹⁴ Ibid., P. 18.

Figura 12. Análisis de hardware



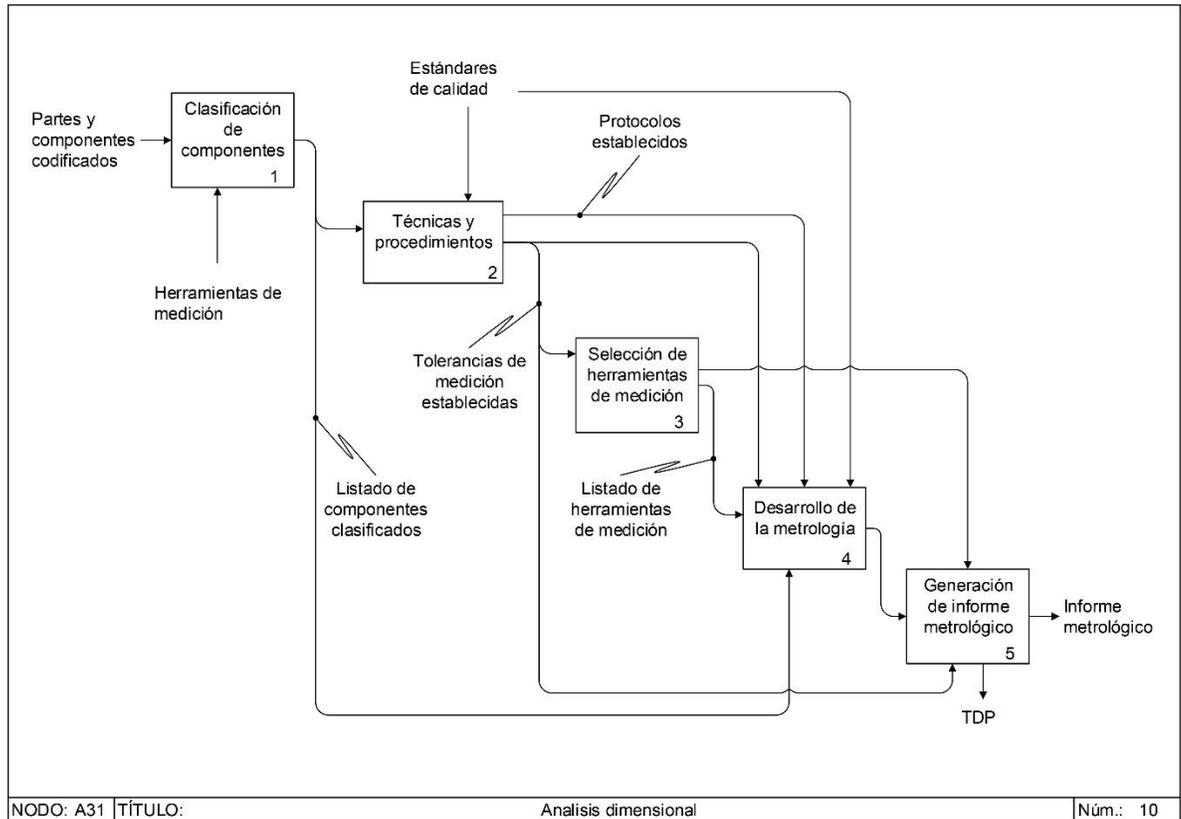
Fuente: Elaborado por los autores

8.3.3.1 Nodo A31, Análisis dimensional

Como se observa en la Figura 13, el análisis dimensional es una actividad que requiere aplicar metrología de manera efectiva arrojando información de forma y en algunos casos función, es donde se tiene información de acabados (en algunos casos). Como salida, en esta actividad se tendrá un informe de metrología el cual debe ser analizado por ingeniería para examinar si este procedimiento y datos cumplen con los requisitos que permitan continuar con un diseño asertivo¹⁵.

¹⁵ Ibid., P. 20.

Figura 13. Análisis dimensional



Fuente: Elaborado por los autores

8.3.3.1.1 Nodo A311, Clasificación de componentes

Para lograr una caracterización dimensional efectiva, en primera medida se inicia clasificándolos por categorías, se recomienda dos formas de hacerlo:

- a. Por criticidad del componente
- b. Por complejidad de la forma
- c. Por tamaño de las piezas
- d. Por la calidad requerida
- e. Por material
- f. Por método de fabricación

8.3.3.1.2 Nodo A312, Técnicas y procedimientos

Es importante desarrollar protocolos de medición con los cuales se deberán estandarizar para tener una medición efectiva, debe estar basado en la normatividad seleccionada por la empresa. Es además muy importante tener la herramienta de

medición debidamente calibrada por laboratorios especializados, estos informes de calibración nos dicen cuál es la incertidumbre de la herramienta para así saber cuál es la incertidumbre de la medición.

El ANEXO A muestra un procedimiento de medición directa avalado por el SECAD para levantamientos dimensionales. Adjunto a este documento se encuentra un software por medio de interfaz gráfico desarrollado para hacer estas ediciones de manera óptima y asertiva en el ANEXO B se desarrolló un manual de usuario de este software.

En esta función donde se especifican las técnicas y procedimientos se debe tener en cuenta un punto fundamental en el momento de escoger una tolerancia la cual está determinada por la precisión requerida y afectada por la varianza y las fluctuaciones en la medición, para tener un mejor entendimiento de este tema el anexo A se refiere a las técnicas y procedimientos que desarrollan esta temática.

Dependiendo de la criticidad de la parte candidata a ingeniería inversa se debe escoger que tan estricta debe ser la tolerancia, en ocasiones se puede usar el concepto de criticidad parcial, donde se establece que solo una medida del componente es crítica y el resto puede tener una tolerancia moderada. Esto es sumamente importante para establecer los costos del proyecto, ya que tolerancias más estrictas requerirán mayor presupuesto debido a la tecnología requerida.

Si analizamos el punto de vista del desarrollo de la tecnología en cuanto a precisión de fabricación, esta ha tenido un altísimo desarrollo y es en este punto donde se requiere el criterio y la experiencia del ingeniero para determinar la tolerancia adecuada para compensar por una parte la precisión y por otra parte la trabajabilidad.

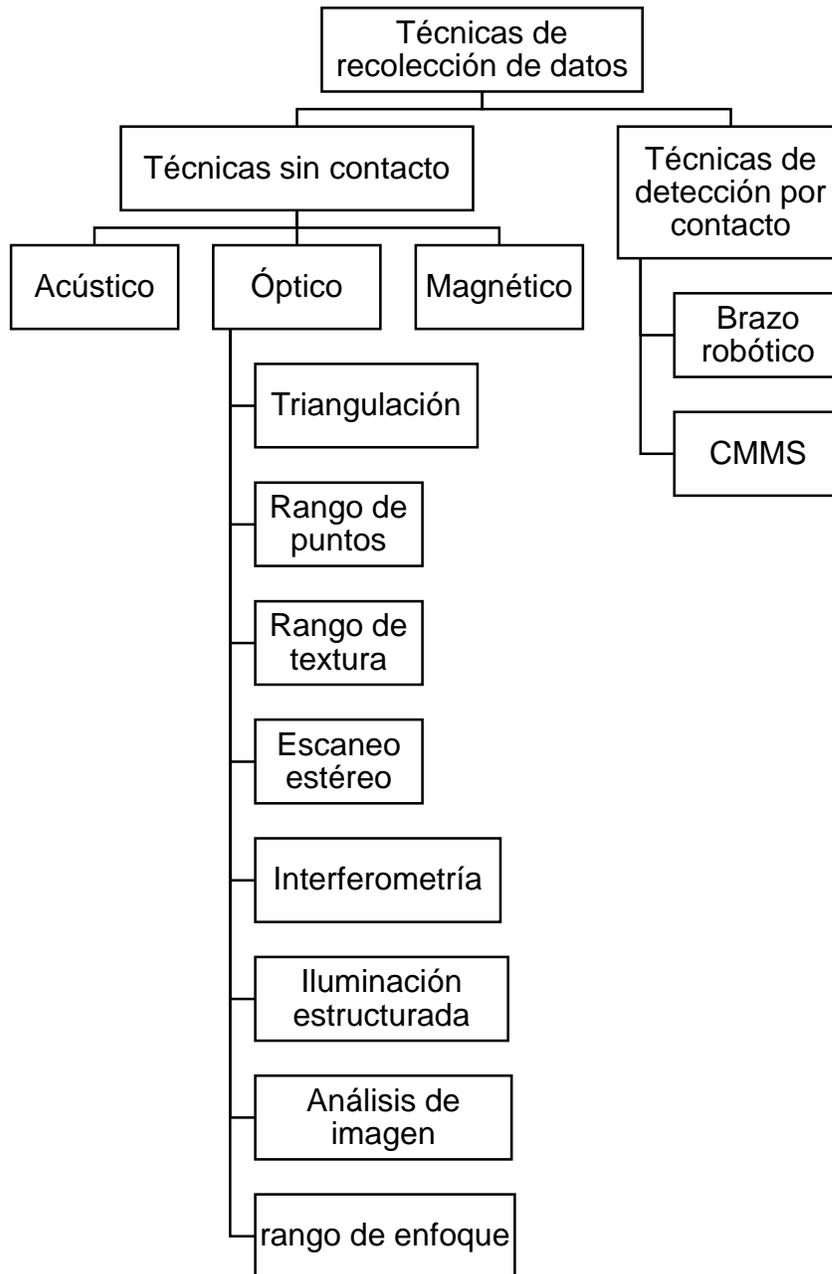
Otro punto importante que se debe tener en cuenta (en la medición directa y en las técnicas de toma de medidas por contacto) es la rigidez del componente pues elementos de caucho que tienen un comportamiento elástico podrían tender a generar errores al momento de medir dicha geometría. Por esto se recomienda, considerar utilizar herramientas de medición que no tengan contacto, como por ejemplo el escaneo 3d. de no ser posible es importante basarse en prácticas estándar industriales, conocimiento experimental de los técnicos e ingenieros y/o en el conocimiento corporativo.

8.3.3.1.3 Nodo A313, Selección de herramientas de medición

La selección de herramientas de medición se deberá desarrollar basado en el conocimiento de un grupo interdisciplinar en la cual se debería abordar desde varios puntos de vista, como los son, la criticidad de las partes, el tamaño de los especímenes, los costos, la complejidad, los costos, la logística, la resolución de la

herramienta, la precisión, la calibración, el personal calificado, entre otros. En la Figura 14 se puede observar todo un catálogo de tecnologías de medición, las cuales se deben considerar de acuerdo a los requisitos nombrados anteriormente.

Figura 14. Técnicas de recolección de datos de medición



Fuente: WANG, Wewo. Reverse engineering, technology of reinvention, New York, Taylor and Francis Group, 2011, P.19, Modificado por el autor

8.3.3.1.4 Nodo A314, Desarrollo de la metrología

Es importante tener conciencia que existen muchos factores que determinan el resultado de una medida, y que la metrología es un campo del conocimiento bastante práctico y que en el momento de medir intervienen muchos aspectos como son:

- a. La técnica de quien ejecuta la medición, pues se requiere haber hecho mucha práctica para lograr una medición certera, eficiente y asertiva, pues contrario a la creencia cotidiana esta actividad no solo se limita a ubicar determinada herramienta de medición en una parte del espécimen sino hay que, si no hay que saber hacerlo de la manera correcta, desde como tomar la herramienta, hasta las condiciones bajo las que se hacen. Es importante estar actualizándose y capacitándose.
- b. Es necesario medir mínimo 5 veces la misma longitud, pero tomada en diferentes puntos para tener una conclusión de la medida con menor cantidad de errores.
- c. Es importante interpretar los resultados de la medición, pues este depende si es necesario repetir la medición o cambiar la herramienta de medición.
- d. Al final del proceso es obligatorio documentar toda la medición, realizar los cálculos de incertidumbre pertinentes y adjuntar la base de datos y las condiciones de las herramientas.

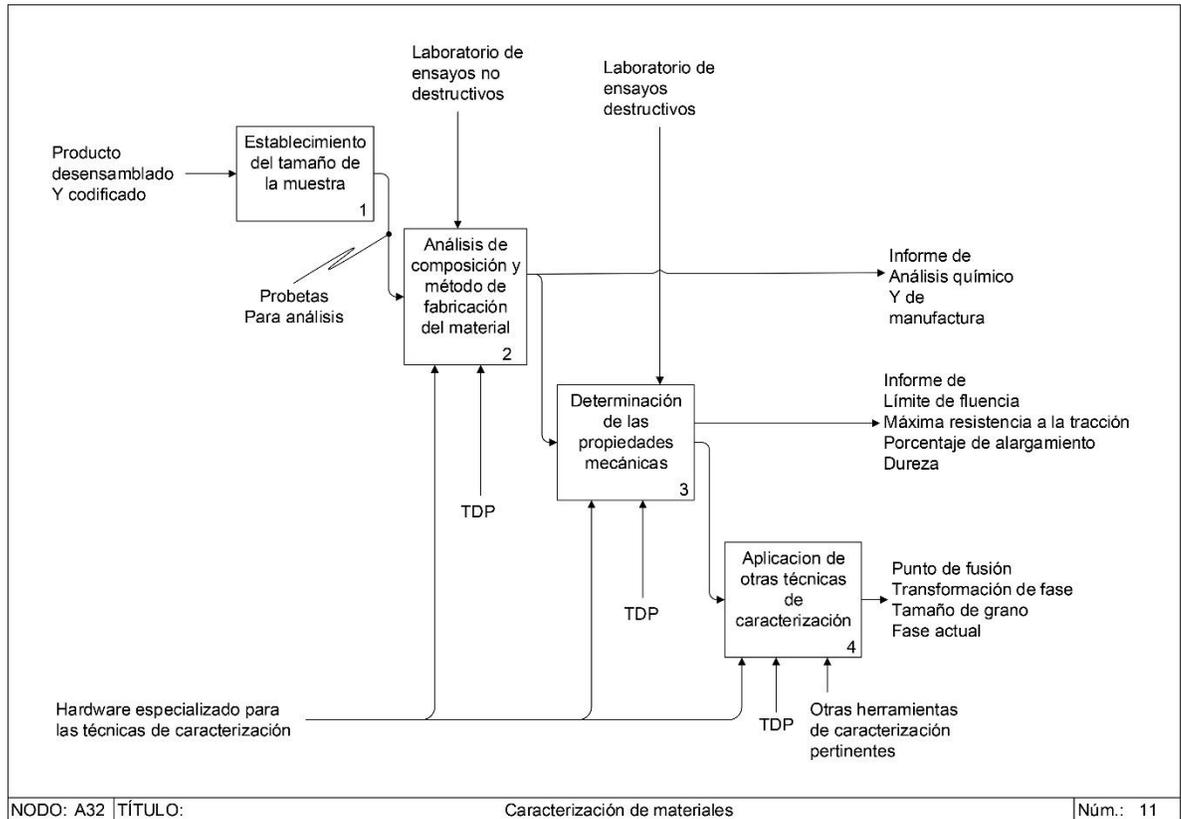
8.3.3.1.5 Generación de informe metrológico

El informe metrológico será parte de las actividades propuestas en el manual de calidad de la empresa que desarrolle la ingeniería inversa. Este desarrollará criterios de aceptabilidad de incertidumbre debido a la criticidad del componente. Por otro lado, si es necesario obtener un proveedor para el proceso de metrología, el informe metrológico también deberá tener sus criterios de aceptación: en este caso la empresa envía los puntos que se requiera medir para así evaluar el informe metrológico.

8.3.3.2 Nodo A32, Caracterización de materiales

De acuerdo a la categorización de las partes desarrollado en la actividad A311 se establece el tipo de análisis que se podrá hacer a las piezas, si son metálicas, en materiales compuestos, material polimérico etc. Lo importante es que este análisis se desarrolle con el criterio adecuado pues esta actividad tiene una importante repercusión en el momento de la fabricación y validación. Si es necesario categorizar de nuevo estas partes se deberá hacer si así se requiere. Este nodo A32 se detalla en la Figura 15.

Figura 15. Caracterización de materiales



Fuente: Elaborado por los autores

8.3.3.2.1 Nodo A321, Establecimiento del tamaño de la muestra

De acuerdo con la experiencia de los ingenieros participantes del proyecto de ingeniería inversa y/o de la empresa contratista donde se desea hacer la caracterización de los materiales, se decide que técnica de caracterización se utilizará y por ende que tamaño de muestra se necesita, en algunos casos se utilizará un tamaño pequeño como en otros se ha de necesitar toda la pieza, existirá alguna ocasión donde se ha de necesitar varias piezas, del mismo y/o diferente lote. La selección del tamaño de muestra, al igual que la caracterización dimensional dependerá de la tecnología disponible y los recursos disponibles. De acuerdo con la criticidad de la pieza se puede obtener como conclusión la inviabilidad de un proyecto de ingeniería inversa¹⁶.

¹⁶ WANG, Wewo. Reverse engineering, technology of reinvention, New York, Taylor and Francis Group, 2011, EN: Material Identification and Process Verification. P. 145.

Algunas tecnologías que disponibles para caracterización de materiales son:

- a. Espectroscopía de masas.
- b. Espectroscopía de emisión atómica de plasma acoplado inductivamente.
- c. Interacción y emisión de muestras electrónicas.
- d. Análisis de rayos X.

8.3.3.2.2 Nodo A321, Análisis de composición

Esta actividad tiene como finalidad seleccionar identificar el material con el que está fabricado el producto, de acuerdo con la técnica de caracterización seleccionada es posible conocer que materiales podemos tratar¹⁷. Más adelante en la actividad A42 podremos seleccionar el material adecuado que supla materiales que quizás estén obsoletos en el mercado, o cambiar el material requerido en el caso donde sea pertinente hacer una mejora de este.

8.3.3.2.3 Nodo A322, Determinación de propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas pueden obtenerse en el mismo informe del análisis de composición (dependiendo de la técnica utilizada) pues debido a la organización de las partículas de este material podremos obtener información de fabricación como, dirección de grano del material, tratamientos térmicos o micro compactación entre otras características. Este estudio deberá completarse con ensayos que arrojen características mecánicas como, dureza, límite de fluencia, Porcentaje de elongación, máxima resistencia a la tracción y demás características pertinentes requeridas para la comprensión del diseño y el material.

8.3.3.2.4 Nodo A323, Aplicación de otras técnicas de caracterización

Existen otras técnicas especiales de caracterización donde intervienen por una parte las propiedades del material que complementan la determinación de propiedades mecánicas desarrolladas en la actividad anterior, como son el punto de fusión, transformación de fase, el tamaño de grano y la fase actual. También es necesario obtener las características de acabado y los recubrimientos especiales

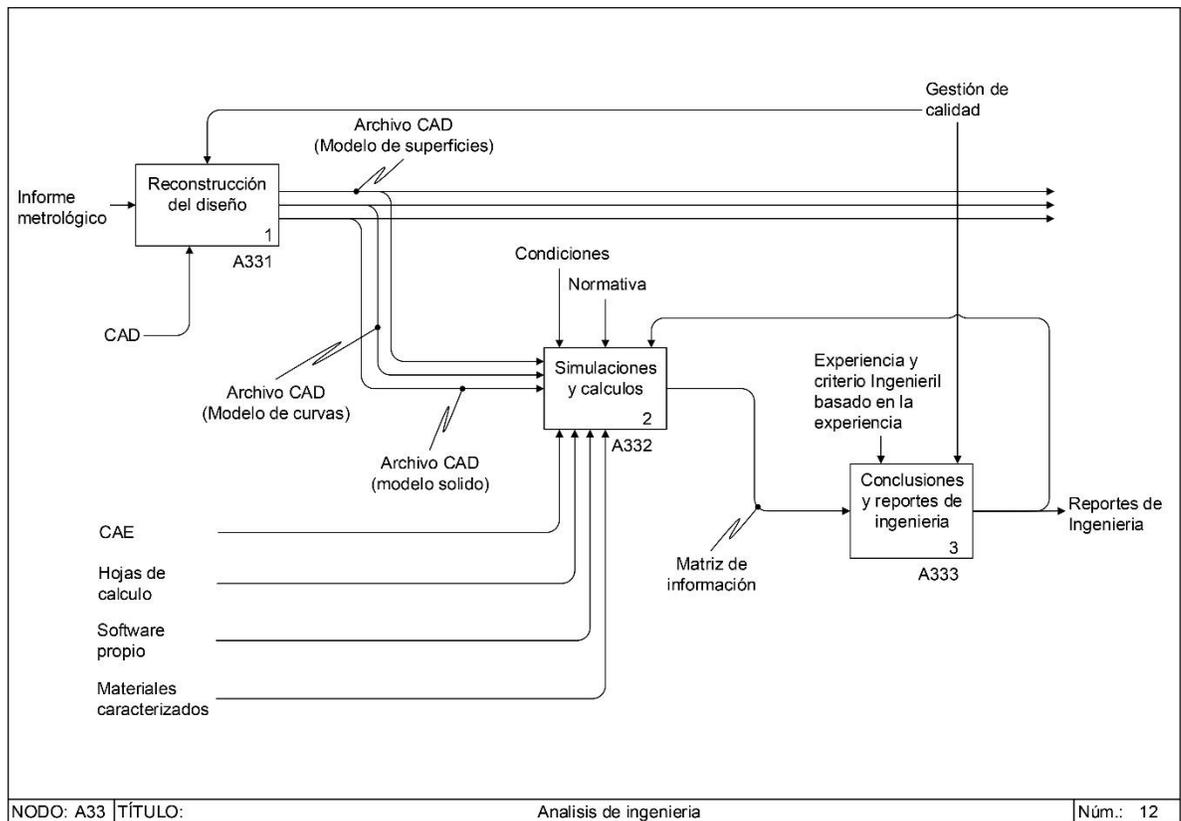
¹⁷ Eldessouky, Hossam and Aziz, E and El-Sayed, Development and Assessment of a Reverse Engineering Framework for Spare Parts, 2010. EN: Composition Analysis, P. 56

como el cromo duro u otras técnicas que dependen del material y la criticidad de los componentes.

8.3.3.3 Nodo A33, Análisis de ingeniería

La actividad de análisis representada gráficamente en la Figura 16, hace referencia a la observación que se le da a la información obtenida en la caracterización del componente en todos los puntos de vista hasta este punto desarrollados. En este punto se reconstruye el diseño, se calcula, se simula, y se establecen conceptos preliminares para su posterior mejora y desarrollo.

Figura 16. Análisis de ingeniería



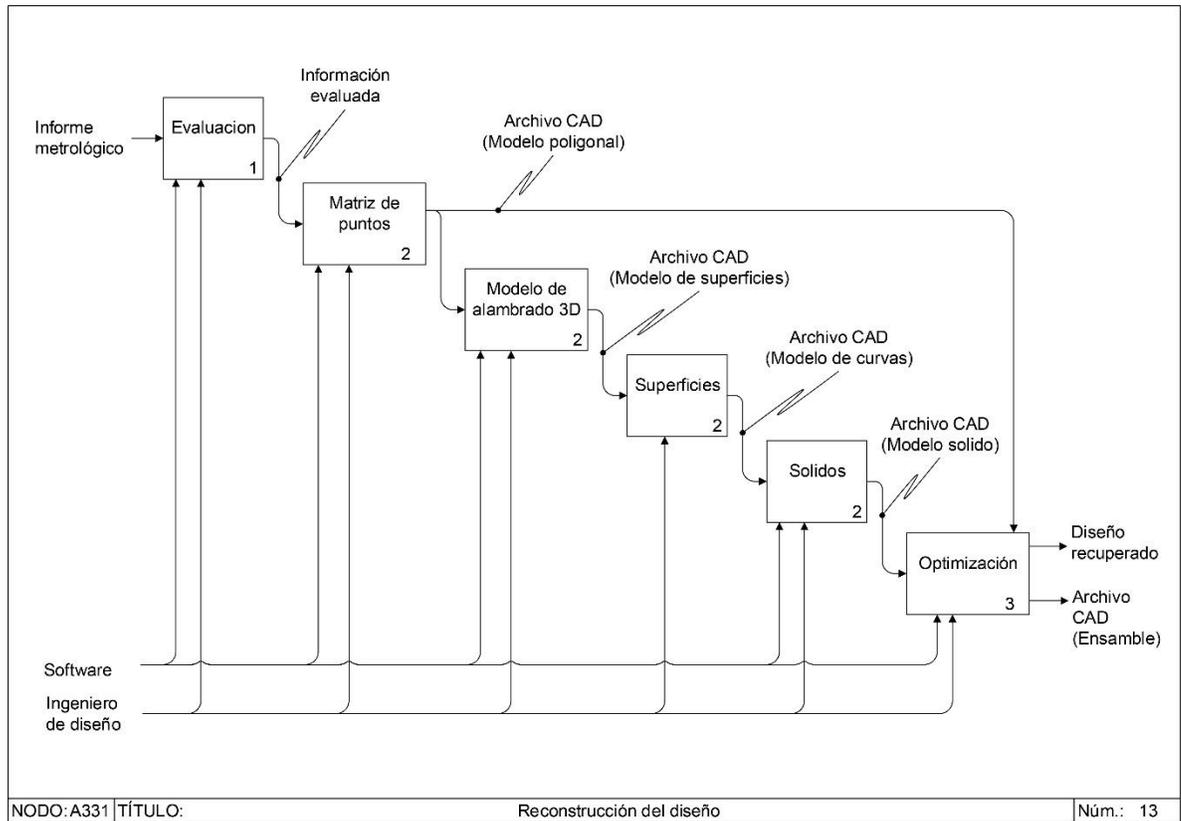
Fuente: Elaborado por los autores

8.3.3.3.1 Nodo A331, Reconstrucción del diseño

La reconstrucción del diseño detallada en la Figura 17, se refiere a la producción digital basada en los informes metrológicos, y/o información del componente (OEM). Como salidas de esta actividad se tiene información disponible

para fabricación y control de calidad. La Figura 17 muestra un diagrama de flujo para la evaluación y optimización del diseño reconstruido¹⁸. El diagrama de flujo de la Figura 18 muestra cómo se evalúa la información y como se traduce a otros modelos de archivo dependiendo de la necesidad o fase de diseño que se encuentre.

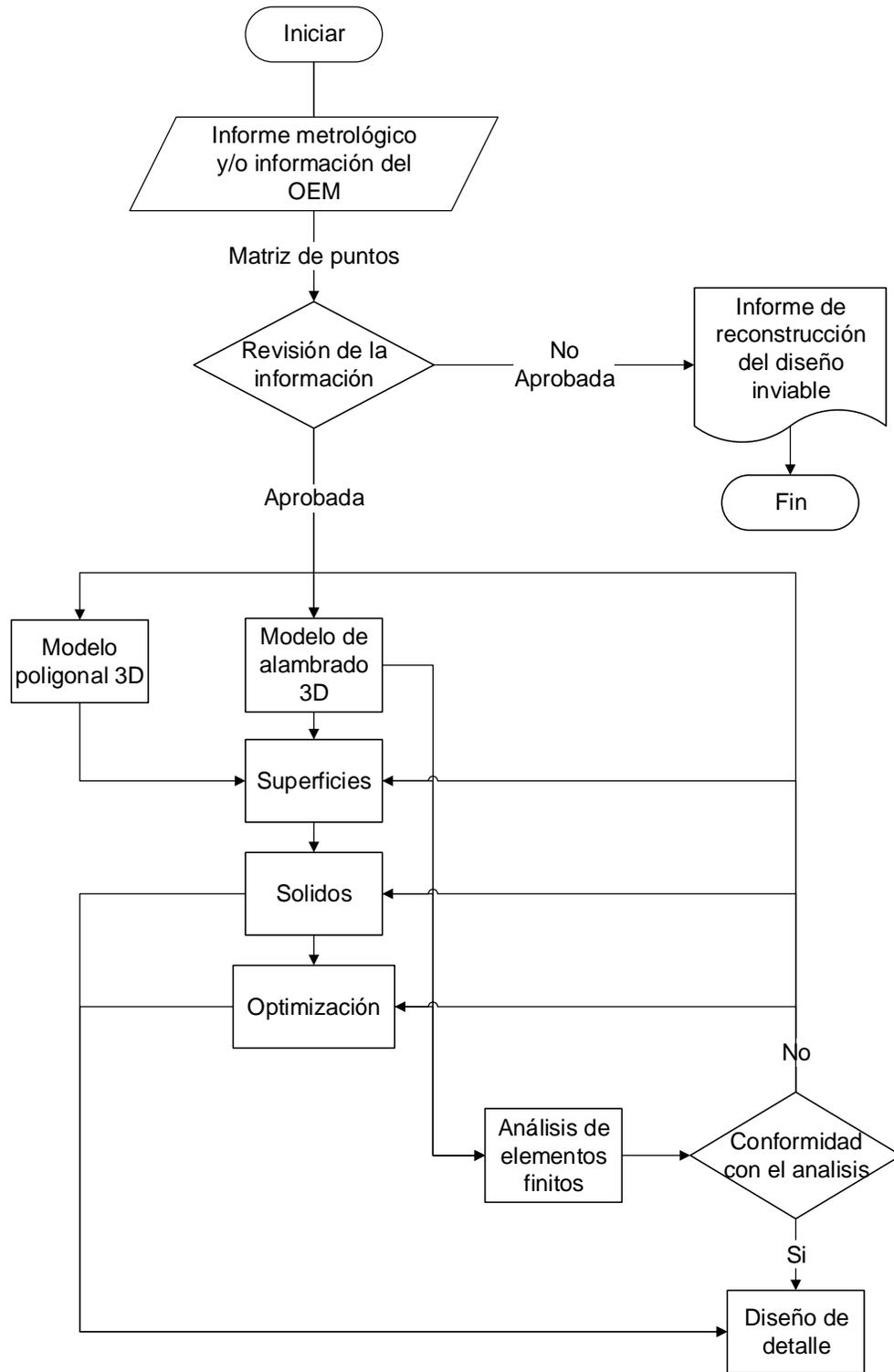
Figura 17. Reconstrucción del diseño



Fuente: Elaborado por los autores

¹⁸ Eldessouky, Hossam and Aziz, E and El-Sayed, Development and Assessment of a Reverse Engineering Framework for Spare Parts, 2010. EN: Node A3 Design Recovery P. 40

Figura 18. Diagrama de flujo de la evaluación de la información metrológica



Fuente: Elaborado por los autores

8.3.3.3.1.1 Nodo A3311, Evaluación

De acuerdo con Eldessoky, Hossman y Azis¹⁹ los informes metrológicos, se debe evaluar la criticidad de los especímenes pues desde allí depende si la información producto de un levantamiento dimensional es válida o no, es importante estar atentos a las características con que estos datos fueron adquiridos, es decir si una pieza con dimensiones menores a 10 milímetros fueron tomadas con un flexómetro seguramente la precisión que la pieza requiere, no se adapta a las necesidades y seguramente tendrá un alto margen de error. Si bien, en la etapa ejecutiva del análisis de evaluaron las herramientas necesarias para determinada pieza aeronáutica en función de factores como la criticidad del producto, las dimensiones generales y demás, se debe hacer en este punto un segundo filtro para asegurar que dicha pieza tendrá una imagen muy cercana al componente original.

8.3.3.3.1.2 Nodo A3312, Matriz de puntos

La matriz de puntos se puede observar desde distintos puntos de vista, bien sea producto de un proceso de escaneo 3d y un levantamiento dimensional con herramientas análogas. En muy pocas ocasiones este nivel de información es válida para desarrollar la ingeniería inversa a un nivel competitivo, debido a que es necesario utilizar un software CAD que traduzca esta información. La salida de esta actividad se concreta como un modelo poligonal, el formato internacional para este archivo es el STL

Para la matriz de puntos producto de un escaneo 3d el tratamiento se le da directamente con el software de ingeniería inversa que la entidad que desarrolla el proceso tenga para dicho fin. En este punto de debe seleccionar la información relevante para el desarrollo del producto, un ejemplo de la información que no querríamos reflejarlo en un modelo CAD serían las marcas de estampado, las imperfecciones por el polvo u otros agentes, la corrosión etc. Es de aclarar que los escáneres de última generación permiten tomar medidas muy pequeñas y a medida que la tecnología en este campo avanza se puede tener información más certera para tareas de ingeniería inversa. En este punto también se puede obtener

¹⁹ Eldessouky, Hossam and Aziz, E and El-Sayed, Development and Assessment of a Reverse Engineering Framework for Spare Parts, 2010. EN: Node A3 Design Recovery P. 40

información referente a los acabados, como por ejemplo la rugosidad, donde esta forma es irregular a niveles muy pequeños se debe escoger con certeza que dimensión tomar para realizar una fabricación optima, en ocasiones se deja más material para posteriormente hacer un acabado en una segunda etapa y devastar material en el proceso.

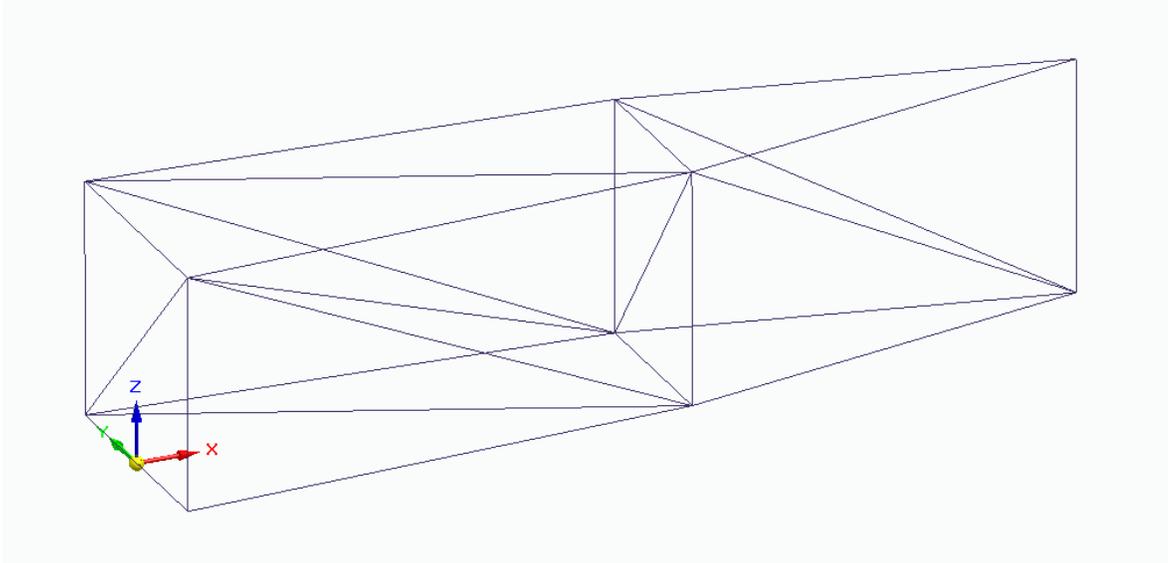
En cuanto al levantamiento dimensional análogo, se entiende que la matriz de puntos está identificada como la designación de cada medida, en determinado punto, de acuerdo con el software desarrollado en este proyecto de investigación las salidas pueden referirse a valores de, longitudes, diámetros, ángulos, chaflanes, pasos de rosca etc. Existen técnicas de optimización de para generar modelos dentro de los cuales se puede tener el control del mismo, por ejemplo, si se usa el software desarrollado en este proyecto, se puede tener la opción como salida, una matriz de puntos generada desde Matlab a Microsoft Excel, en los programas de diseño existe la opción de enlazar las casillas de las medidas que se ingresan en el modelado. Así que si es necesario hacer de nuevo un levantamiento dimensional solamente será necesario modificar las medidas en el software y reemplazar el archivo de exportado en Microsoft Excel y así automáticamente el modelo hecho en el software de diseño asistido por computador, se actualizará evitando reprocesos.

8.3.3.3.1.3 Nodo A3313, Modelo de alambrado 3D

El Modelo de alambrado 3D es el producto de la unión de varias curvas (bocetos) que siguen determinadas curvas características de la pieza, en ocasiones estas alambrado es indispensable para el desarrollo de los análisis de elementos finitos (no confundir con el enmallado que se desarrolla en este proceso), de acuerdo con el ingeniero que analiza estos productos se puede hacer uno u otro desarrollo del análisis, también estas mallas sirven como entradas para desarrollar superficies. La imagen que se ve a continuación muestra las líneas que rigen el modelado CAD de una aeronave.

Un caso de estudio que puede darse puede ser en el desarrollo de estructura metálica, donde se entrega al ingeniero que analiza estructuralmente el producto las líneas que representan cada elemento estructural y posteriormente en el programa de análisis de elementos finitos se le asigna el perfil correspondiente. Es importante aclarar que esta estructura debe tener puntos (nodos) bien definidos, debido a que de esto depende del éxito del análisis futuro. En la Imagen 1 se representa una estructura de “tailboom” hecha en perfil tubular de acero y que servirá como modelo de análisis estructural en elementos finitos

Imagen 1 Modelo de alambrado de un "Tailboom" genérico de una aeronave de ala fija



Fuente: Elaborado por los autores

8.3.3.3.1.4 Nodo A3314, Superficies

Las superficies se refieren a representaciones geométricas que no tienen espesor y/o material, en el diseño de ingeniería son los que se anteponen al desarrollo de los sólidos, en ocasiones al igual que el modelo alambrado tienen como posible salida, el análisis de elementos finitos. Eso depende del método de análisis que los ingenieros utilicen para dicha tarea.

8.3.3.3.1.5 Nodo A3315, Sólidos

El diseño CAD como información de esta actividad, se refiere a un modelo detallado de las especificaciones, es el modelo que se utilizará en el diseño de detalle, en ocasiones este modelo es demasiado complejo para utilizarlo en elementos finitos, y los ingenieros de diseño prefieren no usarlo debido a que es mejor tener el control de algunas características del modelo directamente en un software especializado. Desde este punto ya se podrá generar los planos nivel 3 que se explican en el Nodo A43.

Con este modelo se puede tener información cercana de masa, volumen, área, centro de masa, centro de volumen, momentos de inercia, desarrollo de láminas metálicas o de compuestos, entre otros.

8.3.3.3.1.6 Nodo A3312, Optimización

Este punto de optimización se refiere a dos puntos de vista a la generación del modelo CAD y al diseño de la pieza como tal.

El diseño CAD puede tener imperfecciones debido a la mala parametrización de las operaciones, es de importancia que el ingeniero que desarrolle esta actividad tenga un criterio basado en la experiencia de cómo se comporta el software con determinadas líneas y puntos de control.

Por otro lado, el diseño de la pieza podrá tener una mejora de la geometría para optimizar el rendimiento en el caso que sea necesario, es importante resaltar que la optimización es un proceso iterativo y es sumamente importante la retroalimentación del departamento de cálculos. Así se podrá obtener diseños modificados, con mejores prestaciones. Este punto de vista se ha desarrollado en los últimos años con el aumento de la latencia y arquitectura en general de los computadores con el tema del diseño generativo, que, aunque sea parte de la ingeniería directa, se podrá utilizar en este punto para desarrollar productos aeronáuticos competitivos en relación con el mercado en general.

8.3.3.3.2 Nodo A332, Simulaciones y cálculos

Los cálculos son un punto de inflexión en el momento de la ingeniería inversa pues son los que, validas, por una parte, el diseño para su posterior fabricación y por otra parte la certificación. Esta actividad está limitada a la capacidad instalada de la empresa y el talento humano. En el análisis económico funcional (función A1) se debe tener en cuenta este punto, pues de esto depende el éxito del proyecto. Si bien existe la posibilidad de certificar una parte aeronáutica por similitud, es decir demostrando que la pieza es idéntica en material, forma, método de fabricación, tratamiento y otros acabados, se deberá en muchos casos desarrollar análisis matemáticos y/o simulaciones para demostrar la funcionalidad. También las simulaciones y cálculos pueden ser un único método de certificación en entidades estadounidenses, por ejemplo, pero en Colombia, de acuerdo a la criticidad de la pieza se exige el camino de la similitud, los ensayos y cálculos.

8.3.3.3.3 Nodo A333, Conclusiones y reportes de ingeniería

Esta actividad tiene como salida los reportes de ingeniería que se considere pertinente de acuerdo a los análisis hechos. Inicialmente se analizan los resultados de los cálculos de ingeniería y si hay problemas se debe buscar la raíz de los mismos, que puede ser, el espécimen, la metrología, la reconstrucción del diseño o las simulaciones y cálculos. De estas conclusiones se derivan varias decisiones las cuales afectaran la manufactura de las partes aeronáuticas.

Si las conclusiones son positivas se desarrolla a continuación el reporte de ingeniería de acuerdo a los estándares de la empresa y se procede al diseño detallado.

8.3.3.4 Nodo A34, Análisis de métodos alternos

La tarea que se esté desarrolla en este momento se refiere a las posibles metodologías que puedan suplir características en el desarrollo del proyecto, desde el punto de vista de la mejora y/u optimización del diseño, la fabricación, la producción y/o la certificación. La salida de esta actividad es la documentación de procedimientos de los nuevos procesos de los métodos alternos aquí desarrollados.

8.3.3.5 Nodo A35, Estudio de producibilidad

A partir de la información producida a partir del análisis del hardware que se ha obtenido hasta este punto, se desarrolla el estudio de producibilidad que tiene como salida la validación y aprobación de un producto, como prototipo, en esta fase se establece de manera detallada los procesos de manufactura y se determina que la capacidad instalada cumpla con los requisitos para dicho fin. Si el estudio de producibilidad da como resultado la viabilidad de continuar con el proyecto, se procede a la alimentación del paquete de datos técnico (TDP)²⁰.

En este momento del proyecto se hace un análisis de manera preliminar de cómo se realizará la fabricación del componente con el fin de acercarse de manera idéntica al componente OEM, en forma, material y rendimiento. También establece un acercamiento a los proveedores de materiales o servicios que se requieran para llevar a cabo la manufactura.

8.3.4 Nodo A4, Diseño y desarrollo

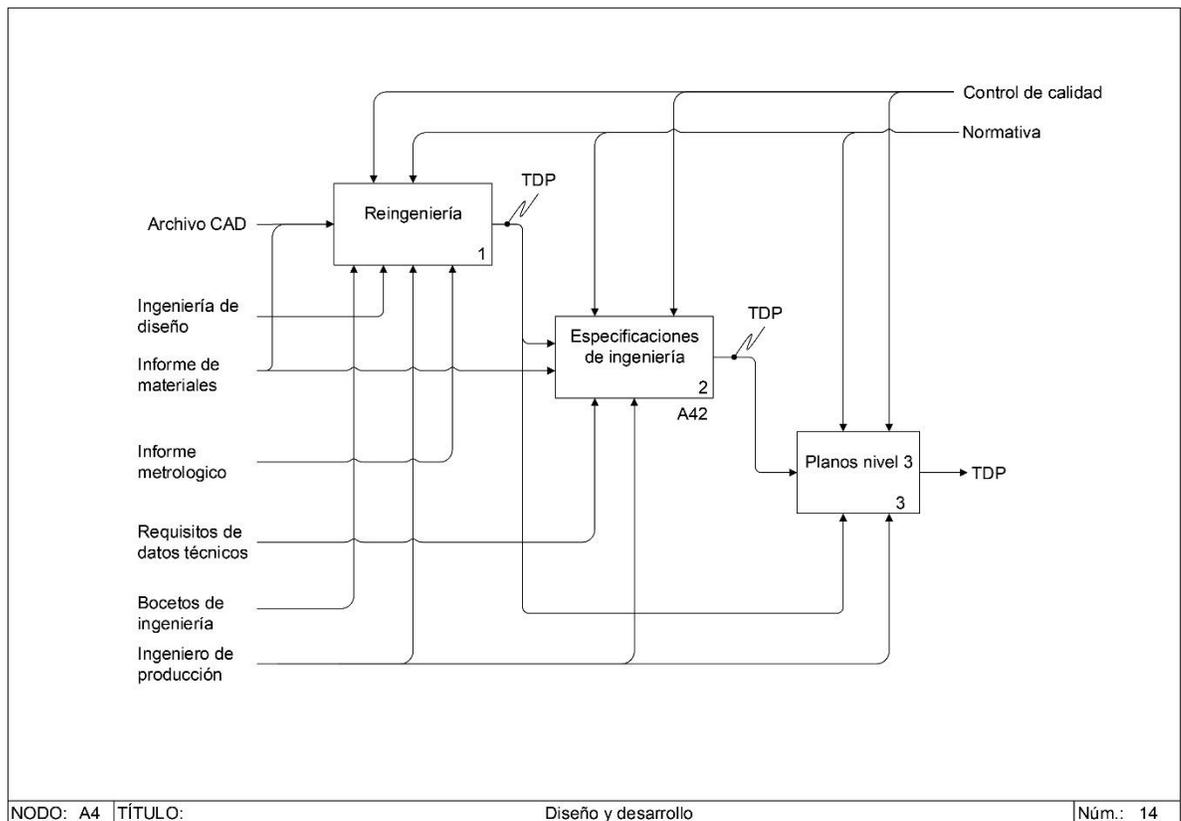
De acuerdo con los estándares de calidad AS9100²¹ se recomienda para las empresas productoras de partes aeronáuticas y aeroespaciales, tener una etapa de diseño y desarrollo, en el cual se desarrolle el diseño detallado de los componentes a partir de la información avanzada hasta el momento, es en este punto donde se puede pensar en hacer mejoras al producto, a partir del proceso de reingeniería y un desarrollo en el momento de fabricar, pues el éxito de los procesos de ingeniería

²⁰ Department Of Defense Handbook. US ARMY, *MIL-HDBK-115C* (2016). EN: Parts identification/screening (PCA). P. 29

²¹ SAE International. (2016-09). Sistemas de gestión de calidad - Requisitos para las organizaciones de aviación, espacio y defensa. AENOR.

inversa, no solo dependen de la caracterización geométrica o de materiales, sino que también en igual medida de la fabricación y es en esta fase donde se desarrollan los posibles conceptos de ingeniería para hacerlo, caber resaltar que el diseño de detalle no termina sino hasta cuando el prototipo y la producción están avalados, así pues, se deberá considerar que este proceso es iterativo y que para llegar al diseño congelado del producto se puede llegar a reflejar incluso en una segundo (o posterior) lote de fabricación. La Figura 19 muestra esta información de manera más específica.

Figura 19. Diseño y desarrollo



Fuente: Elaborado por los autores

8.3.4.1 Nodo A41, Reingeniería

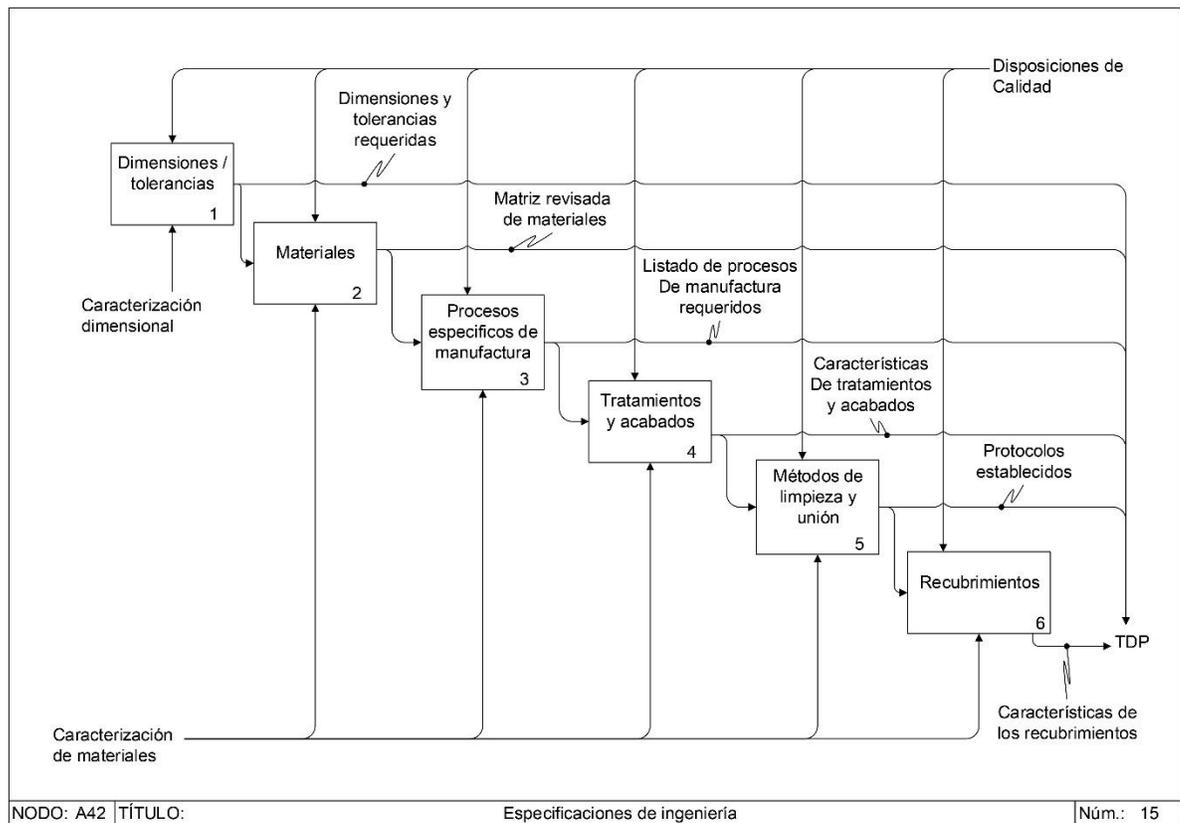
En el proceso de calificación de un componente candidato a PMA se deberá demostrar que el componente aeronáutico cumple con igual o mayor desempeño

que la pieza original²² y es desde este punto de vista donde se puede obtener la reevaluación del concepto de un componente, en cuanto a la estructura, el material el peso, el método de fabricación etc. también es posible hacer esta reingeniería en los procesos que el fabricante utilizó para desarrollar el componente.

8.3.4.2 Nodo A42, Especificaciones de ingeniería

Como se denota en la Figura 20, las especificaciones de ingeniería desarrollan conceptos que se toman a partir de la forma y las características de la pieza, es decir, a partir de las especificaciones observadas en los manuales, en las piezas físicas, en los reportes de metrología y en los reportes de análisis materiales para denotar que tipo de fabricación se requiere para su posterior estudio de producibilidad.

Figura 20. Especificaciones de ingeniería



Fuente: Elaborado por los autores

²² FAA. (2014). 8110.42D Parts Manufacturer Approval Procedures, P.1

8.3.4.2.1 Nodo A421, Dimensiones y tolerancias

De acuerdo con Wewo Wang²³, Una de los conceptos principales que se deben abordar con prioridad es el de las tolerancias, puesto que una tolerancia más estricta generalmente conlleva mayores costos de fabricación. A menudo se permite que las tolerancias en dimensiones no críticas sean razonablemente liberales para reducir los costos de fabricación. En ingeniería inversa, la determinación de dimensiones no críticas se basa en la consideración de ajuste, forma y función.

Por ejemplo, la tolerancia requerida para un rodamiento depende de sus grados. El Comité de Ingeniería de Rodamientos Anulares (ABEC) de la Asociación de Fabricantes de Rodamientos Antifricción (AFBMA) ha establecido cuatro grados principales de precisión para los rodamientos de bolas: ABEC grados 1, 5, 7 y 9. ABEC 1 es un estándar para la mayoría de las aplicaciones normales. Los grados más altos requieren progresivamente tolerancias más finas. Para orificios de rodamientos entre 35 y 55 mm, una tolerancia de 0.0000 a -0.0005 pulg. Es suficiente para ABEC grado 1, mientras que se requiere 0.00000 a -0.00010 pulg. Para ABEC grado 9.

Como se mencionó en el punto 8.3.3.1.2 se debe equilibrar la criticidad y las dimensiones, versus la tecnología disponible para fabricación. Esto depende de en términos generales del presupuesto

8.3.4.2.2 Nodo A422, Materiales

De acuerdo con el manual militar 115C²⁴, los materiales especificados deben ser revisados para impacto en la disponibilidad, el costo, la producibilidad y la función de la pieza. En algunos casos si las piezas son antiguas, los materiales pueden no estar disponibles en el mercado por ende se debe especificar una gama de materiales equivalentes en intensidad al material que se utilizará en el prototipo para permitir a los licitantes estimar los costos de fabricación en función de su mejor proceso interno.

²³ WANG, W. (2011). Reverse engineering, technology of reinvention. New York: Taylor and Francis Group. EN,2.4. Part Tolerance, P.49

²⁴ Department Of Defense Handbook. US ARMY, *MIL-HDBK-115C* (2016). EN: 5.26.2.2 Materials. P. 29

8.3.4.2.3 Nodo A423, Procesos específicos de manufactura.

Esta tarea pretende establecer los procesos de fabricación que dependen inicialmente del material, el tipo de componente y la criticidad del mismo, es importante establecer documentos que evidencien la necesidad de utilizar uno u otro método, esto viene afectado por los costos y disponibilidad tecnológica²⁵. La salida de esta actividad es preliminar debido a que en el Nodo A5 arroja información más certera.

8.3.4.2.4 Nodo A424, Tratamientos y Acabados

Los tratamientos de las piezas durante y después de la fabricación permiten que estos se asemejen a las características de la pieza original, dependiendo del tipo de material se requerirá uno u otro, por ejemplo, en el caso de los materiales metálicos se podrá hacer tratamientos térmicos, o baños; en el caso de los materiales compuestos requerirán curados; o también será necesario un alivio de tensiones si la pieza fue soldada. Esto se deberá desarrollar con el equipo de ingeniería experimentado.

“El impacto de los acabados en la función y el costo debe ser evaluado. Deben especificarse los acabados con procesos que optimicen mejor los costos para que se satisfagan los requisitos funcionales. Si se requieren acabados de máquina, se debe especificar la mayor rugosidad aceptable para la función diseñada”²⁶.

8.3.4.2.5 Nodo A425, Método de limpieza y unión

“Deben especificarse y evaluarse los métodos de unión adecuados, tales como sujetadores mecánicos, soldadura metalúrgica, soldadura fuerte, soldadura y adhesivos químicos, para la aplicabilidad, la facilidad de acceso durante el proceso de unión y el método alternativo de unión para la reducción de costos”²⁷.

²⁵ Department Of Defense Handbook. US ARMY, MIL-HDBK-115C (2016). P.30

²⁶ Ibid., P. 29

²⁷ Ibid., P. 9

8.3.4.2.6 Nodo A426, Recubrimientos

Deben especificarse los revestimientos, los tratamientos superficiales y los acabados adecuados, incluidas las especificaciones de pintura y los tratamientos previos adecuados. MIL-STD-171 se puede usar como guía.

8.3.4.3 Nodo A43, Planos nivel 3

De acuerdo con las especificaciones de ingeniería y el modelo CAD se desarrollan los planos nivel 3 que se refieren al nivel donde se especifica al nivel de detalle cómo se debe producir la pieza. Estos planos deben ser retroalimentados por el estudio de producibilidad de los componentes hasta tener un diseño congelado. Este tipo de dibujos se deben desarrollar, la cantidad de sub ensambles que sea necesaria, para que el ensamble superior sea as fácilmente entendido y no se preste a malinterpretaciones, es importante hacer un árbol de planos correspondiente a esta distribución.

La información que se recomienda, debe estar dentro de los planos nivel 3 es²⁸:

- a. Detalles de procesos únicos.
- b. Calificaciones de desempeño.
- c. Datos dimensionales y de tolerancia.
- d. Secuencias de ensamblaje de fabricación críticas.
- e. Características de entrada / salida.
- f. Diagramas.
- g. Conexiones mecánicas y eléctricas.
- h. Características físicas. incluida la forma y el acabado.
- i. Detalles de la identificación del material.
- j. Criterios de inspección, prueba y evaluación.
- k. Información de calibración.
- l. Datos de control de calidad.
- m. Características de la interfaz.
- n. Artículos de seguridad críticos.
- o. Artículos sensibles a descargas electrostáticas.

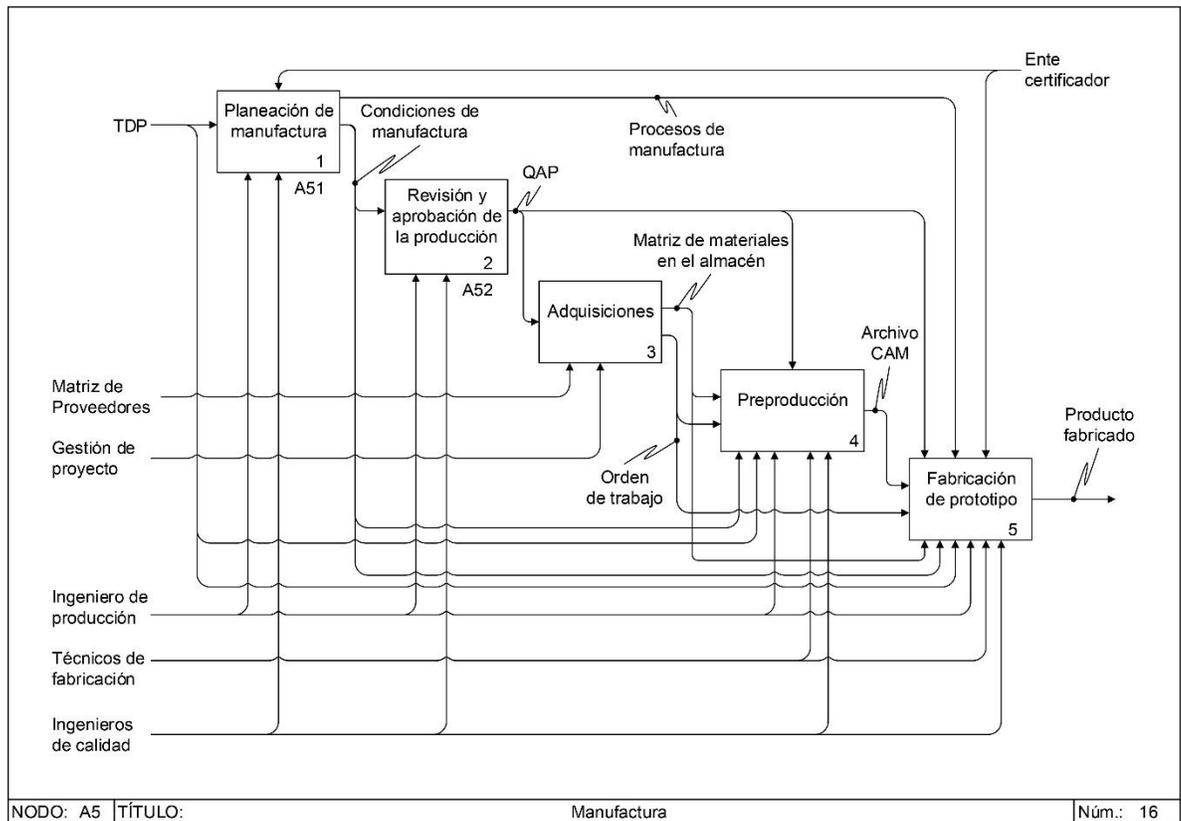
²⁸ Department Of Defense Handbook. US ARMY, *MIL-HDBK-115C* (2016). RE: C.2.1.3 Level 3 drawings, P. 50 .

p. Parte marcando elementos.

8.3.5 Nodo A5, Manufactura

Las ejecuciones de las tareas de manufactura se rigen a partir de las especificaciones producto del diseño y desarrollo en el paquete de datos técnico, donde se requiere, planear, analizar y revisar las tareas que darán como salida un producto físico, para su posterior inspección y pruebas, (véase Figura 21).

Figura 21. Manufactura



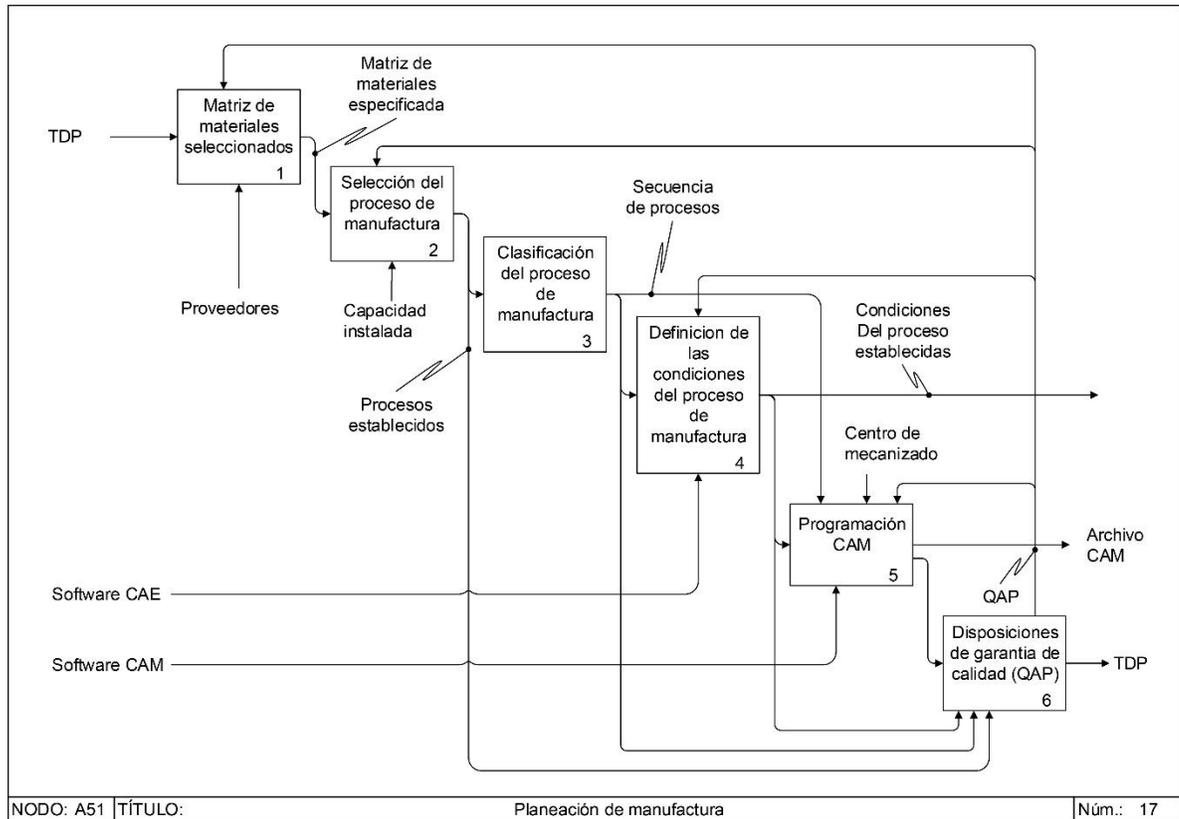
Fuente: Elaborado por los autores

8.3.5.1 Nodo A51, Planeación de manufactura

Esta actividad debe realizarse con el fin de obtener una logística lo más minuciosa posible, la idea es que se establezca, como, cuando, donde y quien

fabrica, bajo qué condiciones para lograr establecer una producción óptima y un estimado de costos asertivo²⁹. Vea con detalle este proceso en la Figura 22.

Figura 22. Planeación de manufactura



Fuente: Elaborado por los autores

8.3.5.1.1 Nodo A511, Matriz de materiales seleccionados

De acuerdo con el informe que se determinó en el estudio de materiales y que posteriormente fueron estudiados y validados en el diseño de detalle se establece una validación en cuanto al mercado se refiere, es importante tener el material adecuado, con características similares para lograr identificar la pieza. Se

²⁹ Development and Assessment of a Reverse Engineering Framework for Spare Parts. RE Node A4 Process Planning. P.41

bebe hacer un análisis de mercado donde se pueda conseguir ese material en la cantidad y especificaciones necesarias, bajo qué condiciones y en cuanto tiempo

8.3.5.1.2 Nodo A512, Selección del proceso de manufactura

La selección del proceso de manufactura conlleva, obtener la mejor calidad con los costos adecuados, al igual que muchos de los procesos de ingeniería inversa esto se deberá balancear entre costo, calidad y tiempos³⁰. Puesto que depende no solo de la empresa si no del contexto de empresas en las que se pueda adquirir un producto o contratar un servicio. Esto en definitiva define si una parte aeronáutica desarrollada mediante ingeniería inversa es viable o no.

Esta selección del proceso de manufactura se deberá evaluar en tres etapas:

- a. Preproducción
- b. Producción
- c. Postproducción

En la preproducción es importante establecer las máquinas y herramientas requeridas para la producción de los componentes como, por ejemplo, plantillas, accesorios, moldes, guías, dados de extrusión y demás. Estas máquinas y herramientas a su vez requerirán un alineamiento o un alistamiento así que es importante considerar hasta el último proceso requerido para lograr la calidad adecuada, de acuerdo a la cantidad de piezas planificadas se deberá establecer el proceso de fabricación de estos elementos de preproducción los cuales deberán tener un análisis de ciclaje. En la actividad A516 se establecerán las disposiciones de calidad para estos elementos.

Para la post producción se debe tener en cuenta el embalaje en el caso de no de requerir instalación o en el ensamble, pues en algunos casos se necesitarán bancos de montaje que permitan uniones mecánicas o fijas

8.3.5.1.3 Nodo A513, Clasificación del proceso de manufactura

De acuerdo con el proceso de manufactura seleccionado se clasificar con el fin de dar orden a los procesos y así obtener una matriz de control, para realizar tareas como estimación de costos, control de calidad e inspección, entre otros. Tarea que se desarrollará en la actividad A521

³⁰ Ibid. EN: 4.5.2 Process Planning. P. 60.

Las clasificaciones dependen de la logística interna de la empresa que desarrolla el proceso de ingeniería inversa, una clasificación lógica inicial puede ser de acuerdo a los materiales. Es necesario especificar cómo será el ensamble de cada uno de estos elementos; si se requiere una unión permanente, ¿es unión soldada y que tipo de soldadura se debe utilizar?, una unión con adhesivo, etcétera; o si por el contrario es una unión mecánica, ¿Qué tipo de elementos de sujeción o roscados serán necesarios para dicha unión?

También es importante clasificar los elementos requeridos para la preproducción, pues esto también requerirá una iteración en el diseño detallado, pues también se utilizarán horas de diseño y pruebas.

8.3.5.1.4 Nodo A514, Definición de las condiciones del proceso de manufactura

Después de hacer el estudio de producibilidad y haber seleccionado el proceso de manufactura adecuado para desarrollar la parte aeronáutica en cuestión se inicia con el establecimiento de condiciones que permitan una correcta fabricación en este punto se establecen parámetros ambientales, de configuración de planta y logística, este es un proceso iterativo que se deberá ir actualizando inclusive después de la producción de las piezas. Es una mejora continua.

8.3.5.1.5 Nodo A515, Programación CAM

La manufactura asistida por computador tiene como entrada la actividad A514 principalmente porque estas dos tareas se irán iterando entre sí, puesto que depende mucho de la experiencia de los procesos comprendidos en el “know how” de la empresa y el equipo programador de la maquinaria de manufactura. En muchos casos se requiere programación avanzada y la experticia para desarrollar las tareas requeridas para fabricar una parte. Cabe resaltar que esta programación de control numérico no solo se refiere a herramientas de corte, sino que abarca los todos los métodos de fabricación pertinentes.

En general para el control numérico computacional se requiere definir:

- a. Avance de la herramienta.
- b. Velocidades de giro y avance.
- c. Selección de la herramienta de corte.
- d. Coordenadas.
- e. Energía específica de corte y potencia de corte.
- f. Acabados.
- g. Otras condiciones.

8.3.5.1.6 Nodo A516, Disposiciones de QC (QAP)

Los QAP son los criterios de aceptabilidad de una pieza fabricada bien sea por el cliente y/o el ente certificador, con esta actividad se establece que los componentes sean fabricados de acuerdo a los planos nivel 3 establecidos en la actividad A42. Esta actividad tiene como salida los medios para auditar el producto y evaluar la capacidad de producción, de un proveedor o de la misma empresa, esto debe estar registrado en el paquete de datos técnico. Aquí se establecen actividades donde se desarrollarán ensayos no destructivos típicos para cada proceso de fabricación, por ejemplo, para materiales metálicos, ensayos de dureza, de acabados, de grietas; y para materiales compuestos, ultrasonidos, “tap testing”, validación geométrica etc. Todo esto dentro de parámetros establecidos de acuerdo a la criticidad del componente

Cuando corresponda, los dibujos deben enumerar los datos apropiados relativos a la aceptación de piezas o conjuntos detallados, de la siguiente manera³¹:

- a. Pruebas dinámicas, que definen los ciclos pertinentes, las capacidades de desviación de torsión y la reacción del engranaje.
- b. Parámetros y características eléctricas, verificaciones de continuidad, datos dieléctricos y durabilidad.
- c. Parámetros y características del circuito, comprobaciones de la ruta del circuito, parámetros de entrada / salida, funciones especiales, análisis de formas de onda y requisitos de capas y enlaces.
- d. Requisitos de la caja, como la presión y las tolerancias de fuga (la MIL-DTL-2036 se puede usar como guía).
- e. Inspecciones de líquidos penetrantes y certificaciones de personal (SAE AMS2644 y NAS 410 pueden usarse como guías).
- f. Inspecciones de partículas magnéticas y certificaciones de personal (ASTM E1444 y NAS 410 pueden usarse como guías).
- g. Las inspecciones radiográficas (SAE AMS2175, MIL-HDBK-1264, MIL-HDBK-1265 y ASTM E1742 / ASTM E1742M se pueden usar como guía)
- h. Una revisión de partes intercambiables, móviles y de acoplamiento para garantizar dimensiones adecuadas de elementos ajustados cercanos. ANSI B4.1 se puede usar como una guía.

Este plan de garantía de calidad debe ser una salida en forma de documento relacionado en el paquete de datos técnico (TDP), este documento arrojará una

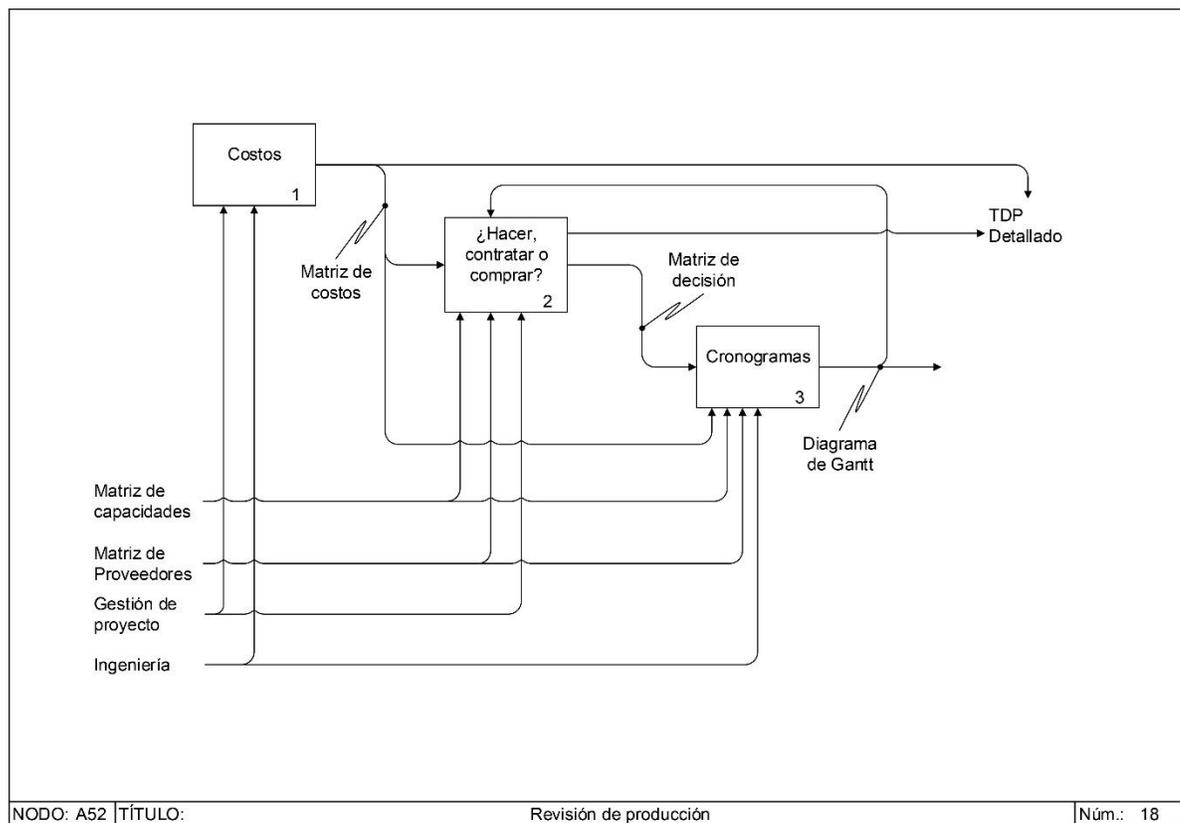
³¹ Department Of Defense Handbook. US ARMY, *MIL-HDBK-115C* (2016). RE: Quality assurance provisions (QAPS), P. 32.

serie de actividades que garanticen el correcto proceso de fabricación, define los objetivos de los QAP, establece roles y responsabilidades, y define tareas en el cronograma general del proyecto.

8.3.5.2 Nodo A52, Revisión de producción

Se debe realizar una revisión de la producción como se muestra en la Figura 23, para fijar los aspectos económicos de la producción de los artículos desarrollado mediante ingeniería inversa. El objetivo de esta actividad es establecer los datos pertinentes de producción de prototipos basados en las cotizaciones reales de los fabricantes competentes³².

Figura 23. Revisión de la producción



Fuente: Elaborado por los autores

³² Ibid, P.33

8.3.5.2.1 Nodo A521, Costos

Desacuerdo con el modo de operación de muchas aeronáuticas dedicadas a la fabricación de componentes aeronáuticos se establece que para estimar un costo optimizado se recomienda solicitar mínimo tres cotizaciones a diferentes proveedores para desarrollar el prototipo y establecer los precios a cantidades de uno, dos y tres años basados en la cantidad de comprar anual promedio de los artículos. Se recomienda hacer esta actividad en tres momentos generales:

- a. Desarrollo de datos: Los datos de los costos deben ser desarrollados utilizando citas reales de las fuentes de suministro sugeridas, desarrolladas durante el proceso de adquisición.
- b. Definición de costos reales y tiempos: La estimación del costo de ingeniería inversa y el cronograma deben actualizarse para reflejar los costos reales y los cronogramas resultantes de la revisión de la producción.
- c. Resultados: El archivo candidato (TDP preliminar) debe actualizarse para incluir los resultados de la revisión de producción.

8.3.5.2.2 Nodo A522, ¿Hacer, contratar o comprar?

Es importante que la empresa dedique el tiempo necesario para conocer, por un lado, su capacidad de su proveedor interno, esto quiere decir que la empresa debería estar organizada en departamentos que tengan el punto de vista de cliente interno los otros departamentos, pues así se podrá evaluar de manera específica cada uno de ellos³³. Por otro lado, es importante conocer los proveedores externos, bien sea nacionales o internacionales pues, si se conocen las ventajas y desventajas de los mismos se puede dedicar pedidos más específicos, y en el dado caso de no encajar con el criterio de calidad que se requiere para desarrollar el producto, prescindir de los productos o servicios de estos proveedores³⁴.

Cuando sea necesario, dependiendo de los acuerdos contractuales, los contratistas pueden exigir una decisión de compra o una compra basada en prototipos. La validación del TDP durante la creación de prototipos es importante.

³³ Ibid., P. 33

³⁴ Ibid., P. 79

8.3.5.2.3 Nodo A523, Cronograma

Se deben desarrollar nuevos cronogramas basados en los tiempos de entrega indicados tanto para los prototipos como para las cantidades de producción. Este también es un proceso iterativo pues a medida que se va recolectando mayor información los cronogramas son cada vez más precisos y esto se verá reflejado en costos y tiempos

8.3.5.3 Nodo A53, Adquisiciones

En el momento de iniciar las adquisiciones de materias primas, maquinarias y herramienta entre otros, es importante tener en cuenta, la época en la que se desarrolla dicha adquisición para evitar problemas que retrasen la manufactura del mismo. Un ejemplo de ello es hacer una compra en estados unidos donde los despachos del pedido se realicen cerca de fechas de invierno, estas pueden ocasionar demoras por mal clima o hasta puede no ser despachado el producto sino hasta el final de dicha estación. En el momento de hacer la solicitud de compra es importante tener en cuenta que posiblemente existen muchos compradores como la empresa en cuestión y que esto podría alargar tiempos de espera de la materia prima o los productos. También es importante tener en cuenta el costo en dólares de las adquisiciones pues de esto depende la afectación del valor de los productos en los valores futuros puesto que estos van cambiando con el tiempo y la situación económica de los países que dependen de estados unidos y otros para proveerse de productos y servicios

8.3.5.4 Nodo A54, Preproducción

La preproducción, es el proceso que se hace antes de fabricar un componente aeronáutico como tal, es la actividad donde se desarrolla el utillaje aeronáutico, los moldes de fabricación, los troqueles, los dados, los patrones guía, entre otros. En este punto es donde se hace el alistamiento de la maquinaria y herramienta. En pocas palabras son los que hacen efectiva una producción.

Las máquinas y herramientas que se necesitan en la preproducción deberán ser diseñadas en la etapa de planeación de la manufactura, y en ese punto, se debe hacer una retroalimentación en la etapa de diseño y desarrollo para hacer los cálculos necesarios para la fabricación de los mismos, también tuvo que pasar por la etapa de la revisión de la producción y resolver si se debe fabricar, contratar o comprar dichos productos.

8.3.5.5 Nodo A55, Fabricación de prototipo

La fabricación de un prototipo es de gran importancia debido a que este arroja información de desempeño en las pruebas, si bien los costos de un prototipo requieren mayor costo de fabricación en comparación con una producción, es necesario tener este primer paso para poder producir en serie un diseño, en este punto se obtiene retroalimentación valiosa en los procesos que se desarrollaron anteriormente. la fabricación del prototipo nos evidencia los posibles errores que pudieron cometerse en el momento de planear, diseñar y fabricar³⁵.

8.3.6 Nodo A6, Inspección y pruebas

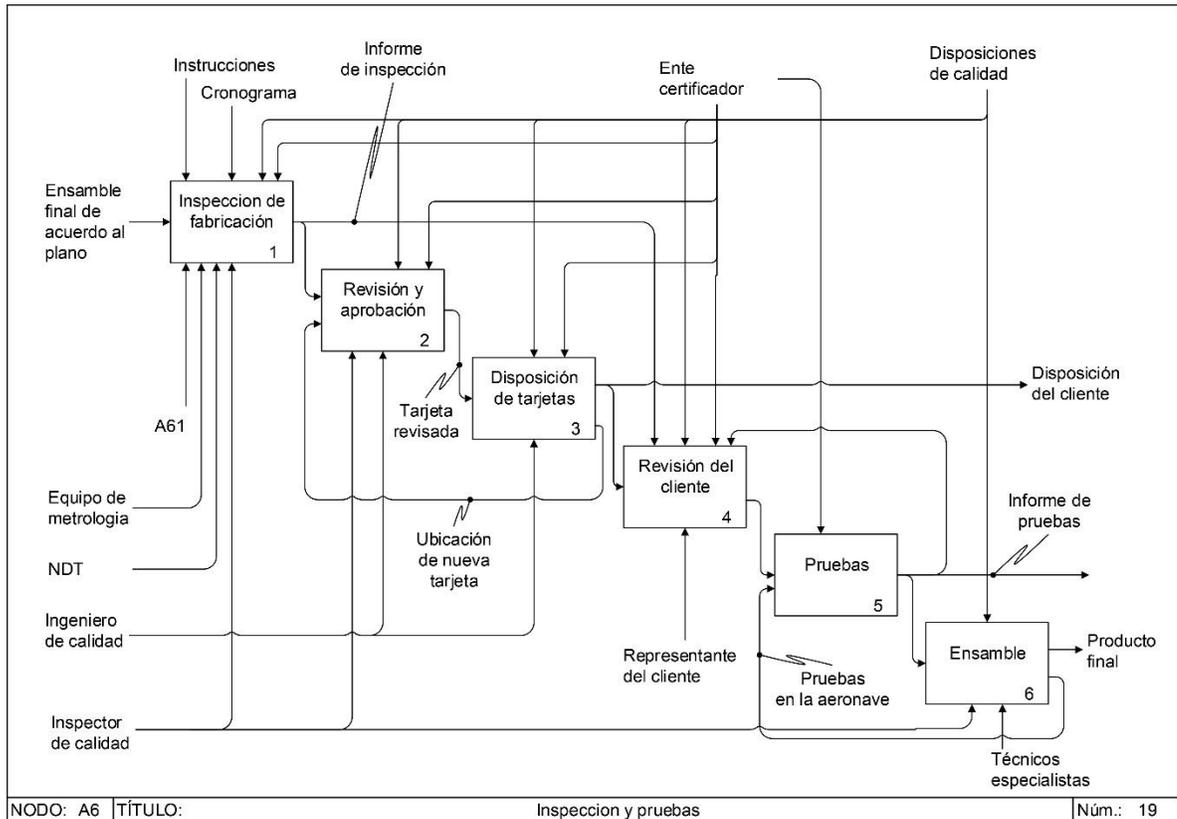
Durante la inspección y pruebas del prototipo se desarrolla información valiosa para tener certeza que todo el proceso de ingeniería inversa se llevó a cabo con las técnicas adecuadas y con la correcta planificación, esta información da cabida a una posible producción³⁶.

En esta etapa también se incluyen las pruebas necesarias para la certificación del mismo, donde se dará evidencia física de los conceptos ingenieriles que se llevaron a cabo para llegar al producto final. En este punto se evidencia si el componente cumple con su fusión o tendrá que ser modificado desde el punto de vista de alguna actividad enunciada en el proceso A15. Los procedimientos de inspección y pruebas se expresan en la Figura 24.

³⁵ Department Of Defense Handbook. US ARMY, *MIL-HDBK-115C* (2016). RE: 5.36 Prototype production., P. 34

³⁶ Development and Assessment of a Reverse Engineering Framework for Spare Parts. RE: Phase I: IDEF-Q model generation., P. 9

Figura 24. Inspección y pruebas



Fuente: Elaborado por los autores

8.3.6.1 Nodo A61, Inspección de fabricación

En el manual militar 115C del departamento de defensa de los estados unidos denota que la inspección de fabricación da evidencia de cómo se han fabricado los componentes³⁷, por un lado, se, hace una comparación geométrica en la que se recomienda utilizar tecnología CAI (inspección asistida por computador), aunque eso dependerá de los criterios que la empresa tenga para hacer determinada tarea, es posible utilizar alguna herramienta del abanico de posibilidades mostrado en la Figura 14. Técnicas de relección de datos de medición. La comparación que se hace en este punto está basada en el modelo CAD finalizado el cual debe ser parte del paquete de datos técnico.

³⁷ Department Of Defense Handbook. US ARMY, MIL-HDBK-115C (2016). RE: Inspection And Quality Control., P. 35

Por otro lado, también es necesario demostrar la efectividad de la fabricación, el tratamiento de las piezas y otros procesos de fabricación, donde se desenvuelven técnicas de aceptabilidad de las piezas desarrolladas en la actividad A516 disposiciones de garantía de calidad, donde se establecieron los ensayos no destructivos para estas piezas.

8.3.6.2 Nodo A62, Revisión y aprobación

De acuerdo con Khir Harun y Kai Cheng³⁸, la ingeniería de calidad y la gestión del proyecto, revisaran la matriz de información proveniente de las inspecciones de fabricación y se dará un estatus a los componentes de revisado y aprobado, en el caso donde se cumplan los criterios de aceptación (QAP), de lo contrario se le dará un estatus de reprobado con su respectivo informe y de acuerdo al punto donde hubo la falla se procede al mejoramiento de los procesos. Puede existir la opción de no continuar con el proyecto debido a la imposibilidad de cumplir con estos QAP

8.3.6.3 Nodo A63, Disposición de tarjetas

La actividad de disposición de tarjetas se le dará de acuerdo a los criterios que tenga el cliente o el fabricante basado en la normativa y los estándares de calidad establecidos³⁹.

8.3.6.4 Nodo A64, Revisión del cliente

Un representante del cliente verifica que los requisitos sean cumplidos basados en la documentación recopilada, esto dependerá del estatus que tenga fabricante en la información, si es de carácter restringido y hasta qué punto el cliente deberá revisar dicha información⁴⁰. Esto dependerá del acuerdo que se tenga desde el principio del proyecto.

8.3.6.5 Nodo A65, Pruebas

De acuerdo con la actividad A15 se deben efectuar las pruebas cuya aceptabilidad será otorgada por el ente certificador pertinente. El cliente puede acompañar dicho proceso hasta que se otorgue el certificado PMA. De acuerdo a

³⁸ Harun, K. C. (2012). An integrated modeling method for assessment of quality systems applied to aerospace manufacturing supply chains. Journal Intelligent Manufacturing, EN: Phase III: IDEF-Q for new standard integration., P. 14.

³⁹ Ibid P.14

⁴⁰ Ibid P.14

los criterios de aceptabilidad del ente certificador, en algunos casos se requerirá pruebas en vuelo.

8.3.6.6 Nudo A66, Ensamble

El ensamble deberá realizar, de acuerdo al contrato o el contexto que corresponda en el momento de entregar el componente, puede ser el cliente quien ensambla el artículo o el fabricante (esto depende de la criticidad), posterior a esto se realizan las pruebas adicionales en la aeronave y se recibe la aprobación del fabricante y el ente certificador⁴¹

⁴¹ Department Of Defense Handbook. US ARMY, *MIL-HDBK-115C* (2016). RE: 5.40 Assembly., P. 35

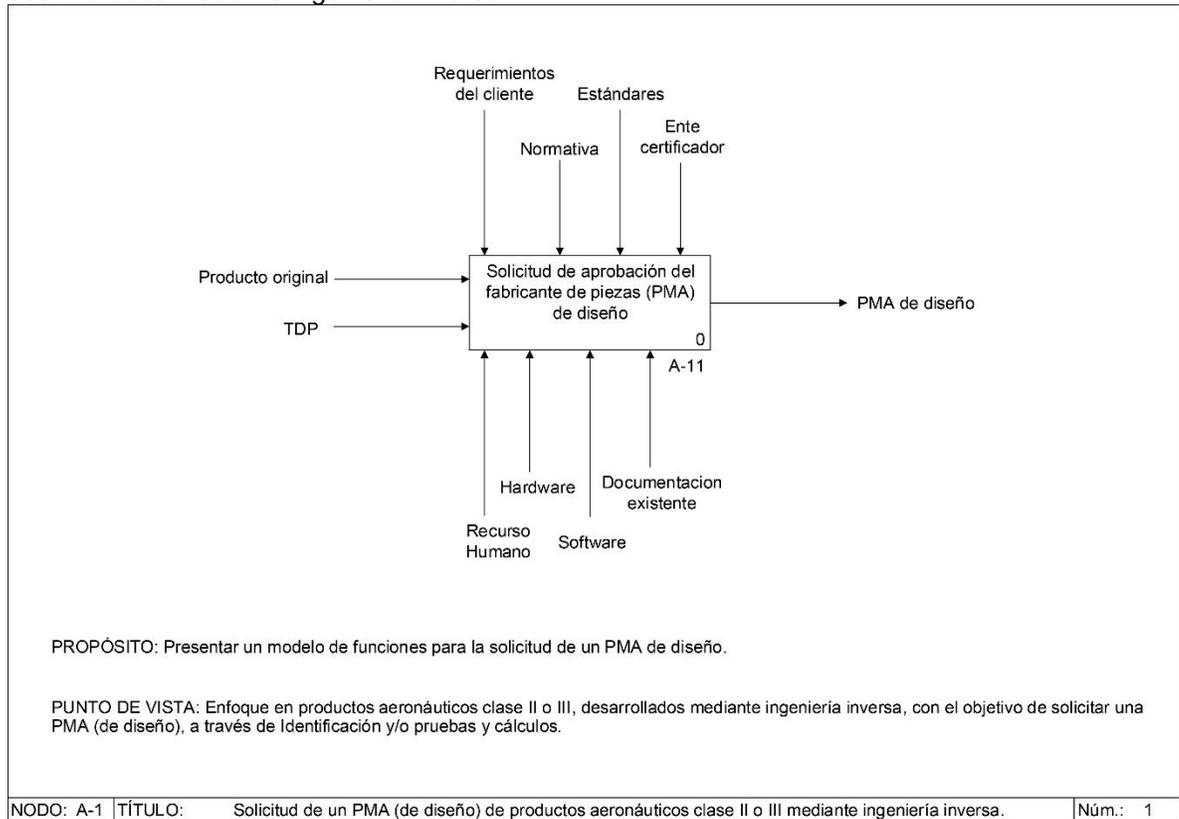
9. GUÍA PARA SOLICITAR UNA APROBACION DE FABRICANTE DE PRODUCTOS AERONAUTICOS (PMA, DE DISEÑO) DESARROLLADOS MEDIANTE INGENIERÍA INVERSA

Existen cuatro (4) métodos por los cuales las partes de PMA son aprobadas la Licencia, las Prueba y cálculos, la identificabilidad y un Certificado de tipo suplementario (STC), en el caso de los productos desarrollados a partir de ingeniería inversa, solamente se utilizan las pruebas y cálculos y la identificabilidad, que es donde se demuestra que los componentes cumplen con la misma composición química, la misma forma (con determinada precisión) y otros factores que dependerán de la criticidad y el criterio del ente certificador.

9.1 Diagrama de contexto de nivel superior

A continuación, en la Figura 25, se denota el diagrama de contexto de nivel superior A-1 el cual representa las características principales que se requieren para desarrollar la solicitud de una aprobación de fabricante de partes.

Figura 25 Diagrama de contexto de nivel superior de certificación de PMA para productos desarrollados mediante ingeniería inversa.



Fuente: Elaborado por los autores

9.1.1 Propósito y punto de vista

9.1.1.1 Propósito

Presentar un modelo de funciones para la solicitud de un PMA de diseño.

9.1.1.2 Punto De Vista

Enfoque en productos aeronáuticos clase II o III, desarrollados mediante ingeniería inversa, con el objetivo de solicitar una PMA (de diseño), a través de Identificación y/o pruebas y cálculos.

9.1.2 Entradas

Para iniciar el desarrollo de certificación aeronáutica PMA es necesario tener identificado el producto original, desde la documentación que este pueda

acompañar (sin restricciones debido a los derechos) el cual se denominará, paquete de datos técnico (PMA) inicial. Esta tarea se desarrolla en el nodo A-1

9.1.3 Controles

Una correcta certificación del producto requiere controles que permitan trabajar en sincronía, esto es dependiente (al igual que los mecanismos) de la criticidad o características específicas del producto. Los principales controles en esta calificación son, los requisitos del cliente, la normativa, los estándares. el punto de vista del ente certificador.

9.1.4 Salidas

Las salidas de este proceso son el certificado de fabricación aeronáutica, PMA, con su respectivo paquete de datos técnico (TDP) este a su vez sirve como entrada para iniciar el proceso de certificación de una producción.

9.1.5 Mecanismos

Dependiendo del tipo de componente y su criticidad, además de la capacidad instalada que tenga la empresa se determinará la utilización del hardware requerido, que aplica para el caso de ensayos en laboratorios pertinentes para la validación del mismo, en ocasiones es necesario proveerse de software especializado para desarrollar determinadas tareas. El paquete de datos técnico producto del proceso de ingeniería inversa se adjunta como mecanismo para certificación.

9.2 Índice de nodos

Tabla 2 Índice de Nodos del proceso de solicitud de un PMA para productos aeronáuticos desarrollados mediante ingeniería inversa.

A-1	Actividades para solicitar un PMA (de diseño) para productos aeronáuticos clase II o III mediante ingeniería inversa.
A-11	Actividades para solicitar un PMA (de diseño) para productos aeronáuticos clase II o III mediante ingeniería inversa.
A-111	Inicio del proceso.
A-1111	Revisión del manual de calidad.

A-1112	Plan de Certificación de Parte Específica (PartSCP).
A-11121	Identificación los estándares de aeronavegabilidad.
A-11122	Determinar la criticidad de la parte PMA.
A-11123	Alcance y plan de prueba.
A-11124	Establecimiento de un sistema de inspección de fabricación.
A-11125	Establecimiento de instrucciones de inspección y reparación.
A-11126	Plan de seguridad operacional continuada.
A-1113	Diseño preliminar.
A-1114	Diseño crítico.
A-1115	Solicitud formal.
A-112	Plan de ensayos.
A-113	Elaboración de ensayos y/o cálculos.
A-1131	Aplicación de pruebas y/o cálculos.
A-1132	Resultados.
A-1133	Declaración de cumplimiento.
A-114	Manual del producto y declaración del diseño y prestaciones.
A-115	TDP finalizado.

Fuente: Elaborado por los autores

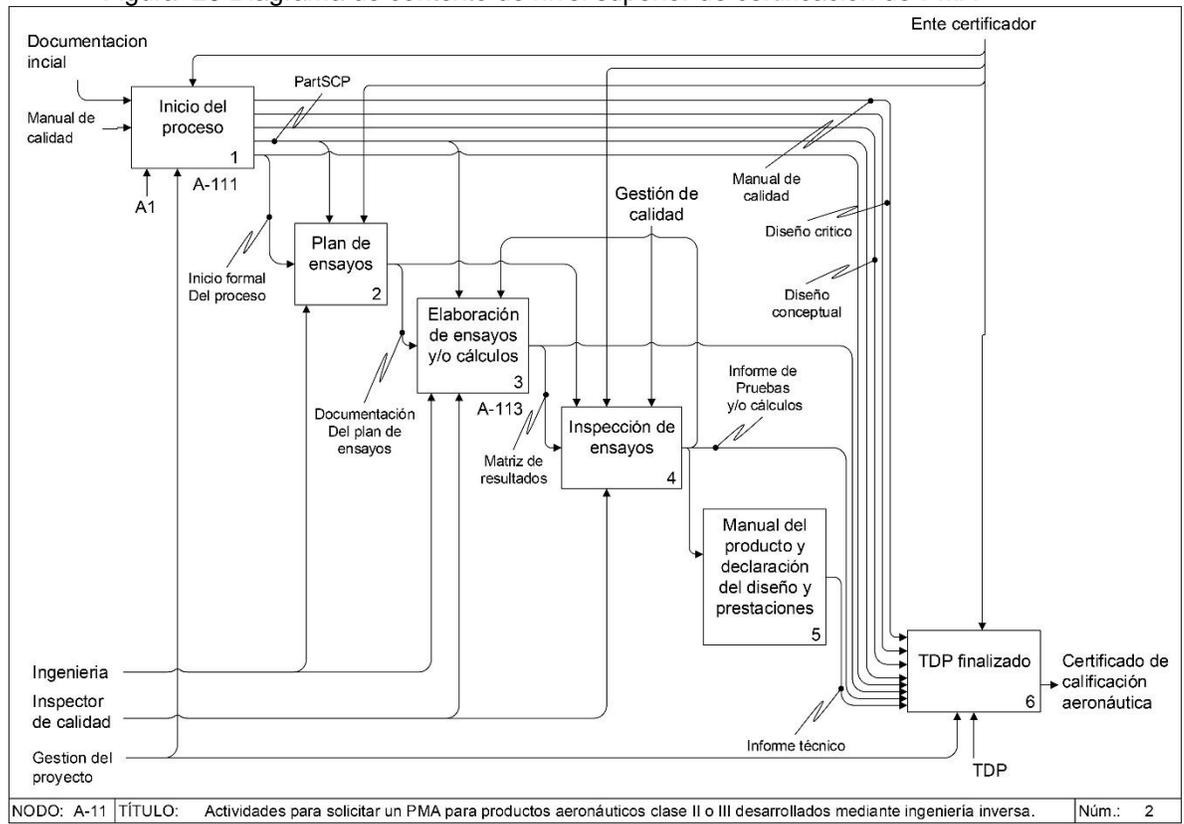
9.3 Nodo A-11 Diagrama secundario de nivel superior: Actividades para solicitar un PMA (de diseño) para productos aeronáuticos clase II o III mediante ingeniería inversa.

Para lograr una efectiva certificación, se recomienda que la empresa solicitante tenga procesos antes de la solicitud formal frente al ente certificador, estas actividades corresponden a la revisión de la información desarrollada en el desarrollo de la ingeniería inversa, se establece un plan de certificación, se evalúa los diseños preliminar y crítico; no es si no en este momento donde se envía la solicitud formal y se inicia la respectiva iteración con el ente certificador

A continuación, se desarrolla el plan de ensayos que permite establecer cómo se va a demostrar que los componentes cumplen con las características de

aeronavegabilidad. Enseguida se desarrollan las pruebas y cálculos requeridos, se inspecciona la información producto de dichos ensayos, se genera un manual del producto y declaración del diseño y prestaciones. Toda esta información deberá ser almacenada y presentada al ente certificado en un documento denominado *paquete de datos técnico* (TDP). La Figura 26 denota este proceso de manera mas especifica

Figura 26 Diagrama de contexto de nivel superior de certificación de PMA



Fuente: Elaborado por los autores

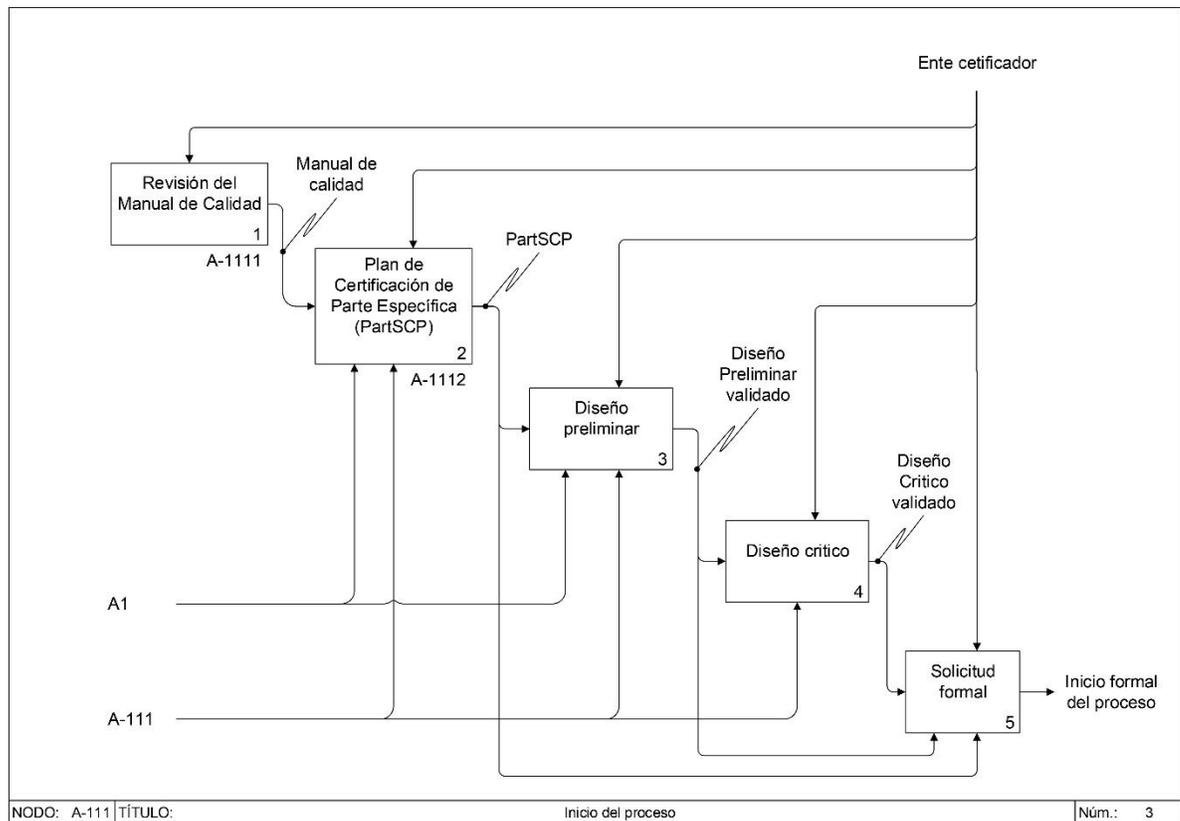
9.3.1 Nodo A-111, Inicio del proceso

La función para iniciar el proceso de solicitud de certificación aeronáutica mediante PMA, se inicia comunicando al ente certificador, quien evalúa la información inicial desarrollada. Es necesario que la entidad que requiera iniciar el proceso de certificación tenga un análisis de viabilidad desde el punto de vista económico y funcional. Esto se desarrolla en la guía de ingeniería inversa (Nodo A1).

Este proceso requiere que el solicitante envíe la información que considere pertinente para dicho proceso y a medida que se va desarrollando la verificación

documental inicial, el ente certificador requerirá documentación adicional, si es necesario. En el caso que el solicitante sea una DOA (oficina de diseño aprobada) se tendrá en cuenta la experiencia específica del mismo, la cual afectará de manera directa los tiempos de certificación y nivel de requisitos exigidos. La Figura 27 muestra gráficamente cómo se desarrollan estos procesos.

Figura 27 Inicio del proceso de aplicación para obtener un PMA



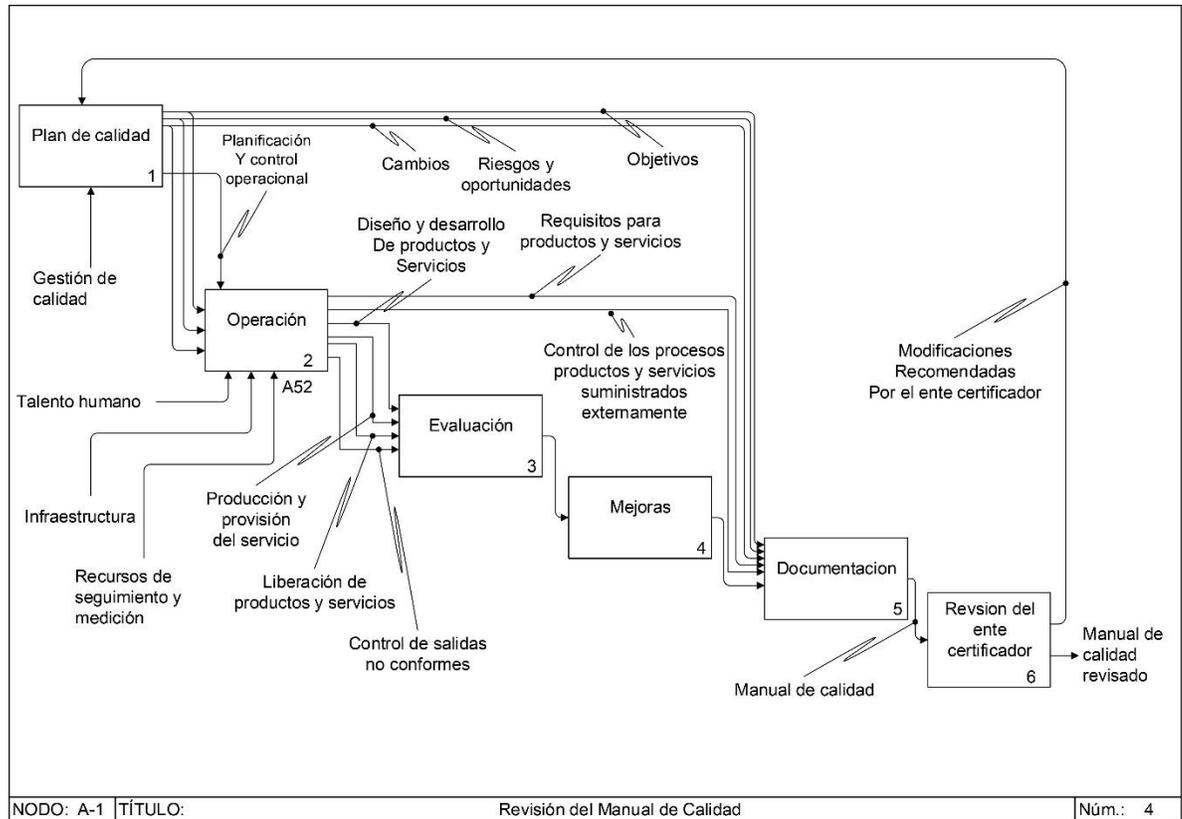
Fuente: Elaborado por los autores

9.3.1.1 Nodo A-1111, Revisión del manual de calidad

Dentro de los procesos de gestión de la empresa solicitante es indispensable la realización de un manual de calidad el cual da lineamientos estandarizados de cómo se debe proceder en cualquier proceso de la compañía, desde la viabilidad del proyecto, pasando por el desarrollo de la ingeniería inversa, la fabricación y el control de calidad de los componentes. La normativa aplicable en este caso es la AS9100 (sistemas de gestión de calidad - requisitos para las organizaciones de aviación, espacio y defensa), también es pertinente establecer procesos basados en ISO 9001 (sistemas de gestión de calidad). Antes de la revisión del manual de

calidad, en la Figura 28 se muestra a grandes rasgos los puntos de vista que se deben tener para desarrollar el manual de calidad, basado en AS-9100⁴²

Figura 28 Revisión del manual de calidad



Fuente: Elaborado por los autores

⁴² SAE International. (2016-09). Sistemas de gestión de calidad - Requisitos para las organizaciones de aviación, espacio y defensa. AENOR

9.3.1.2 Nodo A-1112, Solicitud de aprobación de materiales, partes, procesos y accesorios.

Es necesario que los materiales, partes procesos y accesorios sean avalados por el ente certificador con el fin de llevar un control específico de cada uno, las condiciones que propone la UAEAC para esta aprobación son⁴³:

- a. Que se solicite simultáneamente con el proceso de certificación de tipo para un producto aeronáutico.
- b. Que el material, parte, proceso o accesorio se encuentre amparado y cumpla con lo requerido por una Orden Técnica Standard (TSO) según lo dispuesto en el numeral 9.3.6 del Reglamento Aeronáutico Colombiano.
- c. Que el material, parte, proceso o accesorio cuente con el aval de la Autoridad Aeronáutica del país de fabricación.

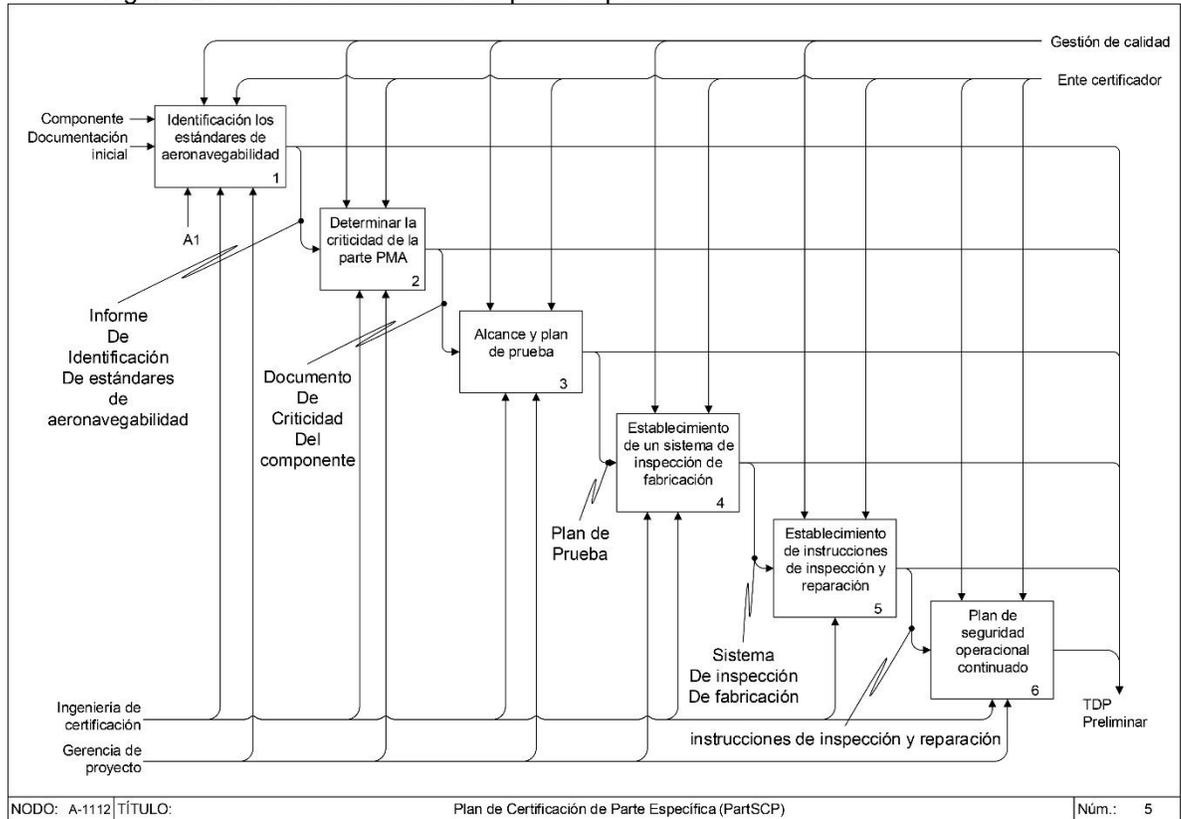
9.3.1.3 Nodo A-1113, Plan de Certificación de Parte Específica (PartSCP).

La recopilación de la información obtenida en la actividad A-111 (viabilidad) se desarrolla en este espacio, se debe tener identificado los estándares de aeronavegabilidad, una determinación preliminar de criticidad de la parte, un plan de prueba inicial, un sistema de inspección de fabricación y un plan de seguridad operacional continuada. Esta información es importante para tener una posición y en el dado caso controvertir las disposiciones del ente certificador⁴⁴.(ver Figura 29)

⁴³ UAEAC, Reglamentos aeronáuticos de Colombia, RE: Certificación de tipo y fabricación de productos aeronáuticos

⁴⁴ AC_21_303-4 Application For Parts Manufacturer Approval Via Tests And Computations Or Identity RE: A Part Specific Certification Plan (PartSCP), P.32.

Figura 29 Plan de certificación de parte específica



Fuente: Elaborado por los autores

9.3.1.3.1 Nodo A-11511, Identificación de estándares de aeronavegabilidad

Para iniciar el proceso es necesario que la empresa tenga desarrollado un TDP preliminar, producto de la actividad A1 de la guía de desarrollo de ingeniería inversa. Estos estándares que definen la aeronavegabilidad de un producto aeronáutico viene expuesto en los manuales de la aeronave que los contiene.

9.3.1.3.2 Nodo A-11512, Determinar la criticidad de la parte PMA

Una manera preliminar de establecer la criticidad del componente al que se le desarrollará ingeniería inversa y su posterior certificación, es por medio del

análisis de seguridad. El manual militar que se recomienda utilizar para este fin, es el “*Aviation Critical Safety Item Management Handbook*”⁴⁵

9.3.1.3.3 Nodo A-11513, Alcance y plan de prueba

Esta tarea será documentada a partir de la información resultante del nodo A15 en la guía de ingeniería inversa. De acuerdo con la seguridad del artículo aeronáutico se determina la necesidad, el tipo y el alcance las pruebas. Estas, determinan el diseño funcional del espécimen y su rendimiento relativo respecto al diseño de la parte OEM con certificado de tipo, algunas pruebas que se pueden encontrar para este fin pueden ser, rendimiento, durabilidad, resistencia a la fatiga, fluencia, corrosión, durabilidad, propiedades dinámicas, cargas operacionales; etc., que muestra el cumplimiento de las normas de aeronavegabilidad aplicables. Algunos artículos no críticos que tienen poco impacto en la seguridad pueden necesitar poca o ninguna prueba. En ocasiones es necesario establecer pruebas en vuelo, este es el momento de informarlo al ente certificador. El plan de prueba deberá cumplir los siguientes propósitos⁴⁶:

- a. Verificar las características del diseño (por ejemplo, vibraciones, fatiga, efectividad del recubrimiento, etc.).
- b. Verificar que las variaciones en el proceso de fabricación no tienen efectos perjudiciales en el diseño funcional del artículo de reemplazo.
- c. Verificar las interacciones del artículo con el siguiente ensamblaje superior y los sistemas afectados (por ejemplo, engranajes, cojinetes, sellos, cuchillas, etc.).
- d. Evaluación de artículos sofisticados hechos de componentes complejos.

Se recomienda que el alcance y plan de pruebas, que será presentado en la solicitud formal de manera preliminar, establezca:

- a. Propósito de la prueba;
- b. Descripción física y funcional del artículo de prueba y la configuración;
- c. Número de unidades de prueba;
- d. Identificación de la unidad;
- e. Condiciones de prueba y duración;
- f. métodos de prueba y su idoneidad;
- g. Exactitud del método de prueba;

⁴⁵ FAA, *Aviation Critical Safety Item Management Handbook*”

⁴⁶ FAA. (2014). *AC_21_303-4 Application For Parts Manufacturer Approval Via Tests And Computations Or Identity* EN: 27. Test Scope and Plan., P.13

- h. Criterios para el éxito y el fracaso de la prueba;
- i. Instrumentación de prueba y recopilación de datos;
- j. Control de seguridad de la prueba; y
- k. Control de los procedimientos de prueba.

9.3.1.3.4 Nodo A-11514, Establecimiento de un sistema de inspección de fabricación.

De acuerdo con la UAEAC⁴⁷, Cada poseedor de un PMA deberá establecer y mantener un Sistema de Inspección de Fabricación. Este sistema debe garantizar que cada parte terminada está en conformidad con los datos de diseño y es segura para su instalación en los productos con Certificado Tipo para los cuales fue fabricada. El Sistema de Inspección debe incluir lo siguiente:

- a) La materia prima que ingresa a la planta y es utilizada en el producto, deberá ser la especificada en los datos de diseño.
- b) Los materiales recibidos deberán ser debidamente identificados, para el caso en que sus propiedades físicas y químicas no puedan ser rápida y adecuadamente reconocidas y determinadas en el taller.
- c) Los materiales sujetos a deterioro o daños, deben ser adecuadamente almacenados y convenientemente protegidos.
- d) Los procesos que afecten la calidad y seguridad del producto terminado deben ser realizados de acuerdo con especificaciones aceptables para la UAEAC.
- e) Las partes en proceso deben ser inspeccionadas para establecer la conformidad con los datos de diseño, en las estaciones de] sistema de producción donde se puedan hacer verificaciones exactas y precisas. Pueden ser empleados procedimientos de Control de Calidad estadísticos, donde se demuestre que puede mantenerse para ese caso en particular, un nivel satisfactorio de calidad.
- f) Los planos actualizados de diseño deben estar disponibles en todo momento para el personal de fabricación e inspección y cuando la UAEAC así lo requiera.
- g) Los cambios mayores al diseño básico deberán estar adecuadamente controlados y aprobados, antes de ser incorporados en la parte terminada.

⁴⁷ UAEAC, Reglamento Aeronáutico de Colombia, Certificación de tipo y fabricación de productos aeronáuticos, EN: 9.3.5.6. Sistema de inspección de fabricación, P. 49

h) Los materiales y componentes rechazados deberán ser separados e identificados de manera tal que se evite su empleo en partes terminadas.

i) Los registros de inspecciones deberán ser mantenidos e identificados con la Parte Terminada y en lugar disponible para la UAEAC, el Fabricante retendrá el Registro por un período no menor de dos (2), desde la fecha en que la parte se ha dejado de fabricar.

j) El poseedor de una Aprobación de Fabricación de Partes (PMA), deberá comunicar por escrito a la UAEAC el cambio de ubicación de las instalaciones donde produce las partes, o la instalación de talleres adicionales en otra ubicación, dentro de los diez (10) días a partir de la fecha en que se produjo el cambio. Para poder continuar la producción en las nuevas instalaciones deberá contarse con la aprobación de la UAEAC.

k) Cada poseedor de un PMA, deberá asegurar y establecer que cada parte terminada está en conformidad con los datos de diseño y es segura para su instalación sobre un producto con Certificado Tipo.

9.3.1.3.5 Nodo A-11515, Establecimiento de instrucciones de inspección y reparación.

De acuerdo con los manuales de la aeronave que contenga el componente es importante iniciar una documentación de las inspecciones y reparaciones que darán pie para que los componentes mantengan la aeronavegabilidad continuada, esto se desarrolla desde el punto de vista de la ingeniería y la gestión de calidad⁴⁸.

9.3.1.3.6 Nodo A-11516, Plan de seguridad operacional continuada.

Para desarrollar el plan de seguridad continuada es importante ver el manual de la AEROCIVIL “procedimiento para vigilancia continua de los sistemas de gestión de seguridad operacional – SMS” donde se recomienda una metodología para la vigilancia de un sistema de gestión de seguridad operacional. Otra entidad que aborda este tema desde el punto de vista internacional es la OACI, el cual publicó el “*módulo de seguridad operacional*” donde se aborda el “*plan de seguridad*”

⁴⁸ FAA. (2014). *AC_21_303-4 Application For Parts Manufacturer Approval Via Tests And Computations Or Identity, EN: Test Plan., P.14*

operacional de la región sam (samsp)". Cabe recordar que este tema hace parte del análisis de criticidad de las partes las cuales no se abordarán en este documento.

9.3.1.4 Nodo A-1114, Diseño preliminar

Debido a que las partes desarrolladas mediante ingeniería inversa pueden abordarse desde diferentes puntos de vista y por ende se pueden obtener múltiples salidas, es recomendable tener la validación de la misma, no solamente se deberá optar por una caracterización dimensional, sino que es también necesario tener un referente comparativo para desarrollar un diseño preliminar efectivo, los puntos que se recomienda considerar son⁴⁹:

- a. Tamaño de la muestra.
- b. Fuentes de muestra.
- c. Tolerancias dimensionales.
- d. Características Dimensionales Claves.
- e. Materiales
- f. Peso y propiedades de la masa.
- g. Configuración de la de la parte⁵⁰
- h. Procesos para definir la resistencia estructural⁵¹

Es de aclarar que el ente certificador citará a reuniones periódicas para dar retroalimentación para su desarrollo efectivo.

9.3.1.5 Nodo A-1115, Diseño critico

Para solicitar la revisión del diseño critico incluye, una matriz de información que fundamente los requisitos de aeronavegabilidad que dispone el diseño, la información relevante en este punto es:

- a. Documentos técnicos
- b. Documentación legal
- c. Estudios de ingeniería
- d. Ensayos requeridos

⁴⁹ FAA, AC_21_303-4 Application For Parts Manufacturer Approval Via Tests And Computations Or Identity, 2014

⁵⁰ UAEAC, Reglamento Aeronáutico de Colombia, Certificación de tipo y fabricación de productos aeronáuticos, EN: 9.3.5.6. solicitud de una aprobación de fabricación de partes, P. 48

⁵¹ Ibid., P.48

Al igual que diseño preliminar el ente certificador convocará a reuniones periódicas si se considera pertinente para establecer de manera efectiva el diseño crítico.

9.3.1.6 Nodo A-1116, Solicitud formal

La solicitud formal es el compendio de documentos que se entregaran de manera física al ente certificador, esta documentación es llamada el paquete de datos técnico (TDP por sus siglas en ingles), la información que contiene esta solicitud es, el diseño preliminar, el diseño crítico y el PartSCP, acompañado de una carta la cual debe contener mínimo la siguiente información:⁵²

- a. Identificación del producto en el que la parte será instalada.
- b. El nombre y la dirección de las instalaciones de fabricación donde la parte será producida.
- c. El método para demostrar el cumplimiento de los requisitos de aeronavegabilidad (es decir, informes de prueba y cálculos utilizando análisis generales, o análisis comparativos, o una combinación de ambos métodos, o identidad sin un acuerdo de licencia)⁵³
- d. Estipular el uso de un sistema de calidad que cumpla con los requisitos⁵⁴

El ente certificado dará el aval si la información presentada es pertinente para continuar con el proceso de certificación, si dicha información técnica tiene el estatus de "derechos limitados" no se podrá continuar con el proceso. (esta información también debe ser verificada por la empresa que desarrolla el proceso de ingeniería inversa, en el nodo A12, evaluación de la información).

En cuanto a diseño crítico, la entidad desarrolladora de ingeniería inversa deberá estar en constante revisión por el ente certificador, a medida que va fluyendo el proceso de certificación, para ello se deberán desarrollar reuniones donde se abordarán puntos en específico, los cuales dependerán de la criticidad del componente.

⁵² UAEAC, Reglamento Aeronáutico de Colombia, Certificación de tipo y fabricación de productos aeronáuticos, EN: Solicitud de una aprobación de fabricación de partes, P. 48

⁵³ FAA, AC_21_303-4 Application For Parts Manufacturer Approval Via Tests And Computations Or Identity, 2014

⁵⁴ Ibid., P.

9.3.2 Nodo A-112, Plan de ensayos

Para aplicar los ensayos y cálculos se debe entender que estos corresponden con la validación del diseño de un componente, desde el punto de vista de la aeronavegabilidad aplicable, se recomienda⁵⁵ utilizar como referencia el TCDS (hoja de datos del certificado de tipo) para este fin. El propósito del artículo aeronáutico da información de cómo los métodos de falla afectan la seguridad, de las características físicas y las interfaces con otros productos. El alcance y el rigor de cada prueba y cálculo varían según la naturaleza del artículo e incluyen al menos lo siguiente:

- a. Una evaluación de seguridad que caracteriza la naturaleza del artículo y su efecto sobre la seguridad.
- b. Cálculos que muestran el cumplimiento regulatorio o corroboran los análisis comparativos.
- c. Resultados de pruebas que muestran el cumplimiento regulatorio directo o verifican los análisis comparativos.

Este plan de ensayos debe estar basado en los “métodos de cumplimiento (MoC)”; la autoridad y el solicitante deben estar de acuerdo con dicho plan y este a su vez debe contar con suficiente detalle para garantizar una buena comprensión mutua. en algunas entidades como el SECAD se debe utilizar un modelo general de plan de ensayos.

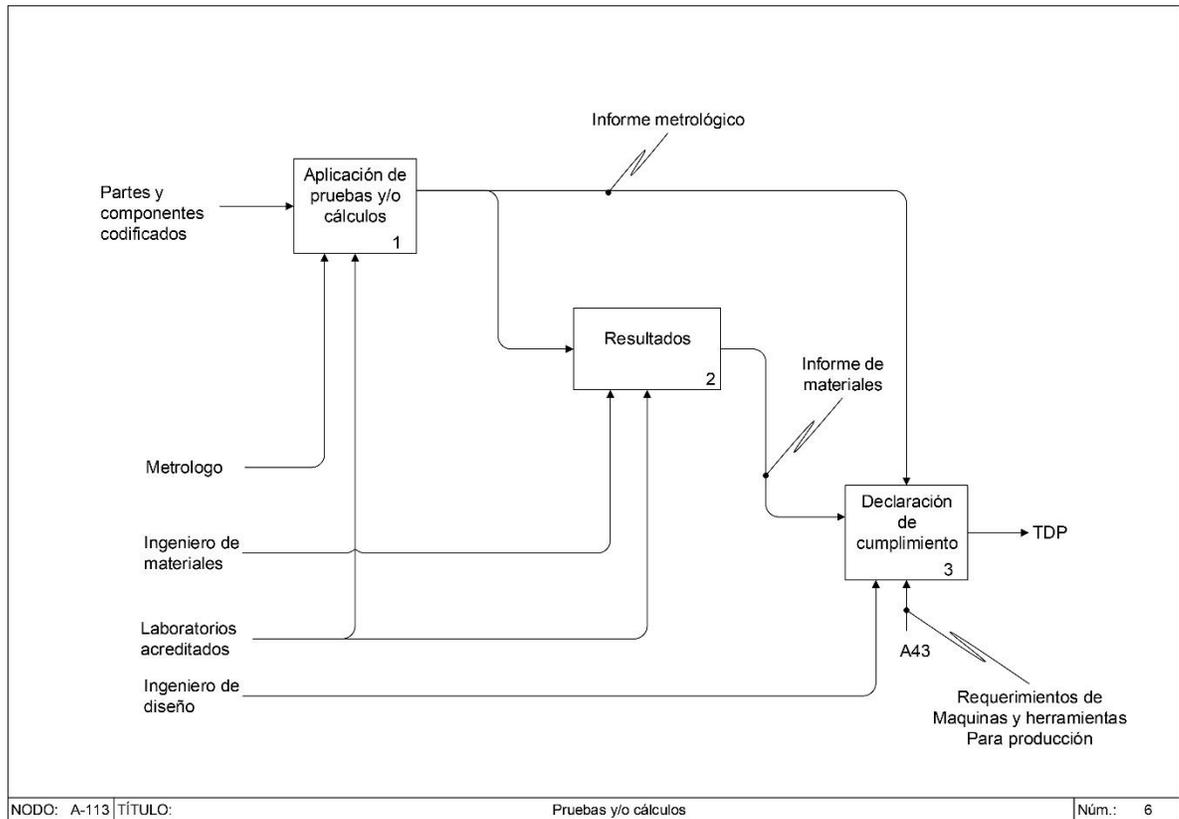
9.3.3 Nodo A-113, Elaboración de ensayos y cálculos

De acuerdo al criterio del ente certificador, las ejecuciones de los ensayos se hacen basados en los procedimientos que estos requieran, la igual que se debe seguir los lineamientos al pie de la letra del plan de ensayos; si es necesario establecer modificación en dicho plan, se tendrá que tener en cuenta al ente certificador. Como salida de este proceso, se debe generar un informe del mismo.

La aplicación de las pruebas, deberán ser hecha por el solicitante, quien debe asumir los costos pertinentes para dicho fin, en este proceso es necesario un representante del ente certificador y un representante del cliente.

⁵⁵ FAA, AC 21.303-4 Application For Parts Manufacturer Approval Via Tests And Computations Or Identity, 2014, RE: 27. Test Scope and Plan, P.13-14

Figura 30, Nodo A-113, Pruebas y/o cálculos



Fuente: Elaborado por los autores

9.3.3.1 Nodo A-1131, Aplicación de pruebas y/o cálculos.

La aplicación de pruebas y cálculos corresponden con la validación del diseño de un componente, desde el punto de vista de la aeronavegabilidad aplicable, se recomienda⁵⁶ utilizar como referencia el TCDS (hoja de datos del certificado de tipo) para este fin. El propósito del artículo aeronáutico da información de como método de falla afectan la seguridad, de las características físicas y las interfaces con otros productos. El alcance y el rigor de cada prueba y cálculo varían según la naturaleza del artículo e incluyen al menos lo siguiente:

- d. Una evaluación de seguridad que caracteriza la naturaleza del artículo y su efecto sobre la seguridad.

⁵⁶ FAA. (2014). AC 21.303-4 Application For Parts Manufacturer Approval Via Tests And Computations Or Identity

- e. Cálculos que muestran el cumplimiento regulatorio o corroboran los análisis comparativos.
- f. Resultados de pruebas que muestran el cumplimiento regulatorio directo o verifican los análisis comparativos.

Las aplicaciones de pruebas deberán ser hechas por el solicitante, quien debe asumir los costos pertinentes para dicho fin, en este proceso es necesario un representante del ente certificador y un representante del cliente.

9.3.3.2 Nodo A-1132, Resultados.

La entidad que desarrolla la ingeniería inversa deberá tener dentro de sus archivos los reportes de ingeniería producto de las pruebas y cálculos, junto con las especificaciones de los equipos utilizados para dicho fin, aunque mucha de esta información no es de obligatoriedad presentarla al ente certificador que estos resultados efectivamente demuestran que los componentes fabricados bajo las características presentadas inicialmente en la actividad A-11, cumplen con las propiedades de aeronavegabilidad del componente OEM, es decir que operan con la debida seguridad. De acuerdo con la criticidad del componente el ente certificador y el solicitante crearan una lista de cumplimiento para cumplir con el objetivo, es en este proceso donde se verificará si efectivamente se cumplen⁵⁷

9.3.3.3 Nodo A-1133, Declaración de cumplimiento.

Al finalizar las pruebas y cálculos se deberá iniciar una declaración de cumplimiento donde se exhiba que se ha finalizado todos los requisitos necesarios para demostrar la aeronavegabilidad del componente, esta información deberá ser entregada como un documento escrito y firmado por el responsable pertinente. Dicho documento se deberá anexar al paquete de datos técnico finalizado

9.3.4 Nodo A-115, Inspecciones y ensayos

De acuerdo con la UAEAC⁵⁸, Cada poseedor de un PMA deberá establecer y mantener un Sistema de Inspección de Fabricación. Este sistema debe garantizar que cada parte terminada está en conformidad con los datos de diseño y es segura

⁵⁷ FAA. (2014). AC_21_303-4 Application For Parts Manufacturer Approval Via Tests And Computations Or Identity EN: 15. Test Reports and Computations., P.7

⁵⁸ 21.303-4

para su instalación en los productos con Certificado Tipo para los cuales fue fabricada. El Sistema de Inspección debe incluir lo siguiente:

a) La materia prima que ingresa a la planta y es utilizada en el producto, deberá ser la especificada en los datos de diseño.

b) Los materiales recibidos deberán ser debidamente identificados, para el caso en que sus propiedades físicas y químicas no puedan ser rápida y adecuadamente reconocidas y determinadas en el taller.

c) Los materiales sujetos a deterioro o daños, deben ser adecuadamente almacenados y convenientemente protegidos.

d) Los procesos que afecten la calidad y seguridad del producto terminado deben ser realizados de acuerdo con especificaciones aceptables para la UAEAC.

e) Las partes en proceso deben ser inspeccionadas para establecer la conformidad con los datos de diseño, en las estaciones de] sistema de producción donde se puedan hacer verificaciones exactas y precisas. Pueden ser empleados procedimientos de Control de Calidad estadísticos, donde se demuestre que puede mantenerse para ese caso en particular, un nivel satisfactorio de calidad.

f) Los planos actualizados de diseño deben estar disponibles en todo momento para el personal de fabricación e inspección y cuando la UAEAC así lo requiera.

g) Los cambios mayores al diseño básico deberán estar adecuadamente controlados y aprobados, antes de ser incorporados en la parte terminada.

h) Los materiales y componentes rechazados deberán ser separados e identificados de manera tal que se evite su empleo en partes terminadas.

i) Los registros de inspecciones deberán ser mantenidos e identificados con la Parte Terminada y en lugar disponible para la UAEAC, el Fabricante retendrá el Registro por un período no menor de dos (2), desde la fecha en que la parte se ha dejado de fabricar.

j) El poseedor de una Aprobación de Fabricación de Partes (PMA), deberá comunicar por escrito a la UAEAC el cambio de ubicación de las instalaciones donde produce las partes, o la instalación de talleres adicionales en otra ubicación, dentro de los diez (10) días a partir de la fecha en que se produjo el cambio. Para poder continuar la producción en las nuevas instalaciones deberá contarse con la aprobación de la UAEAC.

k) Cada poseedor de un PMA, deberá asegurar y establecer que cada parte terminada está en conformidad con los datos de diseño y es segura para su instalación sobre un producto con Certificado Tipo.

El informe de ensayos establece una inspección del plan de ensayos, verificando el cumplimiento de los mismos, allí, el ente certificador verifica el correspondiente método de cumplimiento (MoC). Si es necesario, las pruebas podrán ser repetidas las veces que se requiera para tener una información de salida contundente.

9.3.5 Nodo A-115, Manual del producto, declaración del diseño y prestaciones

Se debe realizar un documento donde se especifiquen las funciones del producto y las instrucciones para el mantenimiento de la aeronavegabilidad, los cambios realizados al mismo deberán estar disponibles para toda persona que deba cumplir con estas y deben ser suministrados por el poseedor del diseño aprobado del producto aeronáutico.

La entidad que desarrolla el producto debe generar una declaración de diseño y prestaciones, basado en los formularios que el ente certificador disponga, el cual se compromete a mantener la conformidad del producto teniendo un control de los respectivos números de parte, referencia, modelo, versión y demás consideraciones

9.3.6 Nodo A-116, Paquete de datos técnico finalizado

Los estándares recomendados en Estados Unidos para desarrollar un efectivo TPD es denominado "MIL-DTL-31000C, especificación detallada de paquete de datos técnico", esta normativa aclara que si bien, este documento presenta unos lineamientos específicos, están sujetos a adaptación⁵⁹.

La verificación del TDP por parte del ente certificador será inspeccionado basado en los siguientes ítems:

- a. Cumplimiento de los requisitos de esta especificación y las descripciones de los elementos de datos aplicables según el contrato o la orden de compra.

⁵⁹ FAA, MIL DTL 31000C, Detail specification technical data packages, EN: 3. Requirements. P, 4-9

- b. Inclusión de todos los documentos, incluidas las referencias de subnivel, necesarios para cumplir con los requisitos de contenido de información del elemento TDP.
- c. Precisión de la asignación e identificación de marcas de seguridad, declaraciones de restricción (por ejemplo, declaraciones de distribución), avisos de control de exportaciones, leyendas de derechos de datos y otras marcas especiales.
- d. Inclusión de números de contrato e identificaciones de contratistas.
- e. Legibilidad y reproducibilidad.
- f. Los componentes de TDP no se han preparado para los requisitos, que podrían cumplir los requisitos existentes.
- g. Las referencias a documentos de estandarización cumplen con los estándares pertinentes de cada ente certificador.
- h. Integridad y precisión de los documentos de TDP, incluida la información de garantía de calidad requerida, al describir el diseño del artículo, sus subconjuntos y componentes. El diseño que se describirá en los documentos de TDP es la configuración del artículo que el Gobierno ha aprobado, probado o aceptado.
- i. Los TDP Tipo 2D y Tipo 3D se abrirán en el software apropiado sin generación de errores o advertencias

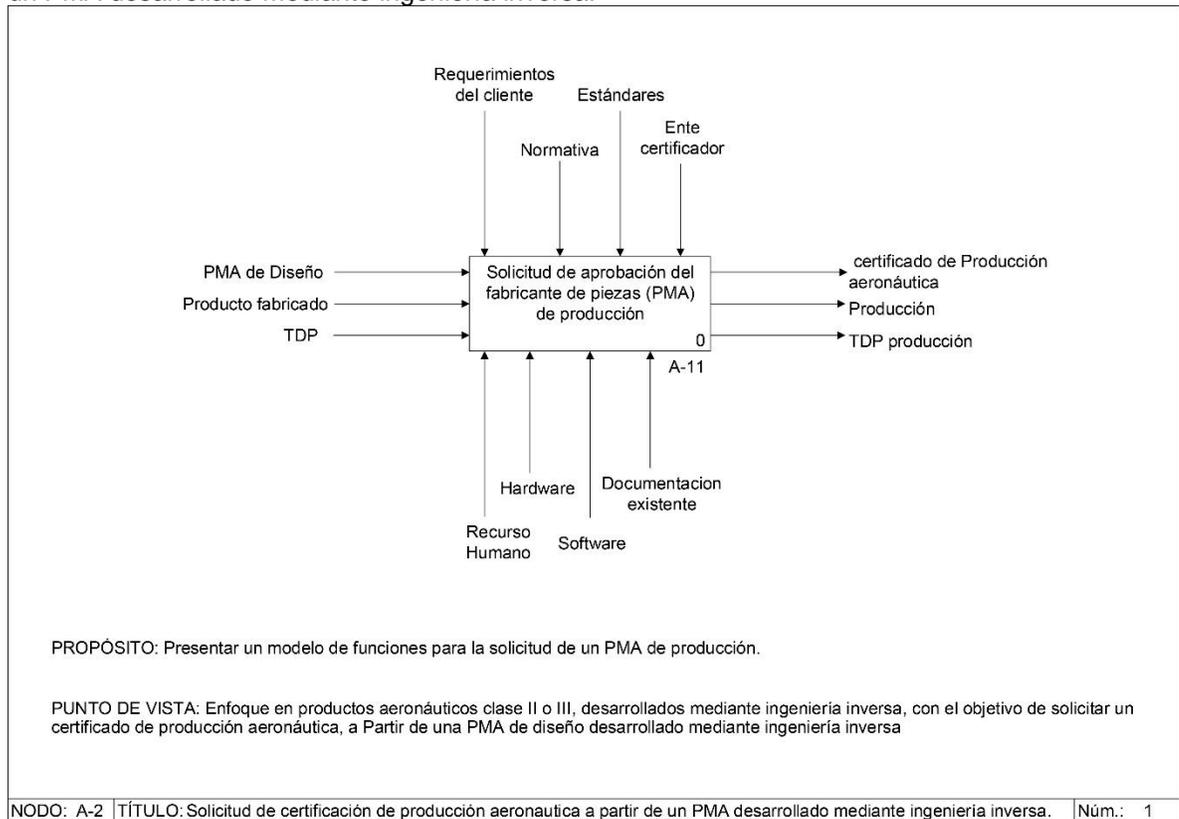
Por otro lado, es necesario hacer una Inspección de productos de gestión de datos TDP por parte del ente certificador. Los motivos para tener en cuenta en el momento de realizar esta inspección son.

- a. Cumplimiento de los requisitos de esta especificación y las descripciones de los elementos de datos aplicables según el contrato o la orden de compra.
- b. Inclusión de todos los documentos, incluidas las referencias de subnivel, necesarios para cumplir con la información requisitos de divulgación del producto de gestión de datos TDP.
- c. Precisión de la asignación e identificación de marcas de seguridad, declaraciones de distribución, avisos de control de exportaciones, leyendas de derechos de datos y otras marcas especiales.
- d. Inclusión de números de contrato e identificaciones de contratistas, cuando corresponda.
- e. Legibilidad y reproducibilidad.

10. GUÍA PARA CERTIFICAR UNA PRODUCCION APARTIR DE UN PMA, DE DISEÑO PARAPRODUCTOS DESARROLLADOS MEDIANTE INGENIERÍA INVERSA

10.1 Diagrama de contexto de nivel superior

Figura 31 Diagrama de contexto de nivel superior de certificación de producción a partir de un PMA desarrollado mediante ingeniería inversa.



Fuente: Elaborado por los autores

10.1.1 Propósito y punto de vista

10.1.1.1 Propósito

Presentar un modelo de funciones para la solicitud de un PMA de diseño.

10.1.1.2 Punto De Vista

Enfoque en productos aeronáuticos clase II o III, desarrollados mediante ingeniería inversa, con el objetivo de solicitar una PMA (de diseño), a través de Identificación y/o pruebas y cálculos.

10.1.2 Entradas

Para iniciar el desarrollo de certificación aeronáutica PMA es necesario tener identificado el producto original, desde la documentación que este pueda acompañar (sin restricciones debido a los derechos) el cual se denominará, paquete de datos técnico (PMA) inicial. Esta tarea se desarrolla en el nodo A-1

10.1.3 Controles

Una correcta certificación del producto requiere controles que permitan trabajar en sincronía, esto es dependiente (al igual que los mecanismos) de la criticidad o características específicas del producto. Los principales controles en esta calificación son, los requisitos del cliente, la normativa, los estándares. el punto de vista del ente certificador.

10.1.4 Salidas

Las salidas de este proceso son el certificado de fabricación aeronáutica, PMA, con su respectivo paquete de datos técnico (TDP) este a su vez sirve como entrada para iniciar el proceso de certificación de una producción.

10.1.5 Mecanismos

Dependiendo del tipo de componente y su criticidad, además de la capacidad instalada que tenga la empresa se determinará la utilización del hardware requerido, que aplica para el caso de ensayos en laboratorios pertinentes para la validación del mismo, en ocasiones es necesario proveerse de software especializado para desarrollar determinadas tareas. El paquete de datos técnico producto del proceso de ingeniería inversa se adjunta como mecanismo para certificación.

10.2 Índice de nodos

Tabla 3 Índice de Nodos del proceso de solicitud de una calificación de producción aeronáutica basada en un PMA desarrollado mediante ingeniería inversa.

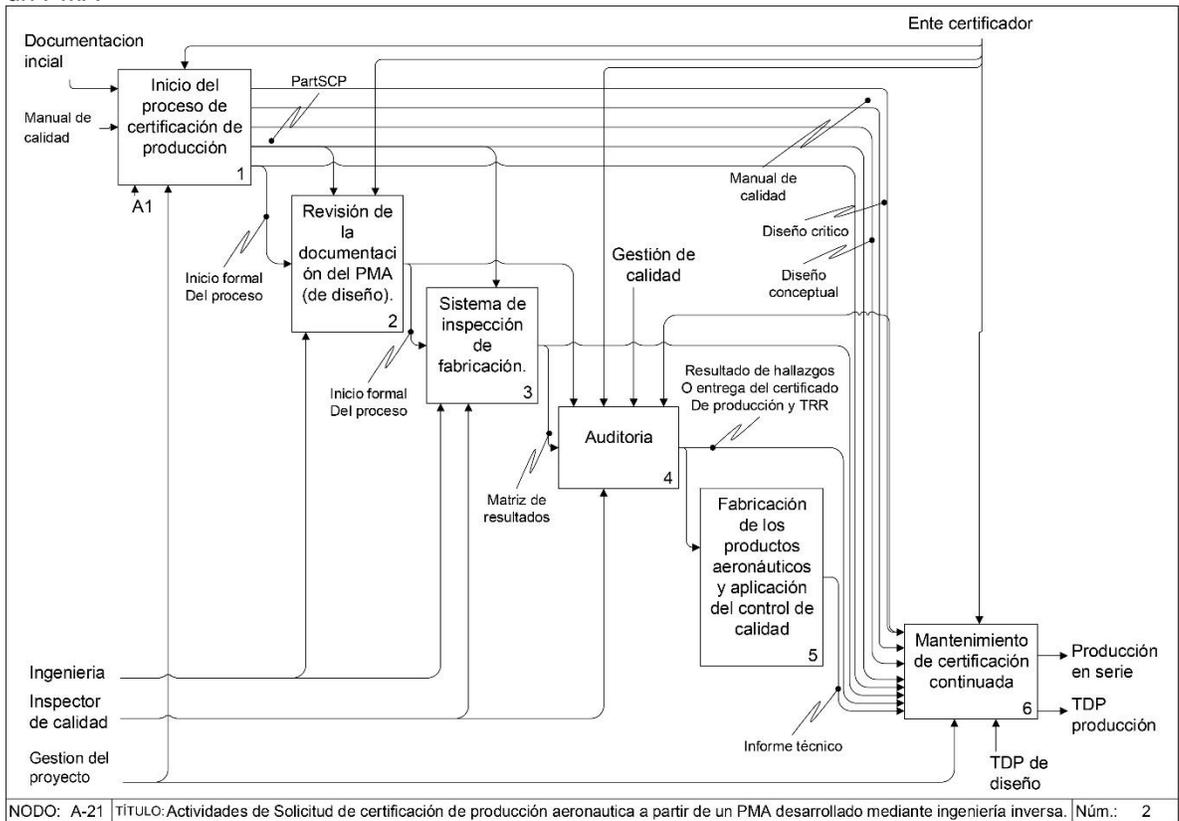
A-2	Solicitud de certificación de producción aeronáutica a partir de un PMA desarrollado mediante ingeniería inversa.
A-21	Actividades para solicitar un PMA de producción para productos aeronáuticos clase II o III mediante ingeniería inversa.
A-211	Inicio del proceso de certificación de producción.
A-212	Revisión de la documentación del PMA (de diseño).
A-213	Sistema de inspección de fabricación.
A-2131	Elaboración del sistema de inspección de fabricación
A-2132	Evaluación del Sistema de Inspección de fabricación
A-2133	Calificación del sistema de inspección de fabricación
A-214	Auditoria
A-215	Fabricación de los productos aeronáuticos y aplicación del control de calidad
A-216	Mantenimiento de certificación continuada

Fuente: Elaborado por los autores

10.3 Nodo A-21, Diagrama secundario de nivel superior: Actividades para solicitar un certificado de producción aeronáutica para productos aeronáuticos clase II o III mediante ingeniería inversa.

Después de tener un PMA desarrollado bajo las características pertinentes para este proyecto, se envía de manera formal la solicitud al ente certificador. Para lograr una certificación de producción efectiva es necesario tener como punto de partida la documentación inicial del PMA de diseño, donde se evalúa la información, si esta es efectiva se procederá con la calificación del sistema de inspección, seguido de una auditoria que valide dicho sistema, para entonces proceder a la fabricación de la producción. Es obligatorio que se desarrollen tareas para mantener la certificación de la producción basada en la aeronavegabilidad continuada específica de cada producto. La Figura 32 expone de manera clara este proceso⁶⁰.

Figura 32 Actividades para solicitar una certificación de producción aeronáutica a partir de un PMA



Fuente: Elaborado por los autores

⁶⁰ FAA, Production Approval Procedures, 2013 EN: Chapter 4. Parts Manufacturer Approval (Part 21, Subpart K), P. 4-1,4-116

10.3.1 Nodo A-211, Inicio del proceso de certificación de producción.

Para iniciar el proceso de certificación es necesario informar formalmente al ente certificador de las intenciones de continuar con el proceso de certificación, para dar pie a una fabricación en serie, cada en te certificador deberá poseer un formato para tal fin y este a su vez establecerá si hay cabida para continuar con el proyecto.

10.3.2 Nodo A-212, Revisión de la documentación del PMA (de diseño).

El proceso de revisión de la documentación existente de PMA de diseño, (único artículo) pretende hallar incongruencias que podrían dar cabida a errores que puede que se repliquen en serie de acuerdo con la producción. Dentro de los compromisos de la entidad que solicita la certificación, se establecerá que no existan modificaciones al diseño de tipo establecido por los lineamientos del PMA. De no ser así el ente certificador deberá reportar los hallazgos y tomar las medidas que apliquen.

10.3.3 Nodo A-213, Sistema de inspección de fabricación.

El sistema de inspección de fabricación debe ser continuado (si lo requiere) a partir del Establecimiento del sistema de inspección de fabricación, desarrollado en el momento de hacer el proceso de ingeniería inversa y su respectiva certificación (desarrollado en el Nodo A-11514). Este documento deberá ser parte del manual de calidad, que a su vez está basado en los estándares de calidad aeronáutica AS9100.

10.3.4 Nodo A-214, Auditoria

La evaluación del sistema de inspección de fabricación será evaluada basado en los procesos que el manual de calidad indique, si esta documentación no está lo suficientemente explícita, será el ente certificador quien recomiende las correcciones pertinentes, en ocasiones se tendrá que llegar a un acuerdo mutuo entre las partes para lograr dar cumplimiento en función de la capacidad instalada del fabricante. Si definitivamente la criticidad del componente exige un determinado estándar de inspección y la empresa no está en la capacidad de responder a estos requisitos, el ente certificador no permitirá la continuidad del proceso.

De acuerdo con los procesos de gestión del ente certificador, se deberá hacer un informe de auditoría en la cual se decidirá si este cumple o no con los requisitos establecidos, de no ser así el solicitante tendrá un plazo para hacer los cambios pertinentes, de no recibir respuesta de esta tarea en los tiempos establecidos, el ente certificador dará como finalizada la solicitud de producción.

Si el proceso continuo con éxito, el ente certificador emitirá un certificado de “términos de referencia y reconocimiento”

10.3.5 Nodo A-215, Fabricación de los productos aeronáuticos y aplicación del control de calidad

De acuerdo con la información desarrollada en el certificado de producción aeronáutica y sus respectivos, términos de referencia reconocimiento se procede a la fabricación de un lote en el cual la empresa está obligada a controlar la calidad de acuerdo a lo establecido en el proceso de certificación, este a su vez deberá emitir una tarjeta de conformidad de los componentes.

10.3.6 Nodo A-216, Mantenimiento de certificación continuada

El mantenimiento de la certificación continuada, anclado al concepto de aeronavegabilidad continuada, se refiere a los documentos que se debe calificar para mantener la aeronavegabilidad, estos documentos propiamente dichos, se refiere a las practicas, manuales, boletines, etc, relacionados con el diseño. Cabe resaltar que este concepto no está ligado a la realización de estas actividades, pues esto es llamado la gestión del mantenimiento de aeronavegabilidad donde intervienen la certificación de los talleres, las licencias del personal, trazabilidad de la calibración de los instrumentos, entre otros.

El ente certificador deberá programar junto con la empresa una serie de auditorías de seguimiento y evaluación para controlar el cumplimiento y el mantenimiento de las condiciones de certificación de producción aeronáutica.

Es necesario demostrar que la tarea relacionada con el mantenimiento de la certificación sea controlada de manera interna por la compañía; se debe dar un enfoque en los procesos inseguros y/o críticos, además de las acciones correctivas que el ente certificador vaya proponiendo a medida que van pasando las auditorias del mantenimiento de certificación continuada.

Es obligación del representante de la empresa mantener informado al ente certificador de cualquier anomalía del producto, debido a la fabricación y/o fallas del mismo. Si algunos de los procesos tienen un cambio de manera importante, es de obligatorio cumplimiento informar al ente certificador para establecer las tareas pertinentes

La UAEAC⁶¹ dicta las siguientes instrucciones para el mantenimiento de la aeronavegabilidad continuada y sus limitantes:

“a) El Titular de un Certificado Tipo o de un Certificado Tipo Suplementario, debe elaborar un manual de instrucciones de mantenimiento, el cual debe estar de acuerdo con las normas de aeronavegabilidad del país de diseño. Cuando el Certificado Tipo es otorgado por la UAEAC, debe estar además de acuerdo con las normas establecidas en la parte IV del presente Reglamento y los criterios de aeronavegabilidad para clases especiales de aeronaves definidas en el numeral 9.2.2.3 cuando sea aplicable.

b) El manual debe incluir por lo menos las limitaciones de aeronavegabilidad, las instrucciones para la aeronavegabilidad continuada, incluyendo las inspecciones periódicas que debe verificarse a la estructura, sus partes, componentes y sistemas; las frecuencias con que deben efectuarse tales inspecciones; las partes o componentes que tienen una vida limitada de uso; la aprobación de cambios para cualquier tiempo de reemplazo y las instrucciones para cambios de partes que deban tener un cuidado especial en su remoción o instalación.

c) El Titular del Certificado Tipo o Certificado Tipo Suplementario, debe entregar al comprador del producto, al mismo tiempo de la entrega del producto, al menos un juego completo del manual de mantenimiento.

d) El Titular del Certificado Tipo o Certificado Tipo Suplementario debe publicar cualquier cambio posterior que se apruebe en las instrucciones de aeronavegabilidad o mantenimiento del producto. El Titular del Certificado Tipo o Certificado Tipo Suplementario debe notificar de tales cambios a los usuarios inscritos en sus registros y estar disponible para cualquier persona involucrada en la utilización del producto y en el cumplimiento de las instrucciones.”

⁶¹ Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil. (2014). *Reglamento Aeronautico Colombiano, Parte 9, Certificación de tipo y fabricación de productos aeronáuticos. EN: 9.1.5.2. Instrucciones de mantenimiento, aeronavegabilidad continuada y limitaciones de aeronavegabilidad., P. 13.*

11. CONCLUSIONES

En este proyecto de grado se permitió determinar que la información proveniente la fase exploratoria y documental tiene un carácter ambiguo y por esto fue necesario optimizar el desarrollo de estos conceptos, dando más detalle a los procesos requeridos para desarrollar de manera genérica la ingeniería inversa de manera óptima con su posible certificación, desde el diseño hasta la producción. Esto implica que el modelo institucional de quienes desarrollen estas actividades, deberán desarrollarse de manera detallada para cada proyecto, estas a su vez deberán tener un carácter sistemático y estructurado en términos de talento humano, logística y capacidad; siempre acompañados por el ente certificador pertinente.

En relación con primer objetivo, en el modelado de procesos de ingeniería inversa, se concluye que es necesario (casi que de manera obligatoria) establecer un análisis económico-funcional, donde se desarrolle la información pertinente para establecer la viabilidad de un proyecto. Proveniente de este proceso, se obtendrá información valiosa como: la estimación de los costos para desarrollar la ingeniería inversa (incluyendo los costos de certificación), un análisis de mercado y un plan de gestión.

Por otro lado, procesos como los procedimientos de desensamble, el análisis de hardware y el diseño y desarrollo, estarán relacionados con el establecimiento del conocimiento técnico y administrativo imprescindible para dar resultados competitivos en comparación con las otras empresas que desarrollan estos procesos. Es en este tipo de actividades donde se requiere sincronizar departamentos (como los recomendados en este proyecto). También se da a entender la importancia de la correcta recolección de la información, el cual se desarrolla en el paquete de datos técnico (TDP), este dará pie a la fabricación y el control de calidad de los componentes aeronáuticos para su certificación PMA.

Se puede afirmar que es obligatorio, establecer procesos avalados por un ente certificador, los cuales permitirán las correctas prácticas de la ingeniería inversa. Es por esta razón que para el análisis de hardware, desde el punto de vista de la caracterización dimensional, se estableció un protocolo que permitirá orientar con un manual físico las correctas prácticas de medición directa. Basado en este protocolo se desarrolló la programación del software que automatiza el cálculo de la incertidumbre de medición y su respectivo informe metrológico. Esta etapa de investigación permitió iniciar un proceso en la SECAD donde se le dará una calificación la cual validará el uso de esta información en los proyectos desarrollado con esta metodología.

A continuación, la manufactura, la inspección y pruebas, permitirán hacer visible las decisiones que se tomaron hasta este punto, así que el correcto desarrollo de estas tareas, no solamente se ven reflejadas en la logística, costos y demás, sino

que también en la certificaron. Si las anteriores tareas no fueron planeadas de manera correcta, es posible que se producirán una gran cantidad de componentes no conformes.

En el segundo objetivo, referente al modelado de procesos para certificación PMA de productos desarrollados mediante ingeniería inversa, se concluye que es de vital importancia tener los métodos correctamente establecidos, pues antes de solicitar el inicio formal del proceso de certificación, la empresa ya deberá tener un manual de calidad establecido, un plan de certificación y un diseño (preliminar y crítico) concreto. Al igual que todo el proceso de ingeniería inversa, es necesario que siempre se esté acompañando de la UAEAC o la SECAD, en el caso de Colombia.

Cuando el proceso de certificación inicie formalmente, ya se ha avanzado de manera significativa en términos administrativos y de toma de decisiones para plantear y ejecutar un plan de ensayos eficaz. La recolección de manera sistémica de la información, obtenida de en estos procesos dan pie para generar el manual del producto la declaración del mismo y las prestaciones, acompañado del paquete de datos técnico finalizado. Bajo estas condiciones el ente certificador otorgara el certificado PMA.

Para la realización de la producción proveniente de los procesos de las dos guías anteriores, se da cabida al tercer objetivo, en la cual se concluye que se requiere haber desarrollado de manera correcta la certificación PMA de diseño y que no se hayan modificado de manera significativa los procesos que se requieren para dicho fin, si es así, ya se puede establecer un sistema de inspección de fabricación con una producción que garantice la reproducibilidad y la repetitividad. Después de tener una auditoria, para su posterior fabricación ya se podrá obtener el certificado de producción aeronáutica, esto no quiere decir que el proceso termina allí, sino que por el contrario se deberá desarrollar el mantenimiento de la certificación continuada.

12. RECOMENDACIONES

La investigación determina que si bien se completaron los objetivos de crear una serie de guías para desarrollar productos aeronáuticos mediante ingeniería inversa es necesario que las empresas (o entidades que desarrollen estos productos) se basen en este modelo genérico y desarrollen sus propios procedimientos, ya que es en el detalle de todas las tareas donde se obtiene el conocimiento técnico y administrativo imprescindible de la empresa.

Se recomienda en principio que no se desarrollen proyectos de ingeniería inversa de componentes de múltiples sistemas, en una misma empresa, debido a que es importante es necesario especializar el conocimiento en términos de hardware aeronáutico.

Para futuras investigaciones se recomienda revisar los futuros repositorios de información que la industria militar generará a lo largo de los años, estas oficinas se crearan con el objetivo de disminuir los costos de adquisición de información y ayudara a desarrollar mayor cantidad de proyectos de esta índole.

13. BIBLIOGRAFÍA

- American Society of Mechanical Engineers. (2012). *ASME Y14.24 metric drawing sheet size and format*.
- CENAM. (2014). *Guía Para Estimar La Incertidumbre De La Medición*. MEXICO.
- DEPARTMENT OF DEFENSE HANDBOOK. (2016). *MIL-HDBK-115C(ARMY)*. US ARMY.
- Draft Federal Information. (1993, 12 21). *Integration Definition For Function Modeling (IDEF0)*. Retrieved from <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/FIPS/fipspub183.pdf>
- Eldessouky, H. a.-S. (2010). *Development and Assessment of a Reverse Engineering Framework for Spare Parts*. University of Bath.
- FAA. (2001). *MIL DTL 31000C, Detail Specification Technical Data Packages*.
- FAA. (2013). *ORDER 8120.22 Production Approval Procedures*.
- FAA. (2014). *8110.42D Parts Manufacturer Approval Procedures*.
- FAA. (2014). *AC_21_303-4 Application For Parts Manufacturer Approval Via Tests And Computations Or Identicality*.
- FAA, U. D. (2013). *Production Approval Procedures*.
- Harun, K. C. (2012). *An integrated modeling method for assessment of quality systems applied to aerospace manufacturing supply chains*. Journal Intelligent Manufacturing, .
- Khair Harun, K. C. (2010). *An integrated modeling method for assessment of quality systems*. Springer Science+Business Media.
- Reglamento Aeronautico Latinoamericano, Certificacion de Aeronaves y Componentes Aeronauticos*. (2014).
- SAE International. (2016-09). *Sistemas de gestion de calidad - Requisitos para las organizaciones de aviación, espacio y defensa*. AENOR.
- Standards, D. F. (1993). *Integration Definition For Function Modeling (Idef0)*.
- UAEAC. (s.f.). *Reglamentos aeronauticos de Colombia, Certificación De Tipo Y Fabricación De Productos Aeronáuticos*. Bogota.

Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil. (2014). *Reglamento Aeronautico Colombiano, Parte 9, Certificación de tipo y fabricación de productos aeronáuticos*.

WANG, W. (2011). *Reverse engineering, technology of reinvention*. New York: Taylor and Francis Group.

ANEXOS

ANEXO A: PROCEDIMIENTO PARA LEVANTAMIENTO DIMENSIONALES POR MEDICIÓN DIRECTA

1. PROPÓSITO

En esta guía se describen las metodologías y técnicas aceptables para cumplir con los requisitos de calidad del proceso de metrología. La intención de este protocolo es ayudar a los ingenieros y contratistas de sistemas de la industria aeronáutica, implementación y operación de sistemas de metrología, calibración y medición.

2. APLICABILIDAD

El protocolo de mediación acá desarrollado se observa desde el punto de vista de una entidad que requiera desarrollar una pieza mediante ingeniería inversa de un producto aeronáutico, dando validez trazabilidad de la medición, en el paquete datos técnicos (TDP) de las piezas y frente al ente certificador en el momento de solicitar un PMA.

Este protocolo de medición está centrado en mediciones directas con técnicas de contacto, incluye la utilización de herramientas, como calibrador (pie de rey), micrómetro, goniómetro, galgas de radios, galgas de espesores, galgas pasa no pasa, galgas de soldadura etc.

3. CONSIDERACIONES

Se entiende que, en el momento de desarrollar la medición de los especímenes, estos ya deben estar clasificados y limpiados, en el momento de desarrollar los procedimientos de desensamble. Los registros y documentación de los componentes se deben entregar al equipo de metrología para continuar con una logística efectiva; Información como, aeronave, matrícula, serie número; parte número tendrán gran importancia para este fin.

En una actividad anterior se tuvo que hacer una inspección técnica que avalara la pieza donde se revise si tiene golpes, abolladuras, imperfectos, y/o corrosión (a menos que sea obligatorio el uso de estas piezas, no se recomienda aplicar a una solicitud de PMA).

Si es necesario tener un valor de espesor de pintura, se recomienda hacerlo antes de realizar este protocolo, apoyándose del manual u otro método que la entidad que desarrolla la medición posea.

También es de aclarar que para iniciar el desarrollo de la ingeniería inversa se hizo un análisis económico/funcional con un equipo técnico interdisciplinar, donde se evaluaron los costos basados en los equipos de medición solicitados, estos, deben estar correctamente calibrados y con el certificado de calibración vigente.

4. IDENTIFICACIÓN DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES

Es necesario tener un control de condiciones ambientales, que pueden afectar la medición, las variables importantes son la temperatura, humedad. La normativa estándar ISA-71.01-1985 indica los rangos de temperatura y humedad permisible para que la medición tenga la menor incertidumbre. Las organizaciones que tienen un laboratorio dispuesto para metrología pueden recolectar el historial automáticamente, donde indique si los parámetros se encuentran dentro del rango establecido. De no ser así la medición se recomienda catalogarla como no válida.

5. GENERACIÓN DE BASE DE DATOS DE EQUIPOS DE MEDICIÓN

Si bien en actividades anteriores se han asignado las piezas para medición con determinada herramienta de medición es necesario tener una base de datos de las mismas donde se incluyan las incertidumbres de medición. Es de aclarar que si se tiene un tipo herramientas con misma marca y mismo parte número estas tendrán un valor de incertidumbre de medición particular para cada una.

6. SELECCIÓN DE CANTIDAD DE MEDICIONES

Se recomienda que cada medición sea al menos cinco (5), debido a que esto contribuye a la que la incertidumbre de repetividad se estime de manera efectiva

7. SELECCIÓN DE LOS PUNTOS DE MEDICIÓN

- a. Seleccione los puntos característicos para que la pieza pueda ser dibujada en un software de diseño asistido por computador, y su posterior programación en un programa de manufactura asistida por computador (CAM), la importancia de seleccionar estos puntos corresponderá con las medidas cercanas, no importa si las medidas son redundantes, más a delante se podrá seleccionar la información adecuada. Recuerde que el tipo de medición dependerá de la

herramienta y esta a su vez del error de la medición, si usa un calibrador pie de rey para medir un redondeo seguramente el error será muy alto debido a que no hay un punto específico para ubicar la herramienta, existen muchos casos como este en los que se debe estar atento. Esta perspectiva va mejorando con la experiencia.

- b. Enumere los puntos de medición, puede ser un número o una letra, lo importante es tener una secuencia
- c. genere un plano de control dimensional del componente y ubique los puntos bautizados

8. MEDICIÓN

Inicie la medición con la técnica y la herramienta adecuada para tal fin y documéntela, tenga en cuenta los factores que afectan la medición en el siguiente numeral.

Uno de los factores importantes a tener en cuenta en la ejecución de la medición es la técnica de quien ejecuta la medición, pues se requiere haber hecho mucha práctica para lograr una medición certera, eficiente y asertiva, pues contrario a la creencia cotidiana esta actividad no solo se limita a ubicar determinada herramienta de medición en una parte del espécimen, sino hay que saber hacerlo de la manera correcta, desde como tomar la herramienta hasta las condiciones bajo las que se hacen, es importante estar actualizándose y capacitándose.

9. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

De acuerdo con la información recogida, es importante documentar la incertidumbre de la medición, para establecer si se puede o no darle validez a la misma, o si por el contrario se debería realizar el dimensionamiento con equipos más especializados o con menor resolución.

A continuación, se enumeran las ecuaciones útiles para el cálculo de dicha incertidumbre:

A Medición de longitudes

- a. La función que rige la medida para este caso es:

$$l = l(\text{leída}) + \delta(\text{resolución}) + \delta(\text{repetibilidad}) + \delta(T^{\text{a ambiente}}) + \delta(\text{deriva}) \quad [1]$$

Siendo δ la corrección de la medida y l la medida corregida

b. Al utilizar la Ley de Propagación de las Varianzas se tiene:

$$u^2(l) = u^2(l_{leída}) + u^2(\delta_{resolución}) + u^2(\delta_{repetibilidad}) + u^2(\delta_{T^a ambiente}) + u^2(\delta_{deriva}) \quad [2]$$

Donde $u(l_{leída})$ (también llamada incertidumbre de calibración) es la contribución que tiene el instrumento como tal, este valor se encuentra en el certificado de calibración y va cambiando con el uso de la herramienta, este es uno de los criterios para dar de baja una herramienta de medición. Para obtener un dato certero de esta magnitud, se deberá aplicar la siguiente ecuación:

$$u_{calibracion} = \frac{I_{calibracion}}{k} \quad [3]$$

Donde k es el factor de cobertura de la calibración, usualmente se usa el valor de dos, pero sin embargo el valor de este factor también estará en el certificado de calibración de la herramienta

$u(\delta_{resolución})$ Es el factor de corrección debido a la mínima medición del instrumento, la manera de calcularla es:

$$u(\delta_{resolución}) = \frac{division\ de\ escala}{2\sqrt{3}} \quad [4]$$

$u(\delta_{repetibilidad})$ Es la incertidumbre que se genera debido a la falta de repetitividad de la herramienta de medición, esta expresado en forma de desviación típica en el certificado de calibración como:

$$u(\delta_{repetibilidad}) = \frac{s_{n-1}}{\sqrt{n}} \quad [5]$$

Donde n es el número de mediciones

$u(\delta_{T^a ambiente})$ Se refiere a la contribución producida por la dilatación del material con el que está hecha la herramienta de medición debido a la temperatura a lo largo del proceso de medición se expresa como:

$$u(\delta_{T^a}) = \frac{\alpha \Delta T^a l}{\sqrt{3}} \quad [6]$$

Donde α es el coeficiente de dilatación del material, ΔT^a la diferencia de temperatura en el sitio de medición con respecto al valor normal 20°, y l la longitud arrojada por la herramienta

$u(\delta_{deriva})$ Es la contribución del paso del tiempo desde la última calibración del aparato de medición, este valor se obtiene del historial de calibraciones, lo más lógico es que en cada calibración el valor de la incertidumbre de la herramienta índole aumente, si no se tiene acceso a informes anteriores se puede estimar con el doble del valor de la resolución. Por el contrario se puede usar la ecuación:

$$u(\delta_{deriva}) = \frac{\text{derivada maxima}}{\sqrt{3}} \quad [7]$$

B MEDICIÓN DE ÁNGULOS

a. La función que rige la medida para este caso es:

$$\alpha = \alpha(\text{leída}) + \delta(\text{operario}) + \delta(T^a \text{ ambiente}) + \delta(\text{deriva}) \quad [8]$$

Aplicando la ley de la varianza se obtiene:

$$u^2(\alpha) = u^2(\alpha_{\text{leída}}) + u^2(\delta_{\text{operario}}) + u^2(\delta_{T^a \text{ ambiente}}) + u^2(\delta_{\text{deriva}}) \quad [9]$$

Donde:

$$u(\alpha_{\text{leída}}) = \frac{|\text{error}|}{\sqrt{3}} + \frac{I_{\text{calibracion}}}{k} \quad [10]$$

El error es un valor que se encuentra en el certificado de calibración

$u(\delta_{\text{operario}})$ Se refiere al error que puede ocurrir en el momento de ubicar la herramienta de medición y está dada por:

$$u(\delta_{\text{resolución}}) = \frac{\text{division de escala}}{2\sqrt{3}}$$

Nota: este procedimiento se encuentra en fase de calificación por parte del ente certificador

ANEXO B: INSTRUCTIVO INTERFAZ GRÁFICA
"AERONAUTICALMETRLOGIC" PARA MEDICIONES DIRECTAS.

1. PROPÓSITO

El presente programa informático fue desarrollado con el fin de facilitar los levantamientos dimensionales, en término de eficiencia y eficacia.

- A Ejecute el programa, si el programa se utilizara por primera vez, permita que se instale, esto se hará una sola vez, aparecerá una interfaz de inicio.



- B cree un nuevo proyecto dando clic en el primer icono, (es posible abrir un nuevo archivo o abrir un proyecto demostrativo en este punto)



- C Complete la información de la medición, como unidades condiciones iniciales ambientales y la cantidad de muestra, (se recomienda utilizar 5), identificación del componente y la configuración de la medición, puede modificar las propiedades de las tablas dando clic derecho

The screenshot shows the 'Medición' (Measurement) window with three main sections:

- IDENTIFICACIÓN DEL COMPONENTE:** A table with columns 'IDENTIFICACIÓN DEL COMPONENTE' and 'DESCRIPCIÓN'. Rows include: Aeronave, Matricula, Espécimen, Número de serie, Número de Parte, Número de Lote, Comentarios, Componente nuevo, and Componente producto de un ...
- CONDICIONES AMBIENTALES:** A graph showing 'Temperatura (°C)' and 'Humedad (%)' over time. Below the graph, 'Valores Medios' (Average Values) are shown: Humedad: 0, Temperatura: 0.
- CONFIGURACIÓN DE MEDICIÓN:** A table with columns 'CONFIGURACIÓN DE MEDICIÓN' and 'DESCRIPCIÓN'. Rows include: Fecha de medicion, Hora de Inicio, Hora Final, Duración, Responsable de la medición, Departamento, Revisión de la medición, Laboratorio de medición, Laboratorio Certificado?, and Ciudad de medición.
- Unidades:** Radio buttons for selecting units: Milímetros, Pulgadas, Psi-Pulgada, Centímetros, Metros, and Pie.
- Cantidad de Muestras:** A numeric input field set to 5.
- Reporte de Hallazgos:** A text area for reporting findings.

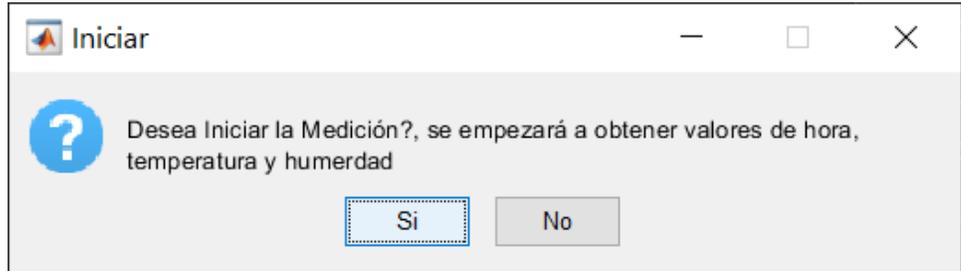
- D a continuación, se le pedirá alimentar la biblioteca de herramientas en las cuales se deberá llenar los espacios basado en los informes de calibración de los componentes. Si se tienen dos herramientas con el mismo parte número se deberá bautizar cada uno de manera independiente con un nombre distinto. Al finalizar haga clic en continuar (recuerde que puede volver a la biblioteca de herramientas cuando lo requiera)

The screenshot shows the 'Biblioteca de Herramientas' (Tool Library) window with a table of calibration data:

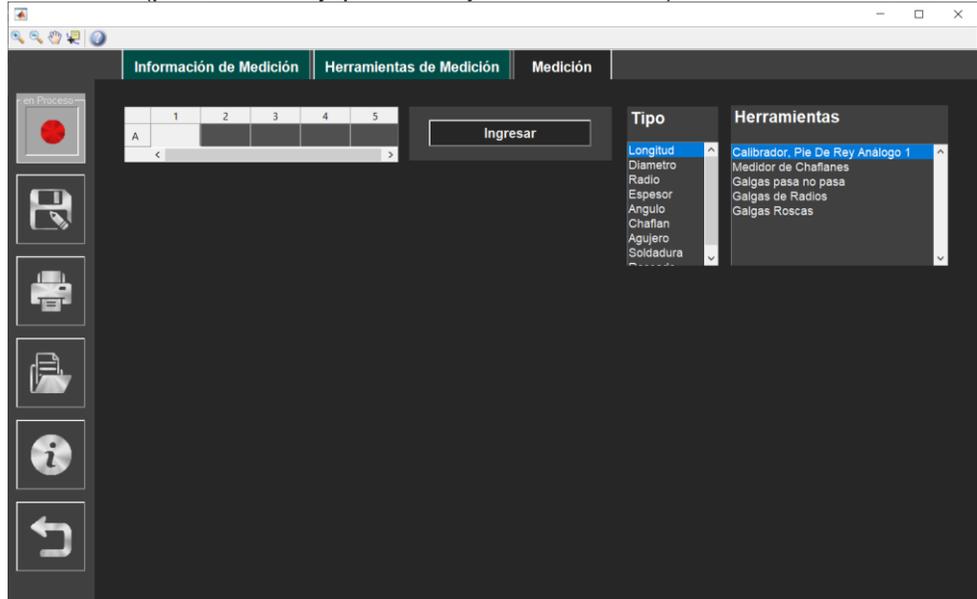
NOMBRE DE HERRA.	MARCA Y MODELO	PORTE NÚMERO	SERIE NÚMERO	FECHA VTO.(dd/mm...)	TRAZABILIDAD	U (INCERTIDUMBRE)	DIVISIÓN DE ESCALA
Calibrador, Pi...	Discover	4530-6	Desconocido	26/11/2020	19-SAE-9876D*	0.0025	0.05
Medidor de Ch...	INSIZE	4844-1	Desconocido	30/05/2020	20-SAE-8654D*	0.02	0.5
Galgas pasa n...	Eboot	Desconocido	Desconocido	30/05/2020	20-SAE-6548...	0.0025	0.5
Galgas de Ra...	Beta	1707A/1	Desconocido	30/05/2020	20-SAE-9876D*	0.002	0.5
Galgas Roscas	Insize 4820	122	9532	30/05/2020	20-SAE-9878D*	0.002	0.5

At the bottom of the window, there are three buttons: 'Agregar' (Add), 'Importar' (Import), and 'Exportar' (Export).

E inicie la medición dando clic en “si” para iniciar el proceso de medición.



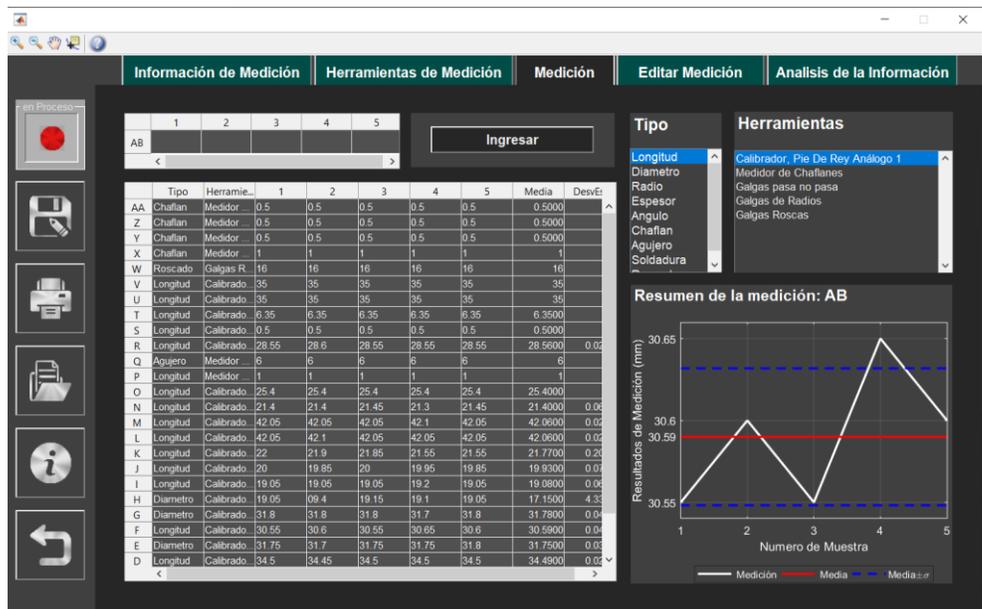
F ingrese cada medida en la casilla de entrada, seleccionando la herramienta utilizada y el tipo de medición. A continuación de clic en ingresar. El programa generará una grafica informativa donde se visualiza los valores ingresados, el valor medio, la desviacion estandar y un limite de control inferior y superior basado en la desviacion estandar (por encima y por debajo de la media)



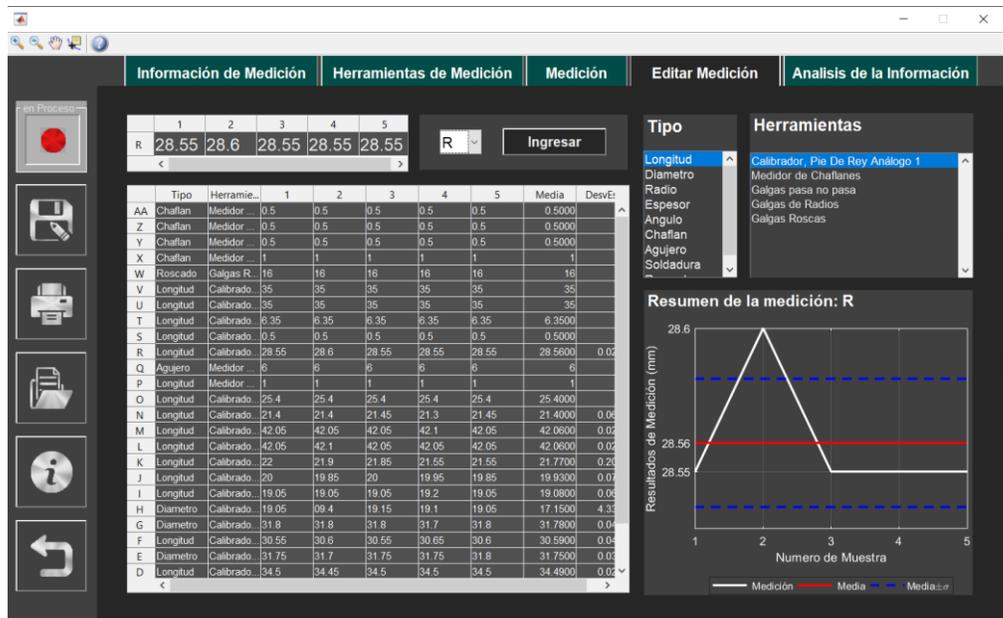
G selecciones la herramienta que utilizó en la medición

H Analice la información

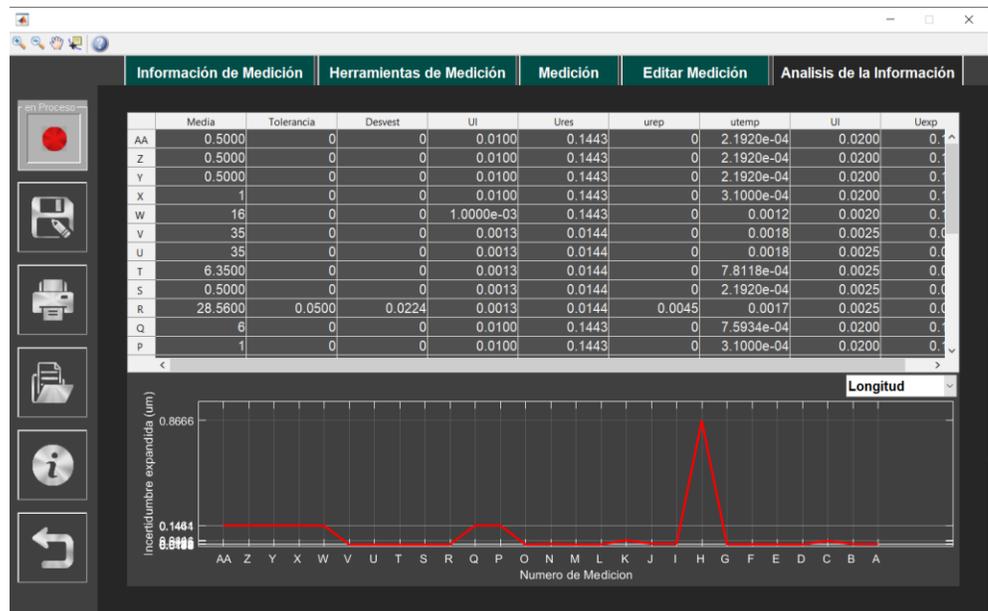
Se puede evidenciar en la siguiente imagen que en el panel “Resumen de la medición” se encuentra documentado toda la información que se ha ingresado, para entender esta tabla en la parte inferior izquierda se observa el número de medición versus el valor del mesurado de color verde, en rojo se encuentra el valor de la media aritmética de la medición y como límite de control superior y límite de control inferior aparecerá de color azul representando los valores de desviación estándar por encima y por debajo de la media aritmética



- I Modifique la información
 Para modificar una medición de clic en la pestaña “editar medición”, y seleccione la medición que quiera modificar en el pop-up, ingrese la información necesaria y de clic en el botón “ingresar”



- J Para ver la información de la incertidumbre calculada de clic en la pestaña “análisis de la información”



K Genere el informe dando clic en el icono de la impresora, verifique que ningún archivo anterior de Excel este abierto.

ANEXO C: SOFTWARE AERONAUTICALMETROLOGIC

para levantamiento dimensional por medio de medición directa se creó una interfaz gráfica en el software Matlab, el cual, hace un compendio de la herramienta usada, las condiciones de la medición, la medición, la incertidumbre de la medición y la generación del informe metrológico. Se adjunta archivo digital con un instalador

Nota: este software se encuentra en fase de calificación por parte del ente certificador