

Trabajo Fin de Grado

Ingeniería Aeroespacial

Propuesta para la trazabilidad de equipos de medida en el sector aeronáutico

Autor: Ismael González Garrido

Tutor: Domingo Morales Palma

Cotutor: Antonio Rafael Cala Romero

Dep. de Ingeniería Mecánica y Fabricación
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016



Trabajo Fin de Grado
Ingeniería Aeroespacial

Propuesta para la trazabilidad de equipos de medida en el sector aeronáutico

Autor:

Ismael González Garrido

Tutor:

Domingo Morales Palma

Profesor Contratado Doctor

Cotutor:

Antonio Rafael Cala Romero

Dep. de Ingeniería Mecánica y Fabricación

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016

Trabajo Fin de Grado: Propuesta para la trazabilidad de equipos de medida en el sector aeronáutico

Autor: Ismael González Garrido

Tutor: Domingo Morales Palma

Cotutor: Antonio Rafael Cala Romero

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2016

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

Este Trabajo Fin de Grado ha sido la guinda a seis años de estudio en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla. En estos años, palabras como esfuerzo, constancia, sacrificio, amistad, amor y satisfacción me han acompañado.

Quienes me conocen saben que este ha sido un período dulce para mí. He tenido la oportunidad de rodearme de profesores y amigos con los que crecer, tanto personal como académicamente; y disfrutar de cada segundo de mi carrera universitaria.

Más allá del logro alcanzado, me quedo con todas las lecciones aprendidas y con el disfrute que ha supuesto cada momento vivido. Hace poco una amiga me enseñó una cita de Martin Luther King que encaja perfectamente con mi forma de sentir la vida:

“Even if I knew that tomorrow the world would go to pieces, I would still plant my apple tree”

A mi familia, por todo el amor y el apoyo que me ofrecen; y en especial a mi madre, Cristina, pues es el pilar de todo cuanto he alcanzado y pueda alcanzar, y la que siempre me ha inculcado preciosos valores que ninguna escuela jamás podría darme.

A mis amigos, por su apoyo y cariño, y en especial a José Manuel y a Enrique, quienes se merecen más que un agradecimiento.

A María José, por todo el amor que me da y suponer mi punto de apoyo en cada momento.

A mi tutor, por su excelente trato y ayuda en este proyecto.

A Ricardo y Antonio, a quienes estaré etérnamente agradecido por todo lo que me han enseñado y los valores que me han transmitido en el comienzo de mi carrera profesional. Concretamente a Antonio, sin el cual este proyecto no sería una realidad.

A mis compañeros de residencia, por todos los buenos momentos vividos.

A ti, Silva, porque a pesar de todo sigues estando presente en cada momento de mi vida. Eres una de esas personas.

Ismael González Garrido

Sevilla, 2016.

Resumen

La aeronáutica es un campo complejo, regido por un entramado de Normativas que confluyen dando lugar a Sistemas de Gestión de Calidad robustos. En particular, la UNE-EN 9100 nos exige la calibración y mantenimiento de todas las herramientas y equipos de medida utilizados en producción. Con más detalle, define un requerimiento de registro de todos los equipos de medida empleados para dar conformidad a nuestros productos.

Este requerimiento es el punto de partida de nuestro proyecto, que surge ante la necesidad de alinearnos con esta Normativa pero buscando una solución que minimice el impacto industrial que supone el registro directo de todos los equipos de medida utilizados. Nuestro ejercicio se centrará en una propuesta de un criterio a emplear para clasificar los equipos de medida, según su naturaleza y la tarea para la que van a ser empleados, en distintos grupos para los que se establecerán sistemas de trazabilidad adecuados a sus características. De esta forma, buscamos reducir el coste asociado al registro directo.

Como herramienta de clasificación vamos a utilizar la técnica del FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*), que desarrollaremos en esta obra. Asimismo, nuestro análisis contemplará criterios técnicos de evaluación de fallos así como los datos característicos de los equipos de medida y las características de nuestro sistema de producción.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Índice	xiii
Índice de Tablas	xv
Índice de Figuras	xvii
1 Introducción. contexto del proyecto	1
1.1. Contexto del Proyecto	1
1.2. Punto de partida	4
1.3. Objetivo del Proyecto	5
2 ¿Qué es un FMEA?	7
2.1. Historia de FMEA	7
2.2. ¿Qué es un FMEA?	8
2.3. Tipos de FMEA	8
2.4. Estructura de un FMEA	9
3 Propuesta de análisis	11
3.1. Listado de tareas y herramientas	12
3.2. ¿La tarea de conformidad al producto?	14
3.3. Ocurrencia	16
3.4. Severidad	18
3.5. Detectabilidad	23
4 Resultados y discusión	25
4.1. GRUPO 1 DE CRITICIDAD	26
4.2. GRUPO 2 DE CRITICIDAD	26
4.3. RPN límite	27
4.4. Reparto por grupos	30
5 Conclusiones y trabajos futuros	33
5.1. Trabajos futuros	33
5.2. Comparación con otras alternativas consideradas	34
5.3. Conclusiones	35
Referencias	37

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Estructura general de un FMEA	9
Tabla 3-1. Esquema de listado de tareas y herramientas de nuestro FMEA	12
Tabla 3-2. Ejemplo de listado de tareas y herramientas	13
Tabla 3-3. Ejemplo de tareas que no dan conformidad al producto	15
Tabla 3-4. Esquema de módulo de Severidad	20
Tabla 3-6. Esquema de módulo de Detectabilidad	23
Tabla 4-1. Ejemplo de justificación de RPN límite	28
Tabla 4-2. Valores de FMEA para ejemplo de instalación de THSA	29
Tabla 4-3. RPN resultante al variar la Severidad	30
Tabla 4-4. RPN resultante al variar la Detectabilidad	30
Tabla 4-5. RPN resultante al variar la Ocurrencia	30
Tabla 4-6. Número de conjuntos tarea-equipos de medida correspondientes a cada grupo	31

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Layout típico en fabricación aeronáutica	2
Figura 1-2. Esquema de ciclo iterativo en FMEA	2
Figura 1-3. Esquema de Normativas que conforman nuestro Sistema de Calidad	3
Figura 1-4. Normativas ISO, IAQC y NATO	3
Figura 1-5. Normativas que complementan a la UNE-ISO 9001	4
Figura 3-1. Código de identificación de líneas de nuestro FMEA	12
Figura 3-2. Operación de montaje de orejetas en THSA	16
Figura 3-3. Árbol de decisión de Ocurrencia	17
Figura 3-4. Escala de Ocurrencia	18
Figura 3-5. Relación entre error considerado y error de calibración	19
Figura 3-6. Distancias de seguridad en instalación eléctrica	19
Figura 3-7. Escala de Severidad	22
Figura 4-1. Proceso de evaluación propuesto	25
Figura 4-2. Zona de instalación del THSA	28
Figura 4-3. Detalle de instalación de bulones de cogida del THSA	29
Figura 4-4. Número de conjuntos tarea-equipo de medida correspondientes a cada grupo	31

1 INTRODUCCIÓN. CONTEXTO DEL PROYECTO

La aeronáutica es sin duda alguna una de las ramas más complejas de la ingeniería. ¿Quién no se ha preguntado alguna vez cómo es posible que vuelen los aviones? Si bien esta respuesta se contesta con una sencilla explicación basada en conceptos básicos de mecánica de fluidos, es cierto que desde el principio de Bernoulli enunciado en 1737 hasta un avión, tal y como lo concebimos hoy en día, hay detrás todo un mundo de tecnología.

Otra característica del sector aeroespacial es el alto grado de innovación que tiene asociado. Desde el vuelo de los hermanos Wright a principios del siglo XX, con apenas un siglo de edad, el avión es una de las creaciones más vanguardistas de nuestra época.

Por último, pero en este caso, más importante, es este sector uno de los más concienciados con la seguridad. En este ámbito, desde sus primeras fases, cualquier desarrollo aeronáutico es conservador, diseñando sistemas robustos, empleando métodos de fabricación fiables y realizando pruebas funcionales a todos los niveles.

Bajo esta filosofía surge nuestro proyecto. Se trata de mejorar el sistema de calidad de nuestra empresa, buscando una solución que minimice el impacto industrial pero siempre velando por la seguridad y la solidez de los procesos de producción.

1.1. Contexto del Proyecto

La fabricación de una aeronave es como hemos dicho un proceso increíblemente complejo. Atendiendo al contenido de la bibliografía, el montaje de una aeronave se lleva a cabo de forma manual, siendo el producto el que se mueve por la planta a lo largo de distintas estaciones, tal y como se muestra en la figura.

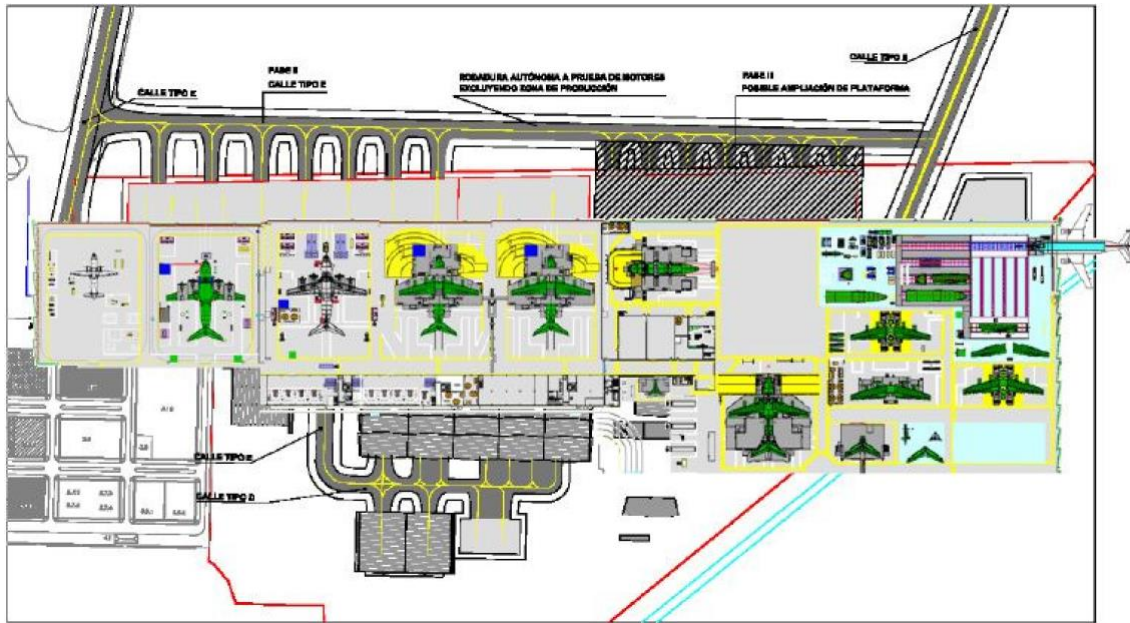


Figura 1-1. Layout típico en fabricación aeronáutica

Esta forma de fabricación es sin duda la más óptima puesto que permite la especialización de cada estación en las tareas que se llevan a cabo en la misma (curva de aprendizaje, utillaje y herramientas específicas para cada estación, etc.). A pesar de lo optimizado que está este proceso, tal y como comenta Galván en su obra y desarrollaremos después, la técnica del FMEA – que empleamos como herramienta fundamental en nuestro proyecto – es un proceso iterativo continuo y sin fin; ¡Siempre hay algo que mejorar!

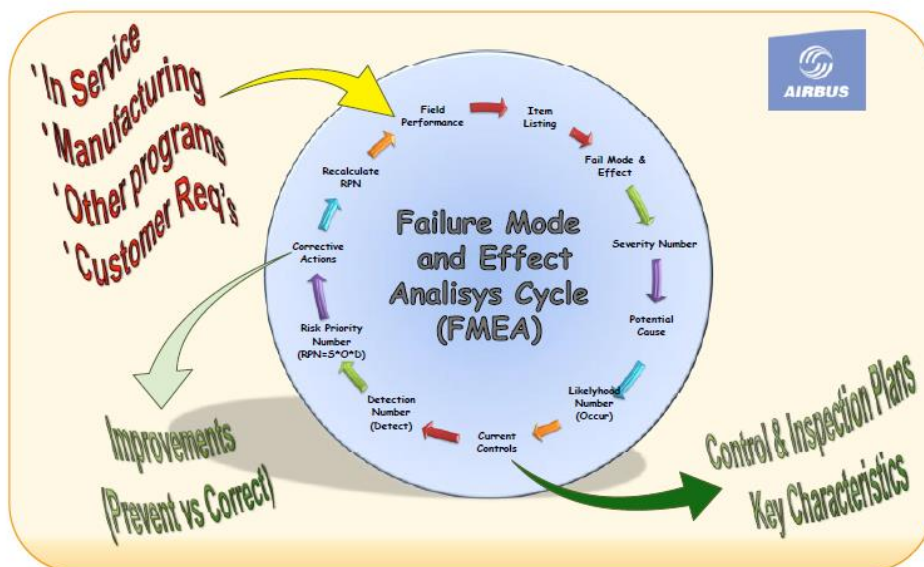


Figura 1-2. Esquema de ciclo iterativo en FMEA

La fabricación aeronáutica tiene una estructura de normas y reglamentos a cumplir, a través de ellos llegamos a Sistemas de Calidad regulados por certificaciones como las UNE-EN 9100/9110/9120, la UNE-ISO 9000/9001/9004 o las AQAP 2110/21020/2130/2131/2210.

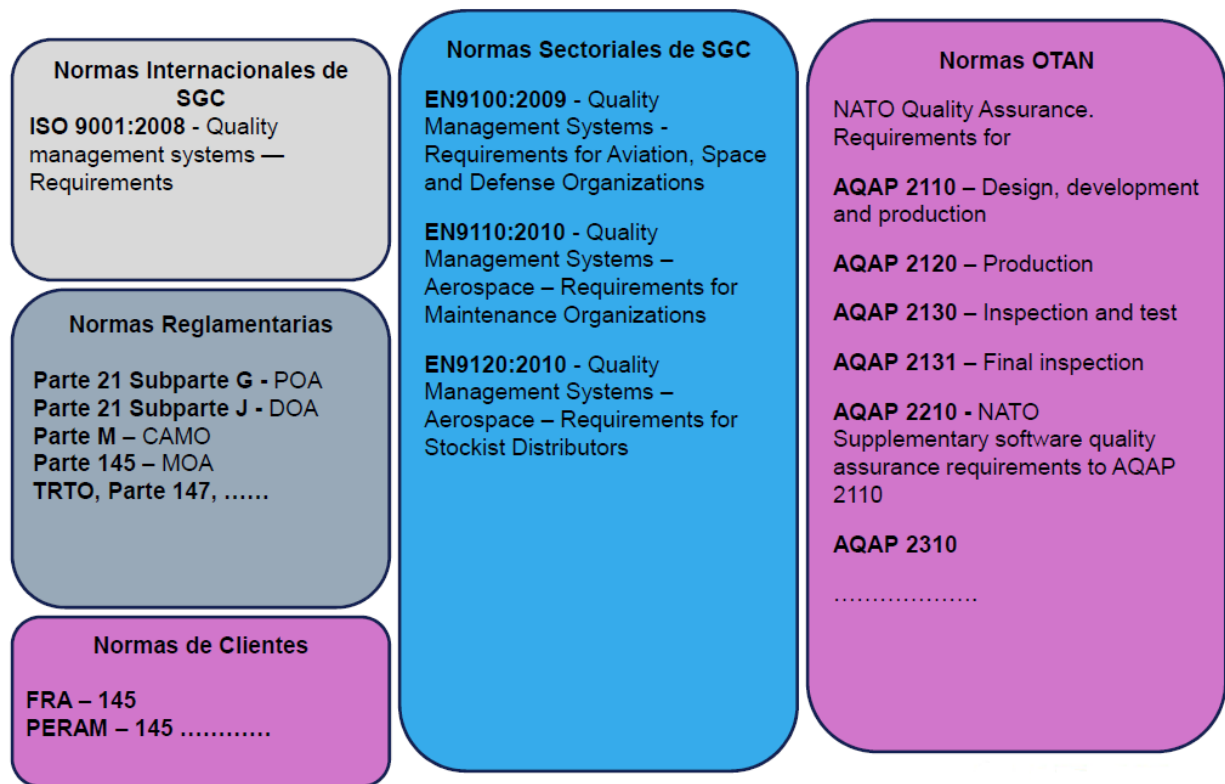


Figura 1-3. Esquema de Normativas que conforman nuestro Sistema de Calidad

ISO

ISO 9000:2000	Quality Management Systems. Fundamentals and Vocabulary.
ISO 9001:2000	Quality Management Systems. Requirements.
ISO 9004:2000	Quality Management Systems. Guidelines for performance improvements.

IAQG

EN 9100	Aerospace series. Quality Management Systems. Requirements.
EN 9110	Aerospace series. Quality Management Systems. Model for quality assurance applicable to maintenance organizations.
EN 9120	Aerospace series. Requirements for stockist distributors.

NATO

AQAP 2110	NATO Quality Assurance Requirements for Design, Development and Production.
AQAP 2120	NATO Quality Assurance Requirements for Production.
AQAP 2130	NATO Quality Assurance Requirements for Inspection and Test
AQAP 2131	NATO Quality Assurance Requirements for Final Inspection
AQAP 2210	NATO Supplementary SW Quality requirements to AQAP 2110.

Figura 1-4. Normativas ISO, IAQC y NATO

Las normas UNE-EN establecen requerimientos enfocados al sector aeroespacial, complementando a la UNE-ISO 9001, tal y como observamos en el siguiente esquema:



Figura 1-5. Normativas que complementan a la UNE-ISO 9001

Entre otros requerimientos, la EN9100 exige la calibración y mantenimiento de todas las herramientas y equipos de medida utilizados en producción (para más información véase apartado 7.6 de la EN9100:2009. De hecho, nuestro proyecto surge como acción correctora tras una auditoría fallida en la que se detecta que nuestra empresa no cumple con los estándares establecidos en esta normativa.

En nuestro caso, el departamento de Metrología asigna a cada herramienta un ciclo de calibración así como unos márgenes de error aceptables. Cuando llega la hora de calibrar una herramienta, además de esto, se ha de comprobar cuál es el grado de descalibración del equipo y ver si éste supera o no los límites establecidos como aceptables.

Pensemos ahora en el caso de que se descubre que un equipo está fuera de los límites de calibración. En este momento surgen las siguientes preguntas, ¿cuánto tiempo puede llevar fuera de calibración: una semana, dos meses, todo el ciclo?, ¿en qué productos/tareas se ha usado esa herramienta?, ¿están esos productos ya entregados?, ¿es una herramienta que se use en una sola estación o en varias?...

Ante esta problemática y la necesidad de alinearnos con los requerimientos de nuestro Sistema de Calidad, surge la necesidad de tomar acciones en cuanto a tener un control sobre dónde y cuándo se usa cada herramienta, es decir, ser capaces de llevar a cabo la trazabilidad de los equipos de medida que usamos. Esta situación constituye el punto de partida de nuestro proyecto.

1.2. Punto de partida

Encontramos de este modo una importante oportunidad de mejora a nivel de empresa. Ahora, con el objetivo claro, sólo nos falta asentar cuáles serán las reglas del juego pues, son muchos los parámetros a tener en cuenta en un proyecto de estas dimensiones: la seguridad, el impacto industrial, la ergonomía, la viabilidad tecnológica, la compatibilidad con el proceso actual, los requerimientos establecidos en la normativa...

Lo primero que debemos plantearnos es la manera de satisfacer el requerimiento impuesto por la normativa, así la EN9100 contempla:

“La organización debe determinar el seguimiento y la medición a realizar y los dispositivos de seguimiento y medición para proporcionar la evidencia de la conformidad del producto con los requisitos determinados” (véase apartado 7.6 de la UNE-EN9100)

De esta forma se nos plantean de forma genérica dos opciones: la primera que sería registrar todos los equipos de medida utilizados y una segunda que trata de hacer esta toma de datos de forma selectiva. Ambas opciones tienen sus pros y sus contras.

Desde el punto de vista de costes, la opción de registrar todos los números de serie de las herramientas de medición que empleamos supondría una inversión inicial prácticamente nula, sin embargo, supondría un coste recurrente altísimo por parte de Producción. De otro lado, la idea de hacer esta recogida de forma selectiva busca reducir este coste recurrente disminuyendo el número de equipos que han de registrarse. Para ello, es imprescindible dar una justificación de qué equipos de medida vamos a dejar fuera, lo que supone un análisis previo de las operaciones. Pese a ello, debido al elevado coste recurrente asociado al registro global de las herramientas optamos por la segunda opción.

Más adelante, cuando conozcamos más en detalle la solución implantada haremos una comparación más detallada entre las distintas opciones para corroborar esta elección.

Las primeras preguntas que nos surgen ahora son las que introducen el grueso de este proyecto: ¿qué herramientas debemos registrar?, ¿Vamos a registrar todos los equipos de medida que utilicemos?, ¿Es necesario? Pensemos, por ejemplo, que a lo largo de la fabricación de una aeronave, hay ciertos elementos que son *premontados* para llevar a cabo ciertas tareas en una estación y quizás no se montan definitivamente hasta varios días o incluso semanas después. Queda claro que, si este elemento va unido mediante tornillos, el torque de premontaje que apliquemos no será demasiado relevante, no es una medida definitiva.

De estas primeras reflexiones surge la clara necesidad de estratificar las herramientas para darles un uso adecuado de acuerdo a **su naturaleza y tarea para la que están encomendadas**. Esta dualidad que acabamos de enunciar supone una de las ideas claves del proyecto y la desarrollaremos más adelante.

Por último, una vez detectada la necesidad e intuida la solución, nos falta definir el *modus operandi*: ¿cómo vamos a determinar cuáles son las herramientas que debemos registrar? Necesitamos un criterio que considere los distintos factores que determinan la criticidad de una medida: que tenga en cuenta con qué probabilidad ésta será errónea; que sepa predecir cómo de grave será un error cometido y; que valore cuan propenso es un fallo de ser obviado o por el contrario corregido.

Con todos estos ingredientes, parece evidente establecer como ejercicio previo a la categorización de las tareas un análisis que nos permita determinar la necesidad de registrar una herramienta destinada a una cierta tarea o no. La técnica que emplearemos y que desarrollamos en el siguiente capítulo es el FMEA (*Failure Mode Effect Analysis*).

1.3. Objetivo del Proyecto

Frente al incumplimiento de la EN9100 con respecto a la falta de trazabilidad de nuestros equipos de medida,

lanzamos nuestro proyecto con el objetivo de dar respuesta al punto de auditoría fallido. Establecer un sistema de registro de todos los equipos de medida empleados supone un coste recurrente muy alto. De esta forma, nuestro ejercicio se centrará en establecer un criterio sólido de clasificación de los equipos de medida en distintos grupos, permitiéndonos adoptar el sistema de trazabilidad más adecuado en cada caso.

Para ello emplearemos la técnica del FMEA que presentaremos en el siguiente capítulo. Así, tendremos que establecer una plantilla de FMEA extensible a todas las líneas de producción de la compañía. Tanto para la elaboración como validación de nuestro ejercicio trabajaremos sobre un caso real, utilizando los datos de una estación de trabajo dentro de una de nuestras Líneas de Ensamblaje Final.

2 ¿QUÉ ES UN FMEA?

Vivimos en un mundo en el que todo cambia constantemente: los anuncios que vemos en televisión se reinventan cada día, cada mes podemos encontrar artículos electrónicos con nuevas funcionalidades, nuestra ciudad se llena con restaurantes con platos que ni conocíamos, que incluso ni alcanzamos a pronunciar correctamente.

Está claro que, tal y como apunta Stamatis (p. xvii), vivimos en una época en la que las palabras “mejora continua” han estado entre las más resonadas de cualquier compañía. En su libro, el autor habla de la necesidad imperante de renovación como única vía de subsistencia para cualquier entidad. De otro lado resalta el riesgo inherente a cualquier cambio.

Para ejemplificar este asunto, podemos pensar en la compañía Nokia que para cualquier lector de mi generación o mayor que yo ha sido sin duda alguna la marca de referencia en cuanto a tecnología móvil durante gran parte de nuestra vida. ¿Quién conoce a Nokia ahora? En la actualidad, la firma finlandesa se queda fuera de cualquier lista de ventas mundial (8).

En la web de [tecnexplora](#) podemos encontrar un análisis del fracaso de esta marca. En esta evaluación destaca hasta diez errores que llevaron a Nokia a quedarse fuera de juego y a tener que malvenderse a Microsoft, tan solo unos años después de ser, con mucha diferencia, la líder mundial en venta de teléfonos móviles. Sin embargo, toda esta serie de errores puede resumirse en un único fallo: ¡Nokia no vio el cambio! Mientras compañías como Samsung y Apple ponían toda la carne en el asador en materia de desarrollo de los smartphones, Nokia se mantuvo acomodada en sus diseños convencionales y fiables; craso error.

Con este ejemplo queremos mostrar al lector la importancia del cambio: siempre es necesario mejorar y para ello se requieren cambios. La técnica del FMEA se inventa como un arma para contrarrestar el riesgo que viene asociado al cambio.

2.1. Historia de FMEA

El término FMEA, Failure Mode Effect Analysis, fue acuñado a finales de los años 40 por las fuerzas militares estadounidenses, bajo el estándar MIL-P-1629 (“Procedure for performing a failure mode effect and critically analysis”), lanzado el 9 de noviembre de 1949; revisado años más tarde como MIL-STD-1629A. En este documento se define el FMEA como un procedimiento mediante el cual cada potencial modo de fallo en un sistema es analizado para determinar los resultados o efectos que este puede tener sobre el sistema y clasificar cada potencial modo de fallo de acuerdo a su severidad.

El interés del FMEA como herramienta de análisis en industrias con grandes desarrollos y series de producción cortas es más que evidente. Es por ello que este método ha estado desde su nacimiento ligado al sector aeroespacial. De este modo, esta técnica fue adquirida a principios de los 60 por la National Aeronautics and Space Administration (NASA) para el desarrollo de programas como el Apollo. En 1967 se lanza el primer procedimiento en el que se habla del FMEA para aviación civil, el ARP426, revisado posteriormente y denotado tal y como se conoce hoy en día, ARP4761.

Desde su nacimiento en desarrollos aeroespaciales, esta técnica se ha extendido por numerosos y variados sectores. En los 70 comienza a emplearse en el mundo del automóvil de la mano de Ford. Del mismo modo, en esta época es empleado este análisis en proyectos medioambientales y en la industria alimentaria. Hoy en día, se emplea el FMEA como herramienta básica ante desarrollos de todos los tipos: medicamentos, software, comida, etc.

2.2. ¿Qué es un FMEA?

FMEA, Failure Mode and Effect Analysis: es un conjunto de directrices, un método y una forma de identificar problemas potenciales (errores) y sus posibles efectos en un sistema para priorizarlos y poder concentrar los recursos en planes de prevención, supervisión y respuesta.

Se trata de una herramienta inductiva de evaluación: partiendo de los posibles modos de fallo de un sistema, se analizan para determinar la gravedad de cada uno, detectar las posibles causas y buscar la manera de corregir o mitigar dichos fallos y/o efectos. Bien diseñado y desarrollado, el FMEA es un arma muy poderosa en un proyecto en desarrollo, pues permite estudiar los fallos del sistema y las soluciones para los mismos antes de su diseño, con el consiguiente ahorro que esto supone con respecto a tener que hacer estos retoques una vez que el sistema está en marcha.

2.3. Tipos de FMEA

En la bibliografía podemos encontrar distintos tipos de FMEAs, aunque todos ellos tienen la misma estructura. La diferencia entre unos y otros radica básicamente en la fase del proceso de desarrollo del sistema en la que se aplica el análisis y/o el nivel de detalle con el que se aplica (al sistema completo, a un equipo en concreto, etc.). Aquí vamos a destacar los tres tipos de FMEA más importantes que debemos implementar en la gestación de un proyecto:

- FMEA de SISTEMA (SFMEA): Este se lleva a cabo en la primera fase del desarrollo del proyecto y se centra en estudiar el sistema de forma que exista un cierto equilibrio entre factores operacionales y económicos, para ello toma como entradas las necesidades que debe cubrir el sistema, los requerimientos del cliente, expectativas de mercado, etc.
- FMEA de DISEÑO (DFMEA): Este análisis es posterior al FMEA de Sistema y se lleva a cabo durante el diseño del sistema. En este caso, deben de tomarse como entradas al ejercicio las causas de los fallos detectados durante el FMEA de Sistema.
- FMEA de PROCESO (PFMEA): Este ejercicio sucede al FMEA de Diseño y toma las causas de fallos detectadas en este para analizarlas a nivel de funcionamiento del sistema. En una empresa de fabricación como por ejemplo una línea de ensamblaje, que es donde se lleva a cabo nuestro proyecto, estaríamos hablando de evaluar los procesos de fabricación en sí mismos.

En cualquiera de los casos, para sacar el mayor rendimiento de este ejercicio, todos los autores coinciden en que el FMEA es una herramienta poderosa siempre que se use adecuadamente y de forma crítica. Por ello, un buen FMEA debe de llevarse a cabo por un equipo multifuncional, que nos permita evaluar los fallos desde distintas perspectivas, así como encontrar forma más óptima de corregirlos.

Nuestro caso es un tanto particular, pues no se trata de un nuevo desarrollo, ni vamos a evaluar el proceso completo de fabricación de la aeronave. El nuestro es un FMEA de Proceso en el que nos centramos en los fallos causados por tomar una medida con una herramienta que se encuentra fuera de calibración. De hecho, como veremos en el siguiente capítulo, todas las líneas de nuestro FMEA tienen el mismo modo de fallo, error de medida al usar la herramienta, lo que cambia es el equipo de medida usado y la tarea para la que se emplea.

2.4. Estructura de un FMEA

La siguiente figura representa la estructura típica de un FMEA, o más bien, de la plantilla a utilizar para llevarlo a cabo:

Modo potencial de fallo	Efecto(s)	Causa(s)	Severidad [S]	Ocurrencia [O]	Detectabilidad [D]	NPR	Acciones, orden de priorización, etc.

Tabla 2-1. Estructura general de un FMEA

Al llevar a cabo un FMEA, primero han de listarse los posibles fallos que pueden ocurrir en el sistema, esta será la entrada al ejercicio. En segundo lugar, el equipo encargado de desarrollar el análisis debe evaluar los posibles efectos y las causas del mismo. Una vez definidos estos campos, pasamos a la evaluación del fallo según los tres parámetros fundamentales del FMEA: Severidad, Ocurrencia y Detectabilidad. En la Severidad se evalúa la seriedad del fallo o, más concretamente, de los efectos de este. La Ocurrencia mide la frecuencia con la que puede ocurrir el fallo y la Detectabilidad es un parámetro que se asigna teniendo en cuenta cómo de probable es que dicho error se descubra antes de que el producto llegue al cliente.

El orden en el que se valora cada parámetro, así como la forma de evaluarlos depende de la decisión que tome el equipo de trabajo. Un orden alternativo al mostrado sería evaluar la Severidad justo después de la columna de efectos, y posteriormente, estudiar la Ocurrencia y la Detectabilidad una vez determinadas las causas del fallo. El sentido de elegir ese orden radica en que realmente la Severidad ha de basarse en los posibles efectos que pueden desencadenarse a raíz del fallo; la Ocurrencia, sin embargo, depende de cuál es la causa que provoca el error en el sistema. De esta forma, un mismo fallo debido a dos causas distintas puede tener dos valores de ocurrencia distintos, pero tanto el efecto, como la Severidad del mismo serán iguales en ambos casos.

Como comentamos, también la forma de evaluar estos tres parámetros puede cambiar. La forma más habitual es establecer una escala numérica, donde el número más alto corresponde al peor de los casos. Aunque no existe estándar alguno en la forma de establecer estas escalas, las dos formas más comunes son la escala de 1 a 5 y la escala de 1 a 10.

NOTA: si el lector quiere conocer más sobre criterios para establecer estas escalas, véase STAMATIS – capítulo 2

Una vez determinados los valores de los tres parámetros del FMEA obtenemos de forma automática el RPN. El RPN (del inglés Risk Priority Number) consiste en el producto de la Severidad, la Ocurrencia y la Detectabilidad. Este número tiene dos principales usos: el primero radica en establecer un RPN mínimo por debajo del cual un fallo no será considerado como crítico para el sistema (este umbral debe determinarlo el equipo de trabajo en función de los objetivos perseguidos con el FMEA); el segundo objetivo del RPN, del cual recibe el nombre, es el de posibilitar la priorización de las acciones correctoras sobre aquellos fallos que tengan RPN mayores.

Por último, para finalizar el FMEA el equipo de trabajo ha de determinar las acciones necesarias a llevar a cabo para corregir los errores considerados: establecer planes de prevención, realizar cambios en el diseño, etc.

Otra variación usual en el esquema mostrado es la de añadir al final de la hoja nuevas columnas que repitan los pasos del FMEA (Severidad, Ocurrencia, Detectabilidad y RPN) con el fin de realizar un nuevo estudio tras haberse llevado a cabo las acciones correctoras y así poder analizar la validez de las mismas para resolver el problema.

3 PROPUESTA DE ANÁLISIS

Una vez presentadas las características básicas de un FMEA pasamos a adentrarnos en el ejercicio que hemos llevado a cabo. Como anunciamos en la introducción de esta obra, el objeto de nuestro proyecto es tener trazabilidad de los equipos de medida empleados en los procesos de fabricación de nuestra planta. Con este objetivo claro, planteamos el FMEA como ejercicio previo que nos permita estratificar estas herramientas en función de su propia naturaleza (rango de calibración, incertidumbre, resolución, etc.) y de la tarea para la que están encomendadas.

La razón por la que establecemos esta dualidad herramienta-tarea es clara. Como vimos en la sección anterior, la Severidad viene determinada por el efecto del fallo, de este modo, no tendrá las mismas consecuencias un error cometido en la instalación de un asiento de pasajero que en el sistema principal de potencia hidráulica.

Siguiendo este mismo razonamiento, el parámetro de Detectabilidad también dependerá de la zona de trabajo, de las operaciones que sucedan a la realizada en esa misma zona, de las pruebas funcionales que se desarrollen...

Por otro lado, la Ocurrencia si será un valor común para una misma herramienta, sea cual sea la tarea en la que la empleemos, pues la causa en este caso es común, el error de calibración en la herramienta. Más adelante desarrollaremos una a una las definiciones y escalas empleadas para la Severidad, la Ocurrencia y la Detectabilidad.

Como fase inicial de este proyecto hemos llevado a cabo un ejercicio piloto, tomando como objeto de estudio una estación de trabajo de una de las líneas de producción. La idea es usar este primer análisis a pequeña escala para asentar los que serán los criterios del FMEA que habrá que llevar a cabo en el resto de fases de fabricación de todas las líneas de negocio de la compañía, tanto para las operaciones de trabajo ya existentes como para cada nueva tarea que se cree.

En este sentido, partimos de una plantilla inicial típica de cualquier FMEA con algunas pequeñas modificaciones presumiblemente coherentes con nuestra problemática, de forma que a medida que avancemos en el ejercicio iremos modificándolo para adaptarlo a la realidad de los casos encontrados. A través de nuestro FMEA pretendemos establecer un criterio sólido que nos permita clasificar cada binomio tarea-equipos de medida en distintos grupos de los que hablaremos en el capítulo de Resultados. El resto de este apartado lo dedicamos a presentar los distintos módulos que componen nuestro ejercicio.

3.1. Listado de tareas y herramientas

En la descripción general de un FMEA hablábamos de que la entrada al ejercicio son los posibles modos de fallo del sistema. En nuestro caso, el modo de fallo es común a todas las líneas: error de medida debido a que la herramienta que estamos empleando está fuera de su rango de calibración. De esta forma, este listado de modos de fallo consistirá en todo el conjunto de tareas que se llevan a cabo en la estación con los equipos de medida encomendados para las mismas. Estas son las columnas correspondientes a esta parte de la tabla:

PROGRAM	STATION / PLATFORM	ID	TASK			ITEM					GIVES CONFORMITY TO THE PRODUCT		
			DS	OPERATION	DESCRIPTION	MEASURING TASK	REQUIREMENT	UNIT	MEASURING DEVICE (FROM EXERCISE)	MEASURING DEVICE	TYPE	VALUE	COMENTS

Tabla 3-1. Esquema de listado de tareas y herramientas de nuestro FMEA

En primer lugar encontramos los que serían las columnas de identificación del ejercicio. En la columna “PROGRAM” identificamos el programa o línea de negocio en el que estamos trabajando mediante el código que le corresponde. Las dos primeras columnas nos sirven para identificar el programa o línea de negocio en el que estamos trabajando (columna “PROGRAM” y, dentro de éste, la estación de producción analizada (“STATION/PLATFORM”).

Por último, a cada línea del FMEA que creemos le daremos un número de identificación adjudicado de forma correlativa al anterior. Así, la fila n-ésima del ejercicio le corresponde el número n de identificación. Los dígitos de identificación aparecerán en la columna “ID”. De esta forma, conseguimos un código que identifica de forma unívoca cualquier modo de fallo dentro de la empresa, tal y como representa la siguiente imagen:

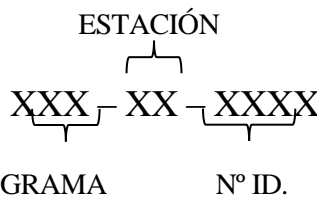


Figura 3-1. Código de identificación de líneas de nuestro FMEA

Las siguientes columnas de este primer grupo se engloban en dos partes, una correspondiente a la tarea y otra serie de columnas para describir la herramienta empleada. En la descripción de la tarea utilizamos el esquema propio de la compañía. De este modo, la forma más general de clasificar los trabajos que se llevan a cabo en una estación es en Design Solutions (columna “DS”) y éstas engloban distintas operaciones (columna “OPERATION”). El contenido de estas dos columnas será el código correspondiente a la Desing Solution y a la Operación, respectivamente. Por lo tanto, añadimos una columna de “DESCRIPTION” en la que definimos brevemente la operación de la que se trata, para que una persona con la suficiente experiencia no necesite ir a la operación en sí para entender el contenido de la línea.

El último grupo de columnas caracteriza la herramienta utilizada. Las dos primeras, “REQUIREMENT” y “UNIT”, las utilizamos para indicar, respectivamente, la medida que se requiere llevar a cabo con la herramienta y la unidad de medida de la misma.

Las otras tres columnas describen el equipo de medida. En “MEASURING DEVICE (FROM EXERCISE)” indicamos el nombre de la herramienta, tal y como viene determinado en la operación escrita por Ingeniería. La siguiente columna permite a la persona que lleva a cabo el FMEA elegir entre una lista de familias, aquella a la que pertenece la herramienta empleada. La clasificación en familias nos permite asignar automáticamente valores como el de la Ocurrencia o Error Considerado, que analizaremos más adelante.

Por último, podemos indicar si el equipo de medida que se está usando en esta tarea se trata de uno “comprado” o “fabricado” en la columna “TYPE”. La finalidad de esta última clasificación proviene del hecho de que las características de una herramienta las marca el fabricante. De este modo, aquellos equipos comprados de un catálogo existente traerán asignados sus propios parámetros de calidad, resoluciones, etc. Por el contrario, para un equipo como puede ser un útil o un medio de prueba diseñado y fabricado por nuestra empresa, los parámetros anteriores son responsabilidad nuestra.

La siguiente tabla es un extracto del FMEA llevado a cabo que nos sirve para ejemplificar el uso de las columnas descritas en este apartado.

TASK			ITEM				
DS	OPERATION	DESCRIPTION	REQUIREMENT	UNIT	MEASURING DEVICE (FROM EXERCISE)	MEASURING DEVICE	TYPE
M27470002012	1101	IZADO Y POSICIONAMIENTO DE THSA EN UTIL	NA	NA	Útil volteo THSA		Comprado
	1303	INSTALACION THSA-VTP	NA	NA	Fijas centradoras THSAVTP		Comprado
			130-150	Nm	Torcómetro de apriete crítico	TORCOMETRO (> 5Nm)	Comprado
			1.4-1.7	Nm	Torcómetro	TORCOMETRO (< 5Nm)	Comprado
			80-100	Nm	Torcómetro de apriete crítico	TORCOMETRO (> 5Nm)	Comprado
			6.2-7.5	Nm	Torcómetro	TORCOMETRO (> 5Nm)	Comprado
			3.7-4.8	Nm	Torcómetro	TORCOMETRO (< 5Nm)	Comprado

1400	CONEXION DE MANGUERAS DRENAJE THSA	3.7-4.8	Nm	Torcómetro	TORCOMETRO (< 5Nm)	Comprado
1510	APLICACIÓN SELLANTE Y BARNIZ THSA-VTP	15-35	°C	Temperatura ambiente	TERMOHIGRO METRO-DIGITAL T ^a	Comprado
		30-75	%	Humedad relativa	TERMOHIGRO METRO-DIGITAL H %	Comprado

Tabla 3-2. Ejemplo de listado de tareas y herramientas

3.2. ¿La tarea de conformidad al producto?

El siguiente paso en la realización de nuestro FMEA consiste en una cuestión previa a entrar en la evaluación de Ocurrencia, Severidad y Detectabilidad. Una vez determinada la tarea a realizar y la herramienta empleada para la misma, el autor del FMEA ha de plantearse la siguiente pregunta: ¿la tarea que se está llevando a cabo da conformidad al producto?

Nuestros productos tienen que satisfacer una serie de requerimientos, establecidos por la Oficina de Diseño y por las distintas normativas y especificaciones. Estos requerimientos son todos cuantificables y medibles, por lo tanto, cuando hablamos de que un equipo da conformidad al producto nos referimos a que se trata del medio de medición asegurador de que se cumple alguno de estos requerimientos. Recordemos además que la UNE-EN 9100 establecía la necesidad de registrar “los dispositivos de seguimiento y medición para proporcionar la evidencia de la conformidad del producto con los requisitos determinados”.

De este modo, es el equipo de trabajo el que, basándose en su experiencia y conocimientos sobre la tarea, decidirá si ésta da conformidad o no al producto (columna “GIVES CONFORMITY TO THE PRODUCT”). Según la respuesta a esta pregunta sea positiva o negativa habrá que completar el FMEA o no. Es decir, si se considera que una tarea no da conformidad, esto significa que un error cometido en la medición no acarreará un decremento en la calidad del producto y, por lo tanto, no será necesario continuar con la evaluación para esa línea, porque directamente se considerará el equipo como NO TRACEABLE. En caso de que la respuesta sea positiva, se continuará con el ejercicio de la manera habitual. Sobre este grupo de equipos NO TRACEABLES y el resto de grupos establecidos hablaremos en el capítulo de Resultados.

Este punto del análisis cuenta con dos columnas. La primera que ya hemos descrito y una segunda columna llamada “COMMENTS”. Esta segunda está concebida con la intención de que los autores del FMEA justifiquen de forma breve aquellos casos donde consideren que la tarea no da conformidad al producto; es decir, esta columna sólo se rellenará en aquellas líneas del ejercicio para las que la respuesta a la pregunta de la columna anterior sea “NO”.

Por último, para que el lector tenga una mejor idea de lo que significa este bloque del FMEA, damos algunos ejemplos de tareas muy comunes y que no dan conformidad al producto.

TASK			ITEM					GIVES CONFORMITY TO THE PRODUCT	
DS	OPERATION	DESCRIPTION	REQUIREMENT	UNIT	MEASURING DEVICE (FROM EXERCISE)	MEASURING DEVICE	TYPE	VALUE	COMMENTS
								M551A6 200106	1220
M112A5 000000	1010	COLOCAR LOS TRIÁNGULOS EN TIMONES DE HTP	85-95	Nm	Torcómetro	TORCOMETRO (> 5Nm)	Herramienta	NO	Se trata de aprietes en las conexiones hidráulicas del SLAVING TOOL con los circuitos hidráulicos del HTP (no son conexiones definitivas, sólo para actuar el elevador y pegar los triángulos)
MCX050 000400	1130	SALIDA DE GRADA DEL EMPENAJE	-	-	Láser posicionador	-	-	NO	Se trata de un láser que se coloca en la base de VTP para tener una referencia cuando se está intentando situar sobre la superficie a la que va anclado en la estación.

Tabla 3-3. Ejemplo de tareas que no dan conformidad al producto

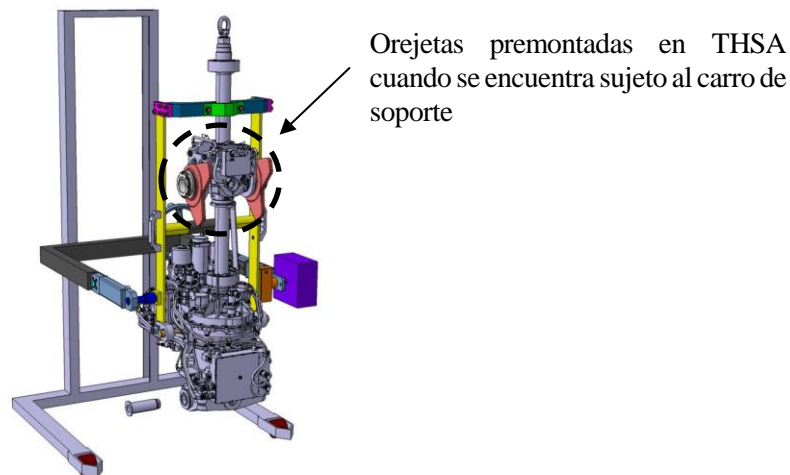


Figura 3-2. Operación de montaje de orejetas en THSA

3.3. Ocurrencia

Con la siguiente columna entramos ya en lo que sería el FMEA propiamente dicho. Hasta el momento nuestro ejercicio se ha limitado a listar los posibles modos de fallo como un binomio indivisible compuesto por una tarea a realizar y un equipo de medida utilizado para desarrollarla; y a hacer una primera criba para determinar si este binomio es susceptible de ser estudiado o por el contrario no es necesario debido a que la tarea realizada carece de importancia desde el punto de vista de nuestro análisis.

Continuamos ahora con la Ocurrencia. Recuerde el lector que en un FMEA la Ocurrencia la definimos como un parámetro que se asigna según la frecuencia con la que se estima que ocurrirá el fallo. En nuestro caso, la Ocurrencia deberá ir en función de la probabilidad que existe de que la herramienta con la que medimos esté fuera de su rango de calibración.

Recordemos que en el primer bloque del FMEA tenemos una serie de columnas que utilizamos para describir la herramienta empleada en la medición. Encontrábamos aquí una columna que nos permitía asociar la herramienta a una familia determinada. Este listado de familias está construido a partir de los datos que obtuvimos del departamento de Metrología para llevar a cabo nuestro estudio.

En estos datos encontramos, para cada familia de herramientas, el número de calibraciones que se han realizado, así como el número de veces que se ha detectado que el equipo estaba fuera de su rango de calibración durante las mismas (a lo que llamamos número de fallos). Así, para llevar a cabo este primer piloto, asignamos a cada familia de equipos un valor de Ocurrencia basándonos en la Regla de Laplace.

Nótese que esta forma de calcular el parámetro Ocurrencia es una aproximación un tanto burda pues, recordemos que la Regla de Laplace podemos enunciarla como:

Si realizamos un experimento aleatorio con n casos elementales equiprobables, siendo A uno de esos casos, la probabilidad de que ocurra A es:

$$P(A) = \frac{n^{\circ} \text{ de casos favorables a } A}{n^{\circ} \text{ de casos posibles}}$$

Ecuación 3-1. Regla de Laplace

Nosotros, en nuestra aproximación, estamos suponiendo que los casos posibles son equiprobables, es decir, que hay la misma probabilidad de que la herramienta esté dentro o fuera de su rango de calibración cuando ésta pasa por Metrología. Esto en principio no es así, pero este método arroja unos resultados aceptables para este primer ejercicio con los datos que manejamos. Cuando llegemos a las conclusiones de la obra haremos alguna reflexión más sobre este tema.

Existen otros casos en nuestro listado en los que no es muy fiable aplicar esta regla tal cual. Observamos que para alguna familia de herramientas el número de calibraciones era muy bajo, pues no todos los equipos de medida tienen los mismos ciclos de calibración. De este modo, encontramos familias para las que la muestra no era suficientemente extensa como para aplicar la regla, por lo que decidimos tratar estos casos de forma distinta.

Con todas estas consideraciones, construimos el siguiente árbol de decisión para asignar un valor de Ocurrencia a cada familia. De esta forma, aquellos equipos de medida con tres calibraciones o menos obtendrán una valoración conservativa: un 4 para los casos con menos de 2 fallos y un 8 para los casos en los que el número de fallos de calibración sea 2 o 3.

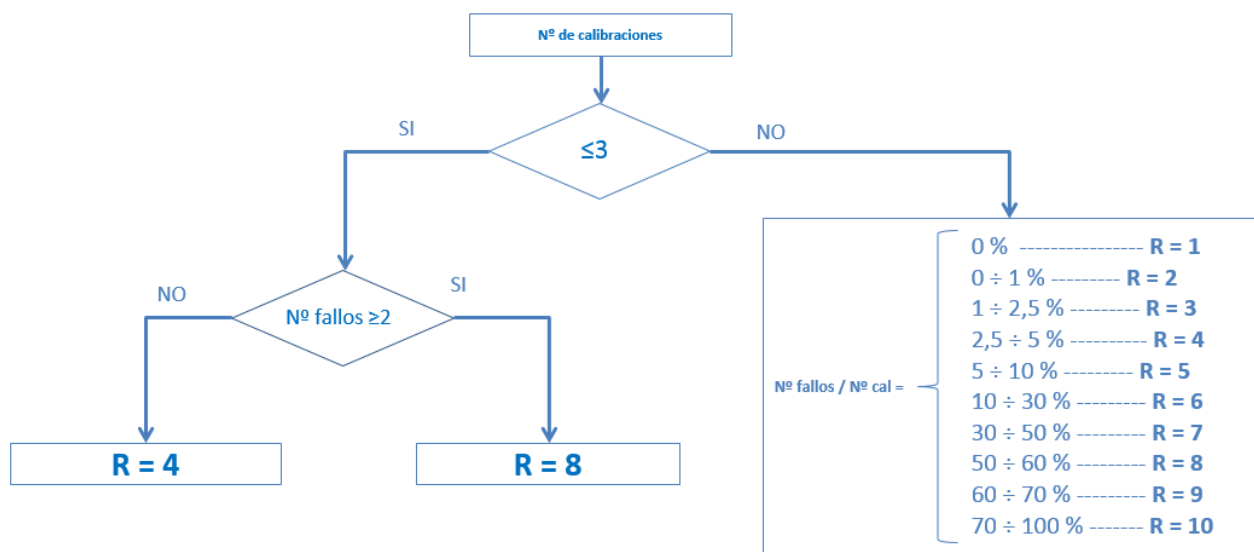


Figura 3-3. Árbol de decisión de Ocurrencia

Siguiendo el algoritmo descrito, el valor de Ocurrencia que adjudicamos a cada modo de fallo se rige según la siguiente escala:

PROBABILITY OF FAILURE	RANKING
Very high: Failure is almost inevitable	10
	9
High	8
	7
Moderate	6
	5
	4
Low	3
Very low	2
Remote: Failure is unlikely	1

Figura 3-4. Escala de Ocurrencia

3.4. Severidad

Llegamos ahora al bloque más extenso de los tres que componen la evaluación del FMEA, la Severidad. De forma teórica definimos este parámetro como aquel que refleja cómo de grave es el efecto que conlleva un modo de fallo. En nuestro caso, tenemos que adaptar esta definición de forma que contemple toda la casuística asociada a nuestros productos. Surgen de este modo dos incógnitas.

La primera de nuestras dudas está asociada a cómo de graves vamos a considerar los errores de medición cometidos pues de ello va a depender lo severo que sea el error: es lógico pensar que, para la misma tarea, por norma general, no tendrá los mismos efectos un error de una micra que uno de diez centímetros. La segunda pregunta que debemos plantearnos llegados a este punto es la propia definición de Severidad. De esta forma, tendremos que medirla a través de los distintos parámetros que afectan a los estándares de calidad de nuestros productos.

En primer lugar, vamos a abordar la forma de estandarizar el grado de desviación considerado a la hora de responder a este bloque del ejercicio. Para ello, una vez más debemos apoyarnos en los datos proporcionados por el departamento de Metrología. Así, para cada una de las familias en las que clasificamos nuestras herramientas, conocemos cuál es el error máximo en la calibración del equipo, esto es, la desviación máxima que se le permite al aparato para darlo como aceptable durante la calibración.

En nuestro caso y para realizar el análisis de forma más conservativa, decidimos tomar como entrada a nuestro análisis de Severidad el doble del error máximo en calibración. De esta forma, por ejemplo, el error máximo de calibración para un pie de rey digital es 0.05 mm y para nuestra evaluación consideraremos que el error cometido es de 0.1 mm.

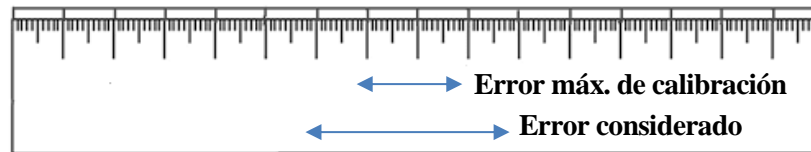


Figura 3-5. Relación entre error considerado y error de calibración

Conforme avanzamos en la realización de nuestro ejercicio encontramos multitud de casos para los que el valor de Severidad resultante es el mínimo posible en la escala. Esto nos lleva a la siguiente reflexión: existen casos en los que el error considerado para el equipo de medida es irrelevante con respecto a la tolerancia exigida por la tarea. Para ilustrar esta idea, pensemos en el siguiente ejemplo.

Existen una serie de requisitos estándar para instalaciones eléctricas (estos requisitos pueden volverse más restrictivos en algunos casos por la criticidad de la instalación, la zona del avión, etc.). Estas restricciones son distancias mínimas que los mazos deben de guardar con el resto de elementos existentes en la zona de trabajo (otro tipos de instalaciones, estructuras fijas o móviles...). La siguiente imagen muestra cuáles son estas medidas.

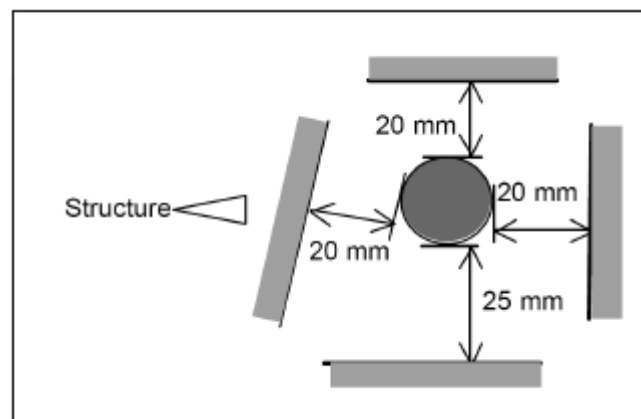


Figura 3-6. Distancias de seguridad en instalación eléctrica

En este caso, la herramienta para asegurar estas distancias suele ser un calibre o una regla, cuyo error considerado es 0.5 mm. Esta desviación está muy por debajo de los márgenes de seguridad empleados en el cálculo de las holguras establecidas y por tanto, podemos decir que es un error no relevante.

Otro ejemplo donde el error considerado para el aparato no es importante con respecto a la tolerancia de la tarea lo encontramos en muchos casos donde utilizamos galgas de espesor para medir el espacio entre elementos. Para las galgas el error considerado es del 6% de su valor nominal. Así, por ejemplo, en la instalación del borde de ataque del estabilizador horizontal se exige una separación entre este y el cajón central de 7 ± 3 mm, con lo que la galga a utilizar es una con un espesor nominal de 7 mm. En este caso, como el error considerado es del 6% (el 6% de 7mm es 0.42mm), estaríamos usando una galga de entre 6.58 mm y 7.42 mm, es decir, el error cometido es del orden del 10 % de la tolerancia de la tarea. Por tanto, se trata de una desviación irrelevante.

Existen otros casos donde el error considerado sí resulta importante con respecto a la tolerancia de la tarea. Un

ejemplo de ello lo encontramos en tareas de unión de la estructura de la aeronave. Es muy común en este tipo de operaciones que tras el montaje quede cierta holgura entre las partes. En los casos en que ocurra esto, se utiliza una resina epoxi para rellenar el hueco entre ambas piezas, pues al endurecerse esta proporciona unas capacidades mecánicas muy buenas. A pesar de la bondad de esta resina, las restricciones del diseñador en estos casos suelen ser bastante fuertes cuando se trata de uniones estructurales. Así, en el montaje de revestimientos, por ejemplo, el intervalo de tolerancia es del orden de $[0, 0.5]$ mm, esto es, del mismo orden de magnitud que el error considerado para un calibre. Como vemos, en este caso si es relevante el error de medición.

Con el razonamiento seguido establecemos las dos primeras columnas en el módulo de Severidad, que sigue la siguiente estructura:

SEVERITY								
ERROR CONSIDERADO	¿Es relevante la desviación del equipo con respecto a la tolerancia de la medición?	STRENGTH	FUNCTIONING	IN SERVICE DOCS	AERODINAMICS	COST IMPACT	WEIGHTED SUM	SEVERITY COEFFICIENT
		25%	25%	20%	15%	15%		

Tabla 3-4. Esquema de módulo de Severidad

De esta forma, en la columna “ERROR CONSIDERADO” aparece reflejado la desviación que el equipo de trabajo debe de considerar al evaluar la gravedad del fallo. En la segunda columna, “¿ES RELEVANTE LA DESVIACIÓN DEL EQUIPO CON RESPECTO A LA TOLERANCIA DE LA MEDICIÓN?”, ha de compararse el error considerado para la familia con la tolerancia de la tarea que se está analizando, tal y como hemos hecho en los ejemplos anteriores. Así, si la respuesta a esta pregunta es positiva, habrá de llevarse a cabo el resto de la evaluación del modo de fallo. Por el contrario, una respuesta negativa a esta pregunta desestima el fallo por no ser relevante con respecto al requisito de la medida. En el capítulo de Resultados veremos la forma en la que trataremos este tipo de casos, así como otros que entrarán en lo que denominaremos GRUPO 2 DE CRITICIDAD.

Tras estas consideraciones iniciales entramos en la evaluación de la Severidad. Como anunciamos, vamos a establecer una serie de parámetros que nos permitan medir la gravedad del modo de fallo con respecto a los estándares de calidad de nuestros productos. De este modo, vamos a analizar la Severidad desde el punto de vista de cinco factores: Resistencia, Funcionalidad, Documentación de Servicio, Aerodinámica e Impacto Industrial. Estas son las siguientes columnas de nuestro ejercicio tal y como mostramos en la Tabla 3.4.

A cada parámetro de los que componen la evaluación de Severidad le asignamos un porcentaje en función de su relevancia. Por otro lado, a la hora de hacer el ejercicio asignaremos un valor de 1 (No afecta) o 3 (Sí Afecta) en cada uno de estos campos. De esta forma, una vez completadas las cinco columnas, obtendremos en la columna “WEIGHTED SUM” la suma ponderada de los valores asignados, tal y como muestra la siguiente fórmula:

$$WEIGHTED\ SUM = \sum Porcentaje\ parámetro \times valor\ asignado$$

Ecuación 3-2. Weighted Sum

donde, como hemos comentado, cada parámetro tiene el porcentaje que se muestra en la Tabla A y el valor asignado será 1 si el modo de fallo no afecta a esa característica del producto o 3 si por el contrario el efecto puede ser grave respecto al parámetro considerado.

Para que el lector entienda mejor el funcionamiento de este módulo, vamos a explicar en qué consiste cada uno de los cinco campos que lo componen.

- Resistencia (“STRENGTH”): en esta columna evaluamos cómo afecta el error cometido en la tarea que se está llevando a cabo desde el punto de vista de la integridad estructural de la parte sobre la que se comete el fallo. De este modo, habrá que tener en cuenta analizar las solicitaciones a las que el conjunto pueda verse sometido durante su vida útil, tanto estáticas como a fatiga. Para contestar a este primer apartado es necesario conocer parámetros de cálculo de la pieza o unión afectada como son los márgenes de seguridad. El peso de la Resistencia con respecto a la Severidad es del 25%.
- Funcionalidad (“FUNCTIONING”): este parámetro, tal y como nos indica su nombre, valorará si el modo de fallo afecta o no de forma funcional a la parte, equipo o sistema sobre el que se está trabajando. Este parámetro, junto con el de Resistencia, es el que más peso tiene dentro del módulo de Severidad, con otro 25%.
- Documentación de Servicio (“IN SERVICE DOCS”): aquí tratamos de evaluar si el modo de fallo puede afectar al cliente de forma que se requieran reparaciones durante la vida útil de la aeronave, suponga la generación de documentación especial, afecte a la intercambiabilidad de la parte o conjunto, etc. Este tercer parámetro tiene un peso algo menor que los dos primeros, con un 20%. Esto se debe a que la Resistencia y la Funcionalidad van ligadas a la seguridad del producto, mientras que la Documentación en Servicio está enfocada hacia la satisfacción del cliente.

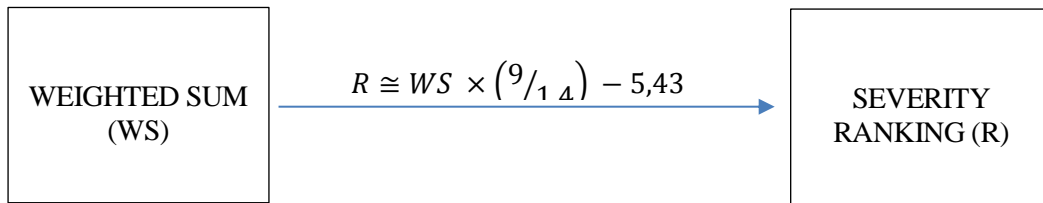
No todos los factores que vamos a definir impactan de la misma forma sobre los requerimientos de Calidad de nuestros productos. Es por ello que hacemos una diferenciación en dos subgrupos. El primero de ellos corresponde a los que ya hemos presentado: Resistencia, Funcionalidad y Documentación de Servicio; en segundo lugar encontramos los otros dos parámetros, la Aerodinámica y el Impacto Industrial. La diferencia fundamental entre unos y otros es que los del primer subgrupo se consideran críticos desde el punto de vista de la seguridad o el impacto sobre el cliente.

Por este motivo la Resistencia, la Funcionalidad y la Documentación en Servicio tendrán un tratamiento especial con respecto a los dos últimos campos, cuya relevancia se considera de un orden menor. Así, consideramos que cualquier modo de fallo ante el cual estas aptitudes puedan verse afectadas es crítico y, por tanto, establecemos el siguiente criterio: un modo de fallo que reciba una valoración de 3 en los campos Resistencia, Funcionalidad o Documentación de Servicio será considerado como crítico y el equipo de medida empleado en la tarea, sea cual sea el RPN que obtenga, entrará directamente en el GRUPO 1 DE CRITICIDAD. Los grupos establecidos se detallarán en el capítulo de Resultados.

- Aerodinámica (“AERODINAMICS”): este parámetro medirá si el modo de fallo afecta o no a las cualidades aerodinámicas del producto. De este modo hay que matizar que este campo se ha considerado como no crítico porque estamos evaluando la eficiencia aerodinámica. Si dicha eficiencia se ve alterada hasta el punto que afecta al funcionamiento de la parte, esto se verá reflejado en la casilla de Funcionalidad. Este factor supone un 15% en el cálculo de la Severidad.

- Impacto Industrial (“COST IMPACT”): por último, definimos un campo en el que evaluamos el impacto que el fallo puede tener con respecto a costes de reparación, montajes posteriores afectados, repetición de pruebas funcionales, etc. En definitiva, este parámetro reflejará si el modo de fallo supone un coste extra para nuestra empresa y supone un 15% del valor de la Severidad.

Tal y como hemos definido los factores que vamos a considerar en el análisis de la Severidad, cuando estemos completando una línea del ejercicio obtendremos un valor entre 1 (correspondiente a un modo de fallo totalmente irrelevante) y 3 (que supondría un error muy grave o incluso catastrófico). Este valor se calcula mediante la fórmula Ecuación 3.2 y aparecería reflejado en la columna (“WEIGHTED VALUE”). Como vimos en el apartado de Ocurrencia, nuestro FMEA utiliza una escala de 1 a 10, por tanto, tendremos que convertir nuestro resultado a un valor entero dentro de esta escala (columna “SEVERITY COEFFICIENT”). Para ello utilizamos la siguiente función lineal:



Ecuación 3-3. Relación lineal entre Weighted Sum y Coeficiente de Severidad

NOTA: utilizamos el símbolo “≈” para indicar que, como los coeficientes del FMEA son valores enteros, tendremos que redondear el resultado obtenido a través de esta conversión lineal

Con todo esto, este es el ranking empleado en la evaluación de la Severidad de nuestro FMEA:

EFFECT	CRITERIA: SEVERITY OF EFFECT DEFINED					RANKING
Hazardous without warning	5 parameters drive the severity of effect evaluation					10
Very high	Parameter	Adjustment coefficient	Criteria			9
High	STRENGTH (STAT+FAT)	25%	El fallo del equipo de medición podría afectar a la resistencia de la estructura o elemento	H	3	8
Moderately high			El fallo del equipo de medición no tiene efecto en la resistencia de ningún elemento	L	1	
Moderate	FUNCTIONING	25%	El fallo del equipo de medición puede afectar a la funcionalidad de algún elemento o sistema	H	3	6
Low			El fallo del equipo no puede afectar a la funcionalidad de ningún elemento o sistema	L	1	
Minor	IN SERVICE DOCs	20%	Puede necesitar edición especial de Documentación Services. Intercambiabilidad. Impacto Cliente	H	3	5
Very minor			No altera la Documentación Services. Intercambiabilidad ni tiene Impacto Cliente	L	1	
None	AERODINAMICS	15%	Puede afectar a la aerodinámica	H	3	4
			No afecta a la aerodinámica	L	1	
	COST IMPACT (AFFECTION TO NEXT ASSEMBLIES OR REWORK COSTS)	15%	El fallo del equipo de medición puede afectar a montajes sucesivos y/o su reparación puede ser costosa	H	3	3
			El fallo del equipo no puede afectar a montajes sucesivos y su reparación no es muy costosa	L	1	
						2
						1

Figura 3-7. Escala de Severidad

3.5. Detectabilidad

La Detectabilidad supone el último bloque de evaluación de nuestro FMEA. Este parámetro lo explicamos como aquel que nos permite valorar la probabilidad que existe de descubrir el modo de fallo antes de que el producto llegue al cliente. En nuestro caso vamos a analizar la Detectabilidad a través de dos factores. Con ello, el bloque seguirá el siguiente esquema:

DETECTABILITY			
TOOL USE	DETECTABILITY THROUGH FOLLOWING PROCESSES OR LOCATION	WEIGHTED SUM	DETECTABILITY COEFFICIENT
70%	30%		

Tabla 3-6. Esquema de módulo de Detectabilidad

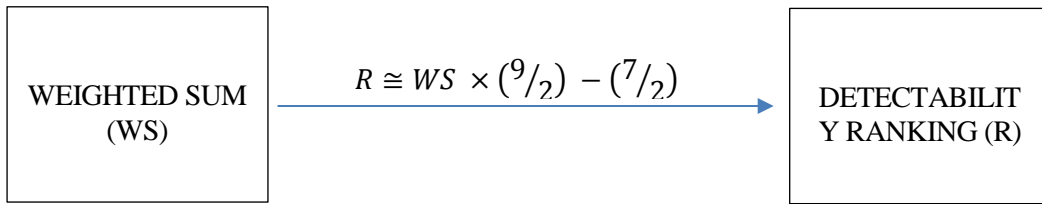
El primer criterio que vamos a emplear es el uso de la herramienta, en la columna “TOOL USE”. Este parámetro servirá para valorar la facilidad que existe de encontrar el error si en algún momento se descubre que una herramienta está fuera de su rango de calibración. Esto va a depender principalmente del trasiego del equipo de medida.

Así, el valor más bajo es el 1 y se asignará a herramientas que se usan en una sola estación y para ciertas tareas muy determinadas; si por el contrario la herramienta se usa en una sola estación pero para distintas operaciones o incluso hay varias herramientas iguales, el valor asignado será 2. El resultado más alto en esta columna es el 3 y se usará para aquellos equipos de medida que son comunes a varias estaciones de trabajo o incluso a líneas de montaje distintas dentro de la compañía. A este primer parámetro le asignamos un peso del 70% con respecto al coeficiente total de Detectabilidad.

El segundo campo que define la Detectabilidad del modo de fallo es el reflejado en la columna “DETECTABILITY THROUGH FOLLOWING PROCESSES OR LOCATION” y supone el 30% del parámetro Detectabilidad. En este caso medimos también con valores 1, 2 o 3 la probabilidad que existe de localizar un error cometido en una tarea basándonos en la zona del avión en la que estamos trabajando y en las operaciones posteriores a la que se está llevando a cabo (montajes/desmontajes posteriores, pruebas funcionales, etc.).

De esta forma, el equipo de trabajo asignará 1 a aquellas tareas que son revisitadas en operaciones posteriores, son muy visibles por la zona del avión en la que se encuentran y/o a las que siguen pruebas funcionales con las que es posible detectar un error cometido. El valor intermedio, 2, se asignará a tareas donde la probabilidad de encontrar el fallo en procesos siguientes es posible pero no son procesos encaminados a encontrar dicho error y, por último; el caso más grave es aquel en el que el modo de fallo es complicado de descubrir por tratarse de una tarea a la que no le sigue ninguna operación que lo permita y/o por encontrarse en una zona de difícil acceso de la aeronave.

Con estas consideraciones, obtendremos un valor que de nuevo determinamos mediante una fórmula similar a la empleada para la Severidad (ver Ecuación 3.3) y, por consiguiente, debemos de adaptarla a nuestra escala usada para los parámetros del FMEA (del 1 al 10). Para ello, utilizamos de nuevo una ley lineal para convertir los valores:



Ecuación 3-4. Relación lineal entre Weighted Sum y Coeficiente de Detectabilidad

NOTA: utilizamos el símbolo “ \cong ” para indicar que, como los coeficientes del FMEA son valores enteros, tendremos que redondear el resultado obtenido a través de esta conversión lineal

Con el módulo de Detectabilidad termina nuestro ejercicio, obteniendo como resultado un RPN que nos servirá para clasificar los modos de fallo en distintos grupos. Esta clasificación la detallaremos en la sección de Resultados.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez establecidos los criterios para nuestro ejercicio, concluimos el análisis de todas las operaciones. En total se analizan 237 tareas que cubren los tipos de procesos básicos en una línea de fabricación aeronáutica. La siguiente figura esquematiza el proceso de evaluación propuesto así como los grupos de clasificación establecidos que pasamos a detallar en este capítulo.

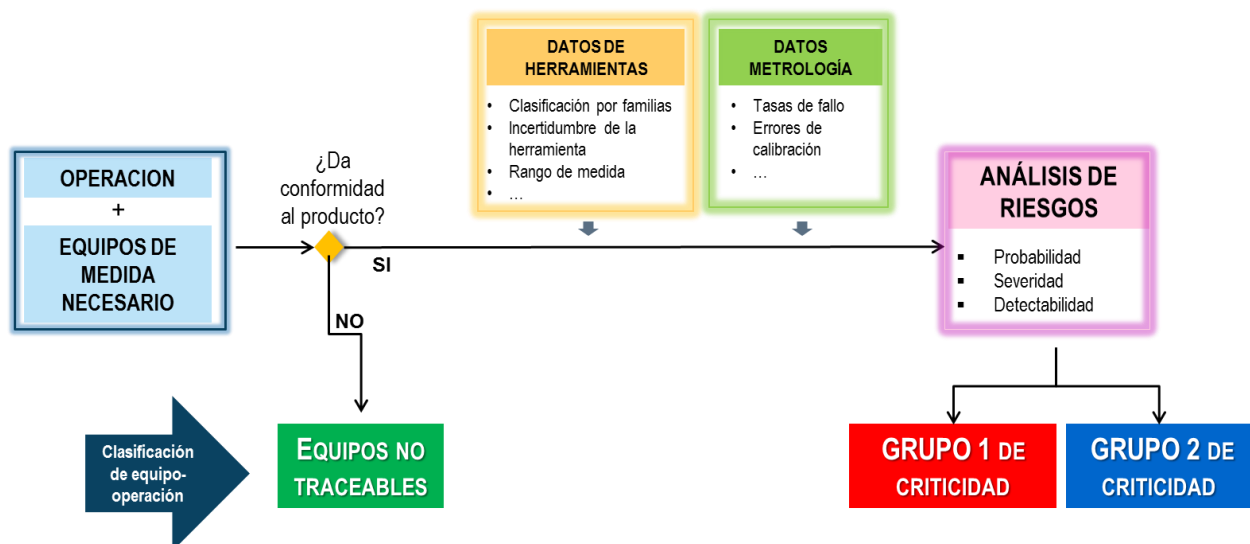


Figura 4-1. Proceso de evaluación propuesto

Completado el ejercicio, obtenemos de forma automática el RPN para cada modo de fallo. Recordemos que este parámetro corresponde con el producto de los valores de Ocurrencia, Severidad y Detectabilidad y normalmente sirve para establecer la frontera entre los modos de fallo críticos y los no críticos. En nuestro caso, establecemos tres grupos para clasificar los conjuntos tarea-equipos de medida, estos son:

- Equipos NO TRACEABLES
- Equipos de GRUPO 1 DE CRITICIDAD
- Equipos de GRUPO 2 DE CRITICIDAD

El proyecto que estamos llevando a cabo surge con la necesidad de alinearnos con los requerimientos de la UNE-EN9100, que exige el registro de todos los equipos de seguimiento y medida utilizados para dar conformidad al producto. El propio enunciado de la normativa da lugar a la primera clasificación entre las tareas que dan

conformidad al producto y las que no, estas últimas son las que quedan dentro del grupo de equipos NO TRACEABLES y se detectan tal y como se indica en el apartado 3.2 de esta obra.

Para el resto de combinaciones de tareas y equipos de medida que sí determinan la conformidad del producto debe de establecerse por exigencia de la normativa algún tipo de registro. En estos casos, vamos a diferenciar entre los grupos 1 y 2 de criticidad, tal y como hemos anunciado antes. La diferencia fundamental entre ambos grupos radica en la criticidad de los modos de fallo analizados. Más en profundidad, en las dos siguientes secciones establecemos las características de cada categoría.

4.1. GRUPO 1 DE CRITICIDAD

El grupo 1 de criticidad corresponderá a aquellos binomios tarea-equipos de medida más críticos. Así, entran dentro de este grupo aquellos que:

- Tenga un valor de RPN mayor que el RPN límite (este parámetro lo definiremos en el apartado 4.3)
- Obtengan, como vimos en el apartado 3.4 una valoración de 3 en los campos Resistencia, Funcionalidad o Documentación de Servicio.

Para estos casos, dado que son considerados como críticos, se establece un sistema directo de registro del equipo de medida empleado en la tarea, de forma que quede determinado de forma unívoca la herramienta concreta empleada en esa medición.

Para los casos contemplados dentro de este grupo, la orden de producción pedirá el registro del número de serie del equipo de medida usado para realizar la operación en un producto específico. Este número de serie es único para cada herramienta.

La propuesta inicial para el registro consiste en realizar un desarrollo informático dentro del sistema de gestión de las órdenes de producción de la compañía, de manera que el proceso en el taller sea lo más ágil posible. Para ello:

- Se incluirán etiquetas (código de barras / código QR) en las herramientas de este grupo.
- Se dispondrá de lectores en las estaciones para poder escanear las herramientas y las operaciones que deban ser asociadas.

4.2. GRUPO 2 DE CRITICIDAD

Este segundo grupo corresponde a aquellas herramientas utilizadas en tareas que dan conformidad al producto pero que no se consideran críticas según los estándares de nuestro ejercicio. De esta forma, entran dentro de este bloque aquellos conjuntos tarea-equipos de medida que:

- Tengan un valor de RPN menor que el RPN límite (ver sección 4.3).
- Obtengan, como vimos en el apartado 3.4 una respuesta negativa a la pregunta “¿Es relevante la desviación del equipo de medida con respecto a la tolerancia de la medición?”.

Como vemos, con las consideraciones hechas, en este grupo nos quedamos con aquellos conjuntos de tarea-equipo de medida que no resultan críticos pero que sí determinan la conformidad del producto. Por ello, para satisfacer el requerimiento de la normativa debemos establecer un sistema de que nos permita tener trazabilidad para estos casos.

El inconveniente principal asociado a la recogida directa de datos establecida para el GRUPO 1 DE CRITICIDAD es el alto coste recurrente que supone que el operario tenga que volcar los datos de la herramienta en la orden de producción. De este modo, para este segundo grupo vamos a realizar la trazabilidad de forma indirecta.

Nuestro ejercicio emplea, como hemos visto, datos relevantes del equipo (probabilidad de fallo, error típico, incertidumbre de la herramienta...) y del proceso (tolerancias de fabricación, impacto en funcionalidad, aeronavegabilidad...). Por tanto, siempre que al calibrar una herramienta de las que se encuentran en este grupo encontremos que está descalibrada dentro del margen típico considerado podemos asumir que la desviación es técnicamente aceptable y no tiene ningún impacto sobre el producto.

Para garantizar la afirmación anterior, los equipos de medida serán fijos por estación y para este segundo grupo, la orden de producción referenciará el rack de herramientas en el que se encuentra la que se debe usar (en el caso de que la estación tenga más de un carro, tendrá que especificar cuál de ellos).

En aquellos casos en que, por alguna causa, la descalibración de la herramienta salga fuera de los límites considerados en el ejercicio, la identificación de los productos afectados para la realización de análisis y establecimiento de acciones correctoras se realizará identificando los productos que han pasado por la estación en el período de tiempo desde la calibración anterior. En el último capítulo de esta obra analizaremos con más detalle esta forma de trazabilidad.

4.3. RPN límite

Una vez establecidos los grupos de clasificación y las características de cada uno, nos falta tomar una decisión sobre el RPN que tomaremos como frontera entre una clase y otra. A este valor lo llamaremos RPN límite.

De forma genérica, este valor suele corresponder con el resultado de un modo de fallo con valoración intermedia en los tres parámetros del FMEA: Ocurrencia, Severidad y Detectabilidad. Es decir, en el caso de un FMEA con escala de 1 a 10 como es nuestro caso, suele tomarse como RPN límite 125, que es el resultado que obtendría una línea de evaluación con un 5 en cada campo.

En nuestro caso utilizamos una especie de proceso iterativo de forma que tomamos como partida la cantidad típica de 125 para el RPN límite. Con este valor inicial, analizamos los casos con valores de RPN próximos al escogido que quedan dentro de cada grupo para evaluar la bondad del mismo.

En esta primera evaluación encontramos, entre otros casos, el siguiente ejemplo con el que justificamos una elección de 100 como valor de RPN límite.

TASK			ITEM				
			REQUIREMENT	UNIT	MEASURING DEVICE (FROM EXERCISE)	MEASURING DEVICE	TYPE
DS	OPERATION	DESCRIPTION					
M27470002012	1303	INSTALACIÓN THSA-VTP	130-150	Nm	Torcómetro de apriete crítico	TORCÓMETRO (> 5Nm)	Comprado

Tabla 4-1. Ejemplo de justificación de RPN límite

En el programa para el que estamos llevando a cabo este piloto, el Estabilizador Horizontal es trimable. Esta tarea se encuentra dentro de la operación de montaje del THSA (Trimmable Horizontal Stabilizer Actuators), el actuador que proporciona dicho movimiento pivotante. Este actuador se instala dentro del Estabilizador Horizontal, tal y como muestra la figura 4.2.

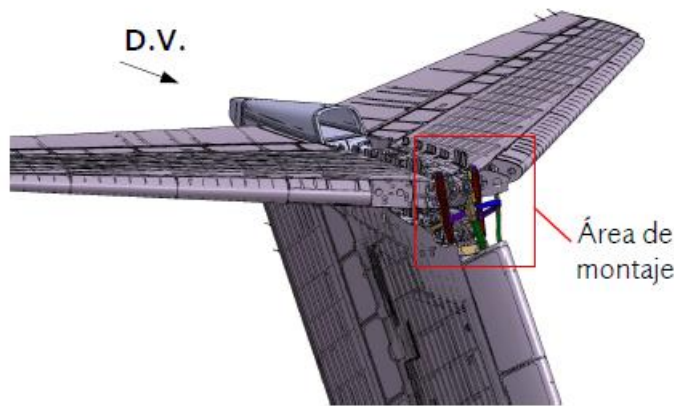


Figura 4-2. Zona de instalación del THSA

Dentro de esta operación de montaje, la tarea analizada corresponde a la fijación del THSA a los herrajes de cogida del VTP (Vertical Tail Plane), como podemos apreciar en la figura 4.3.

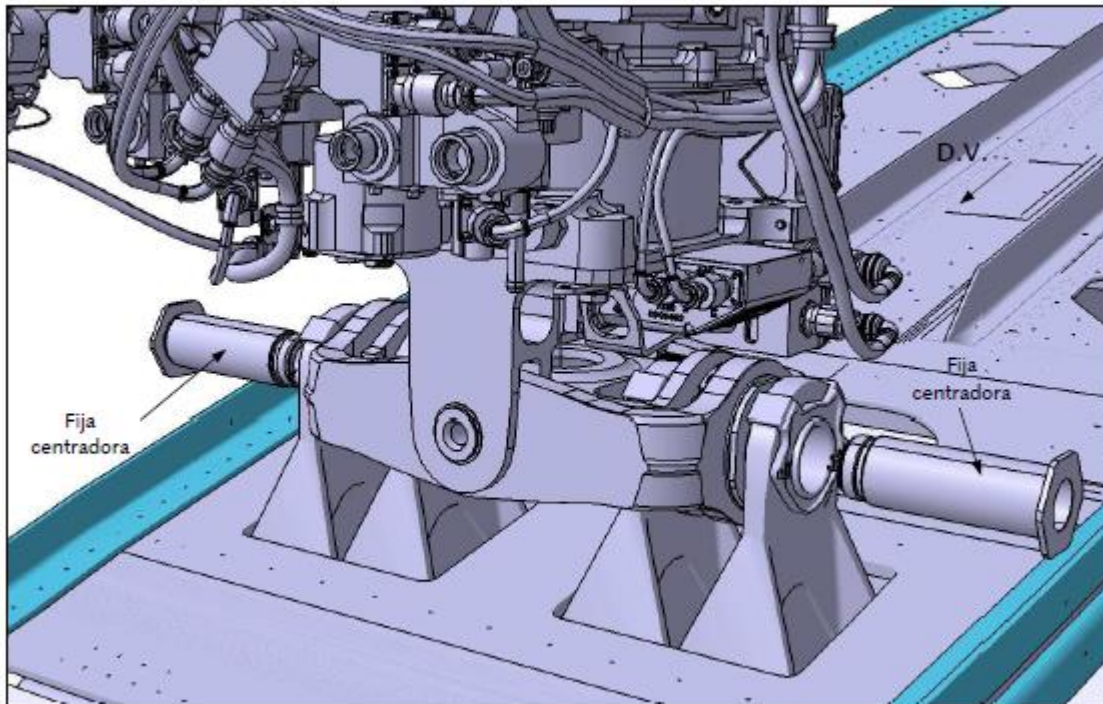


Figura 4-3. Detalle de instalación de bulones de cogida del THSA

En este caso, siguiendo las consideraciones establecidas en el capítulo 3, los valores asignados para los parámetros de evaluación del FMEA son:

Ocurrencia	3	RPN	126
Severidad	6		
Detectabilidad	7		

Tabla 4-2. Valores de FMEA para ejemplo de instalación de THSA

Con esto, obtenemos un RPN de 126 para este modo de fallo. En este resultado el factor que más influye es la detectabilidad por tratarse de una herramienta muy común y de localización variable; así como una zona de la aeronave muy poco revisitable.

La Severidad asignada es de carácter medio, pues se trata de un bulón trabajante a cizalladura, por lo que una desviación considerada del orden de la tolerancia de montaje no es crítica desde el punto de la Resistencia. Además, tampoco afectará a la Aerodinámica por ser una zona interior de la aeronave; ni a la Documentación de Servicio, por no tener repercusión respecto a futuras reparaciones o a la intercambiabilidad de las partes. El valor más bajo es el de la Ocurrencia, por tratarse de una herramienta con una probabilidad de fallo pequeña.

Notamos que una pequeña variación en la Severidad o en la Detectabilidad harían que este caso quedara dentro del GRUPO 2 DE CRITICIDAD, sin embargo consideramos que por el hecho de que, por ejemplo, se tratara de una zona un poco más visible del avión no afectaría mucho a la criticidad del modo de fallo, sin embargo

supondría que este quedara por debajo del RPN límite de 125, por tanto, decidimos continuar la iteración con un RPN límite menor.

Continuamos trabajando de esta forma hasta que concluimos con la elección de un RPN límite de 100. Así, en nuestro ejemplo, ante pequeñas variaciones como las que hemos contemplado obtendríamos:

<i>Ocurrencia</i>	3	<i>RPN</i>	105
<i>Severidad</i>	5		
<i>Detectabilidad</i>	7		

Tabla 4-3. RPN resultante al variar la Severidad

<i>Ocurrencia</i>	3	<i>RPN</i>	108
<i>Severidad</i>	6		
<i>Detectabilidad</i>	6		

Tabla 4-4. RPN resultante al variar la Detectabilidad

<i>Ocurrencia</i>	2	<i>RPN</i>	84
<i>Severidad</i>	6		
<i>Detectabilidad</i>	7		

Tabla 4-5. RPN resultante al variar la Ocurrencia

Así, como hemos razonado anteriormente, pequeñas disminuciones de Severidad o Detectabilidad que realmente no disminuyen notablemente la criticidad del modo de fallo, seguirían manteniendo el RPN por encima de 100. Por otro lado, para el caso en que la Ocurrencia disminuyese obtendríamos un RPN menor que el límite establecido, sin embargo, un valor de Ocurrencia menor que 3 supone, según el ranking establecido, que el modo de fallo es muy improbable, por lo que podríamos clasificar al conjunto dentro del GRUPO 2 DE CRITICIDAD en ese caso.

4.4. Reparto por grupos

Una vez establecidos los tres grupos de clasificación y los criterios que llevan a un determinado conjunto tarea-equipos de medida a entrar en cada uno, los resultados que obtenemos en la estación para la que llevamos a cabo el ejercicio se muestran a continuación:

Conjuntos Tarea-Equipo de medida

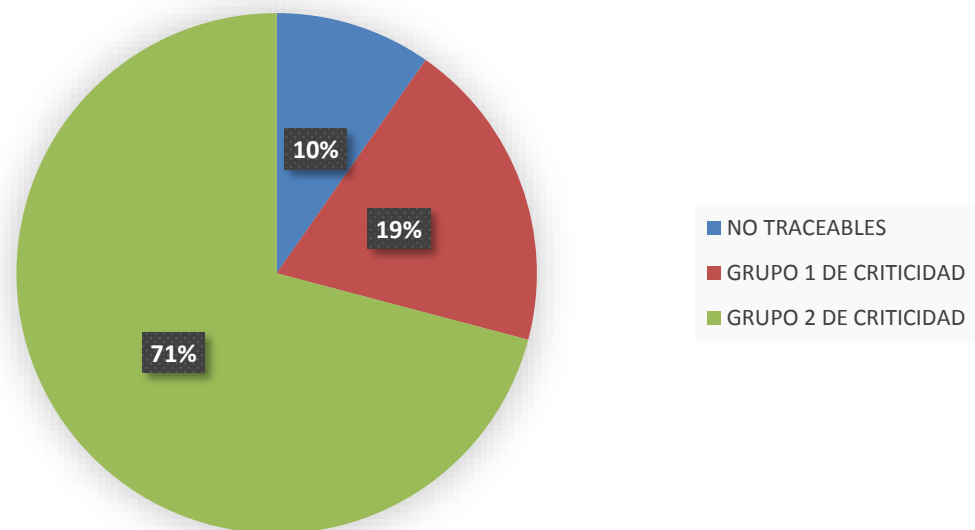


Figura 4-4. Número de conjuntos tarea-equipo de medida correspondientes a cada grupo

Conjuntos analizados	237	
NO TRACEABLES	23	10%
GRUPO 1 DE CRITICIDAD	46	19%
GRUPO 2 DE CRITICIDAD	168	71%

Tabla 4-6. Número de conjuntos tarea-equipo de medida correspondientes a cada grupo

Vemos que los resultados obtenidos con nuestro análisis concuerdan con los objetivos planteados. De este modo hemos reducido a aproximadamente un 20% del total el número de equipos a registrar durante el proceso de producción. Hagamos ahora alguna reflexión con respecto a estos datos.

La forma más sencilla de dar solución al requerimiento de registrar las herramientas que dan conformidad a nuestros productos es la adoptada para los productos del GRUPO 1 DE CRITICIDAD, esto es, asociar a la orden de trabajo el número de serie de la herramienta que se utiliza. Esta forma de trabajar nos asegura que, en caso de que se detecte que una herramienta se encuentra dentro de los límites de calibración aceptables, sabremos con certeza en qué productos y tareas ha sido utilizada. De esta forma tendremos capacidad de tomar rápidamente las acciones correctoras necesarias. Sin embargo, el hándicap principal de este método es el alto coste recurrente que supone registrar cada herramienta durante la fabricación.

Por este motivo, la reducción del número de herramientas a registrar fue lo que motivó nuestro proyecto. Como vemos, aplicando nuestro ejercicio para una estación de trabajo hemos justificar que, en aproximadamente un 80% de los casos este registro exhaustivo no es necesario. Sin embargo debemos de notar que, para los conjuntos de tarea-equipo de medida que quedan dentro del GRUPO 2 DE CRITICIDAD existe una desventaja muy

importante. Dicha desventaja radica en nuestra capacidad de respuesta ante un elemento de medida fuera de su rango de calibración. En ese caso existen dos opciones: la primera es que la desviación sea del orden de la considerada en nuestro ejercicio, en cuyo caso no sería necesario tomar ninguna acción puesto que el error sería técnicamente aceptable; por el contrario, la segunda situación es aquella en la que el error de calibración supere los umbrales considerados en el FMEA. En ese caso, el análisis de los posibles productos afectados sería muchísimo más complicado que mediante el método de registro directo. En el capítulo de conclusiones veremos algunas medidas propuestas para minimizar la probabilidad de ocurra esta última situación.

5 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Desarrollado el proyecto y presentados los resultados de nuestro análisis sólo nos queda hacer algunas consideraciones finales con respecto a los resultados obtenidos, trabajos futuros y a oportunidades de mejora que surgen a raíz de nuestra propuesta.

5.1. Trabajos futuros

La primera y más importante de las tareas que surgen es la elaboración por parte del departamento de Metrología de un catálogo de herramientas. Este documento recogería los datos de metrología necesarios en nuestro ejercicio y otros datos de interés para el equipo de trabajo que lleva a cabo el FMEA o el personal de Manufacturing Engineering encargado de elaborar las órdenes de trabajo (familia, intervalo de calibración, error máximo de calibración, resolución, nominal/capacidad, etc.). Este catálogo tiene se genera con los siguientes objetivos:

- En primer lugar, este catálogo se utilizará por parte del equipo de trabajo que lleva a cabo el FMEA para tomar los datos necesarios (familia, valor de Ocurrencia y umbral de calibración). Estos datos serán utilizados también por el personal de Manufacturing Engineering a la hora de elaborar las rutas. Así, este catálogo permitirá escoger herramientas cuyas características se adapten mejor a la tarea que se va a realizar, pues como hemos visto, en nuestro ejercicio, el tipo de herramienta influye en la mayoría de casos en el grupo de criticidad al que pertenecerá el modo de fallo.

Esta última consideración es muy importante pues estamos planteando la posibilidad de elaborar las rutas de trabajo de forma queelijamos, siempre que sea posible, el grupo de criticidad al que pertenecerá el conjunto tarea-equipo de medida.

- Ligada a la generación de este catálogo encontramos la necesidad de revisar la forma de calcular el parámetro de Ocurrencia que, como comentamos en la sección 3.3, hemos estimado para nuestro ejercicio piloto con los datos de fallos de calibración proporcionados por Metrología. Esta forma de proceder, aunque arroja resultados aceptables de cara a una prueba inicial como la que hemos realizado, se basa en datos empíricos y debe de ser revisado de forma que proporcione un valor de Ocurrencia que contemple las características del equipo de medida proporcionadas por el fabricante.

Una vez establecido el catálogo de herramientas, se procedería a implantar nuestro ejercicio como forma habitual de trabajo, lo que supondría:

- Identificación de todas las tareas de medición que se llevan a cabo en las distintas líneas de

negocio.

- Establecer equipos de trabajo multifuncionales, es decir, compuesto por profesionales de distintas áreas. Stamatis establece en su obra una recomendación sobre los distintos perfiles que deben aparecer en un equipo de entre 5 y 9 personas (1 p. 182). En nuestro caso consideramos que al menos los siguientes cargos son necesarios:
 - Ingeniero de Fabricación
 - Ingeniero de Calidad
 - Ingeniero de Producción
 - Ingeniero de Diseño
 - Ingeniero de Metrología (esta figura puede considerarse representada a través del catálogo)
 - Ingeniero de Herramientas (al igual que el ingeniero de metrología, este perfil aparece reflejado en el uso del catálogo de herramientas)

- Una vez establecidos los equipos de trabajo, estos deberán en primer lugar asignar a cada una de las tareas identificadas una herramienta escogida del catálogo (de forma general esta asignación se hará considerando las herramientas existentes en la estación en la que se va a llevar a cabo la tarea, salvo casos especiales donde se considere necesario la adquisición de un nuevo equipo de medida). En segundo lugar, debe de llevarse a cabo el FMEA para todos los conjuntos tarea-equipos de medida identificados.

- Por último, con los resultados del FMEA obtenidos, los responsables de Ingeniería de Fabricación deberán modificar sus órdenes de trabajo: estableciendo el registro directo para aquellos equipos de medida que entren dentro del GRUPO 1 DE CRITICIDAD y definiendo la herramienta concreta a emplear para aquellos que queden dentro del GRUPO 2 DE CRITICIDAD.

5.2. Comparación con otras alternativas consideradas

Además de nuestra propuesta, existen otras soluciones para dar respuesta al requerimiento de la Normativa. A continuación resumimos nuestra propuesta, en primer lugar, seguida con las dos alternativas más interesantes:

- Clasificación de criticidad en la medida mediante análisis de riesgo y registro de los equipos de medida pertenecientes al grupo 1 de criticidad.

- Registro global de todos los equipos de medida empleados colocando etiquetas con código de barras/QR en la herramienta y lectores en las estaciones. Esta solución es la más simple desde el punto de vista de la inversión inicial que supone, aunque su principal desventaja es el alto coste recurrente que supone.

- Registro global de todos los equipos de medida empleados empleando racks especiales. Existen en el mercado racks de herramientas equipados con software capaz de guiar la selección de las herramientas y además llevar a cabo la trazabilidad de los equipos de medida utilizados. Esta

solución minimiza el coste recurrente de registro, aunque supone una fuerte inversión inicial, ligada principalmente a la adquisición de estos racks.

Tal y como pretendíamos, nuestro estudio supone una solución de compromiso entre las otras dos alternativas. De esta forma, por un lado reduce la inversión inicial que supondría la adquisición de los racks especiales, pues con nuestra propuesta la trazabilidad se lleva a cabo de forma manual por el usuario y; por otro lado, minimiza el número de equipos de medida que el operario debe registrar de forma manual. Así, tal y como vimos en la sección 4.4, para nuestro ejercicio piloto llevar a cabo la clasificación mediante análisis de riesgo reduce a un 20% del total el número de herramientas cuya trazabilidad habría que llevar a cabo de forma directa.

5.3. Conclusiones

A continuación vamos a listar algunas de las conclusiones más importantes de nuestro ejercicio:

- La conclusión más importante que obtenemos es la expuesta en el apartado 5.2, esto es, nuestra propuesta supone una solución de compromiso entre una fuerte inversión inicial en sistemas de trazabilidad avanzados y un sistema de trazabilidad global de forma manual.
- En todo momento hemos utilizado criterios conservativos: amplios errores considerados (véase sección 3.4) y clasificación como GRUPO 1 DE CRITICIDAD para los modos de fallo que puedan afectar a la resistencia, funcionalidad o satisfacción del cliente (véase sección 3.4). De este modo, conseguimos reducir costes pero sin que ello suponga ningún riesgo con respecto a la aeronavegabilidad.
- Para el resto de conjunto tarea-equipos de medida que dan conformidad a nuestros productos pero quedan dentro del GRUPO 2 DE CRITICIDAD establecemos un sistema de trazabilidad indirecta. Con esto aseguramos nuestra capacidad de detectar los productos afectados ante un error de calibración. Este sistema supone un coste extra de detección de dichos productos, pero nuestro ejercicio minimiza la probabilidad de tener que llevarla a cabo.
- Las dos alternativas consideradas en apartado 5.2 se centran únicamente en satisfacer los requerimientos de la Normativa. Nuestra propuesta, además de dar respuesta a la auditoría fallida, ofrece visibilidad de los tres parámetros que componen el análisis de riesgos para todos los modos de fallo, lo que permite acciones de mejora continua y posibilidad de adoptar medidas adaptadas a cada caso.

REFERENCIAS

- [1] D. H. Stamatis, *Failure Mode and Effect Analysis*, Second Edition, 2003.
- [2] M. Galván, *Failure Modes and Effects Analysis Handbook (FMEA)*, Issue 4, 2011.
- [3] C. Vallellano, *Apuntes de Instalaciones de Fabricación y Sistemas de Producción*, 2014
- [4] U.S.A. Department of Defense, *MIL-STD-1629A. Procedures for performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*, 1980
- [5] C. Carlson, *Understanding and Applying the Fundamentals of FMEAs*, 2014
- [6] AENOR, *UNE-EN 9100 – Sistemas de gestión de la calidad*, 2010
- [7] http://www.tecnoxplora.com/empresas/diez-errores-que-han-acabado-imperio-nokia_2013091300151.html
- [8] http://www.phonearena.com/news/Top-10-smartphone-makers-in-Q1-2015-Sony-and-Microsoft-drop-out-of-the-picture-Chinese-phone-makers-take-over_id69643
- [9] <http://www.leansolutions.co/conceptos/amef/>
- [10] http://www.fmea-fmeca.com/NASA_FMEA_Presentation.pdf
- [11] https://www.aenor.es/aenor/certificacion/calidad/calidad_aerospacial_9100.asp#.V87uQvnhDGI