

Proyecto Fin de Grado

Ingeniería de Organización Industrial

Implantación de la metodología Lean Seis Sigma en un proceso de mantenimiento aeronáutico

Autor: Irene Fons Jareño

Tutor: Antonio Sánchez Herguedas

Dpto. Organización Industrial y Gestión de
Empresas I
Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Sevilla, 2020



Proyecto Fin de Grado
Ingeniería de Organización Industrial

Implantación de la metodología Lean Seis Sigma en un proceso de mantenimiento aeronáutico

Autor:
Irene Fons Jareño

Tutor:
Antonio Sánchez Herguedas
Profesor asociado

Dpto. de Organización y Gestión de Empresas I
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2020

Proyecto Fin de Grado: Implantación de la metodología Lean Seis Sigma en un proceso de mantenimiento aeronáutico

Autor: Irene Fons Jareño

Tutor: Antonio Sánchez Herguedas

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2020

El Secretario del Tribunal

A mi familia

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer este trabajo a mi familia, en especial a mis padres, por su confianza y apoyo incondicional durante estos años. Por sus consejos, amor y paciencia. A mis hermanas, Alicia y Elena, por ayudarme siempre. Gracias por vuestro cariño.

También quiero agradecer a mis amigos, los que siempre han estado y los que han aparecido durante estos cuatro años. María, Isabel y Nazaret, esta etapa ha sido más bonita gracias a vosotras.

Por último, me gustaría agradecer a mi tutor, Antonio Sánchez Herguedas, por su tiempo y dedicación. Sin su ayuda no hubiera sido posible la realización de este trabajo.

Irene Fons Jareño

Sevilla, 2020

Resumen

En este proyecto de fin de grado se ha elaborado un plan de mejora para un proceso de mantenimiento de aeronaves mediante la aplicación de la metodología Lean Seis Sigma con el fin de reducir la duración excesiva de las revisiones de mantenimiento programado. En concreto, el plan de mejora ha sido elaborado siguiendo las cinco fases que componen la metodología DMAIC.

En primer lugar, para detallar el problema a solventar y determinar la finalidad del proyecto se han estudiado cada una de las fases del proceso haciendo uso del diagrama SIPOC, el diagrama de flujo, la voz del cliente y el acta de constitución del proyecto.

Seguidamente, para medir la situación inicial del proceso de mantenimiento se analizaron los datos relativos a las últimas trece revisiones de mantenimiento programado realizadas por la empresa empleando el programa Minitab.

Posteriormente, con ayuda del diagrama de Ishikawa y el diagrama de Pareto se inició una búsqueda y un análisis de las posibles causas potenciales de la alta duración de las revisiones. Seguidamente, para mitigar dichas causas, se llevó a cabo una tormenta de ideas en la que se propusieron ocho mejoras. De esas ocho propuestas, cuatro de ellas fueron seleccionadas para ser implementadas atendiendo al esfuerzo económico que supondría su puesta en marcha y al impacto que generaría en la empresa teniendo en cuenta los días en los que se verían reducidas las revisiones si dicha mejora fuese implementada.

Finalmente, para asegurar el correcto funcionamiento de las nuevas medidas se ha elaborado un plan de control.

Abstract

The main goal of this project was to develop an improvement plan for an aircraft maintenance process using the Lean Six Sigma methodology to reduce the duration of scheduled maintenance reviews. Specifically, the improvement plan has been done following the five phases that make up the DMAIC methodology.

In the first place, to detail the problem to be solved and determine the purpose of the project, each phase of the process has been studied using the SIPOC diagram, the flow diagram, the voice of the customer and the project charter.

Secondly, to measure the initial situation of the maintenance process, the data related to the last thirteen scheduled maintenance reviews carried out by the company were analyzed using Minitab.

Subsequently, a search and analysis of the possible potential causes of the long duration of the reviews was started using the Ishikawa diagram and the Pareto diagram. Then, to mitigate these causes, a brainstorm was carried out in which eight improvements were proposed. Of these eight proposals, four of them were selected to be implemented taking into account the economic effort that their implementation would entail and the impact it would generate on the company, taking into consideration the days in which the revisions would be reduced if said improvement were implemented.

Finally, to ensure the proper functioning of the new measures, a control plan has been drawn up.

Agradecimientos	9
Resumen	11
Abstract	13
Índice	15
Índice de Tablas	17
Índice de Figuras	18
1 Introducción	1
1.1 <i>Justificación del proyecto</i>	1
1.2 <i>Objeto del proyecto</i>	1
1.3 <i>Sumario del proyecto</i>	1
2 Entorno de trabajo	3
2.1 <i>La empresa</i>	3
2.2 <i>Proceso de mantenimiento programado de aeronaves</i>	3
2.2.1 <i>Planificación</i>	3
2.2.2 <i>Pruebas iniciales</i>	3
2.2.3 <i>Inspección</i>	4
2.2.4 <i>Reparación</i>	4
2.2.5 <i>Pruebas finales</i>	4
3 Metodología Lean Seis Sigma	5
3.1 <i>Lean Seis Sigma</i>	5
3.1.1 <i>Origen</i>	5
3.1.2 <i>Lean Manufacturing</i>	6
3.1.3 <i>Seis Sigma</i>	9
3.1.4 <i>Metodología DMAIC</i>	12
3.1.5 <i>Roles Lean Seis Sigma</i>	15
3.1.6 <i>Beneficios de Lean Seis Sigma</i>	16
4 Implementación de Lean Seis Sigma	17
4.1 <i>Definir</i>	17
4.1.1 <i>Diagrama SIPOC</i>	17
4.1.2 <i>Diagrama de flujo</i>	18
4.1.3 <i>Voz del cliente</i>	19
4.1.4 <i>Project charter</i>	20
4.2 <i>Medir</i>	22
4.3 <i>Analizar</i>	24
4.3.1 <i>Diagrama de Ishikawa</i>	24
4.3.2 <i>Diagrama de Pareto</i>	25
4.4 <i>Mejorar</i>	27
4.4.1 <i>Propuesta de mejoras</i>	27
4.4.2 <i>Análisis de costes</i>	28
4.4.3 <i>Elección de mejoras</i>	31
4.5 <i>Controlar</i>	34

5 Conclusiones	35
6 Anexo	36
6.1 <i>Anexo A: Tabla de conversión Nivel Sigma</i>	36
6.2 <i>Anexo B: Historial de compras</i>	37
6.3 <i>Anexo C: Plan de formación interna</i>	38
6.4 <i>Anexo D: Herramientas y equipos de apoyo</i>	39
6.5 <i>Anexo E: Hoja de control</i>	40
7 Referencias	41

Índice de Tablas

Tabla 1 Niveles sigma. Fuente: [Elaboración propia]	11
Tabla 2 Simbología Diagrama flujo. Fuente: [Elaboración propia]	18
Tabla 3 Causas del problema. Fuente: [Elaboración propia]	26
Tabla 4 Costes salariales. Fuente: [Elaboración propia]	29
Tabla 5 Costes indirectos. Fuente: [Elaboración propia]	29
Tabla 6 Costes salariales programa de capacitación. Fuente: [Elaboración propia]	30
Tabla 7 Análisis de costes de las mejoras. Fuente: [Elaboración propia]	31
Tabla 8 Evaluación del impacto de las mejoras propuestas. Fuente: [Elaboración propia]	32
Tabla 9 Plan de control. Fuente: [Elaboración propia]	34

Índice de Figuras

Figura 3-1 Templo Lean. Fuente: [Elaboración propia]	7
Figura 3-2 Principios Lean Manufacturing. Fuente: [Elaboración propia]	9
Figura 3-3 Niveles sigma. Fuente: [www.sixsigma-institute.org]	10
Figura 3-4 Variabilidad nivel sigma. Fuente: [Elaboración propia]	10
Figura 3-5 Ciclo PDCA. Fuente: [Elaboración propia]	12
Figura 3-6 Ciclo DMAIC. Fuente: [Elaboración propia]	13
Figura 3-7 Roles Lean Seis Sigma. Fuente: [Elaboración propia]	15
Figura 4-1 Diagrama SIPOC. Fuente: [Elaboración propia]	17
Figura 4-2 Diagrama de flujo. Fuente: [Elaboración propia]	18
Figura 4-3 Árbol CTQ's. Fuente: [Elaboración propia]	19
Figura 4-4 Tiempo empleado vs Coste de la revisión. Fuente: [Elaboración propia]	20
Figura 4-5 Distribución ideal de las revisiones. Fuente: [Elaboración propia]	20
Figura 4-6 Project Charter. Fuente: [Elaboración propia]	21
Figura 4-7 Gráfico de control. Fuente: [Elaboración propia]	22
Figura 4-8 Gráfica de probabilidad Normal. Fuente: [Elaboración propia]	23
Figura 4-9 Histograma de Capacidad. Fuente: [Elaboración propia]	23
Figura 4-10 Gráfica de capacidad. Fuente: [Elaboración propia]	23
Figura 4-11 Diagrama de Ishikawa. Fuente: [Elaboración propia]	24
Figura 4-12 Diagrama de Pareto. Fuente: [Elaboración propia]	26
Figura 4-13 Matriz Impacto vs Esfuerzo. Fuente: [Elaboración propia]	33

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Justificación del proyecto

Hoy en día la finalidad principal de toda empresa es obtener los máximos beneficios con los mínimos recursos posibles. El hecho de poder evitar ineficiencias, ya sean materiales o temporales, evitar desperdicios y reducir costos es fundamental para conseguir dicho objetivo.

Durante la realización de mis prácticas curriculares en Indra Sistemas se me brindó la oportunidad de proponer un plan de mejora que se centrara en reducir la duración de las revisiones de mantenimiento programado que se llevaban a cabo. A lo largo de los últimos años se había experimentado un incremento de la duración en las revisiones que había ocasionado la pérdida de varios clientes y el aumento de los costos.

Por un lado, al aumentar el tiempo de las revisiones se invierten más recursos materiales y humanos en dicha revisión en vez de usarlos para otro servicio/proyecto, por lo que el costo se ve incrementado. En el otro extremo, el cliente busca obtener el servicio de mantenimiento en el menor tiempo posible y al menor costo, es por ello, que la empresa debe buscar la forma de reducir el tiempo de las revisiones y optimizar los recursos.

1.2 Objeto del proyecto

El objetivo de este proyecto de fin de grado es el de aplicar la metodología Lean Seis Sigma a un proceso real de mantenimiento de aeronaves con el fin de proponer una serie de mejoras que permitan reducir la excesiva duración de las revisiones de mantenimiento programado y lograr así una mejora en la eficacia, una mayor satisfacción del cliente y una mayor competitividad de la empresa. Se trata de analizar el proceso de mantenimiento programado de las aeronaves y observar cómo se comportaría el sistema bajo las mejoras implementadas tras la aplicación de dicha metodología.

1.3 Sumario del proyecto

El objetivo de este apartado es explicar el contenido de este trabajo de fin de grado exponiendo las diferentes secciones de las que consta el documento. Este documento está formado por 5 capítulos que se describen brevemente a continuación.

- Capítulo 1: En este capítulo se da a conocer la empresa con la que se ha trabajado en este proyecto, especificando su actividad, su distribución a nivel mundial y su situación económico-financiera durante el ejercicio de 2019. También se describe de forma detallada el proceso de mantenimiento de aeronaves en la fase intermedia de su ciclo de vida que se lleva a cabo en la empresa y sobre el que se actuará para reducir la duración de las revisiones de mantenimiento programado.
- Capítulo 2: Una vez que se ha detallado el entorno de trabajo, en el capítulo 2 se explica el método de mejora continua a utilizar, Lean Seis Sigma. Para facilitar la comprensión de dicho método se diferencia entre Lean y Seis Sigma haciendo hincapié en la metodología DMAIC.
- Capítulo 3: El capítulo 3 es el núcleo principal del proyecto. Este capítulo está dividido en cinco puntos diferentes acorde a las cinco fases de la metodología DMAIC. Así, el primer punto se centra en la definición y comprensión del proceso y el problema a tratar a lo largo de este documento. El segundo y tercer punto engloban tanto los datos a partir de los cuales se comienza a trabajar como el análisis de los mismos. Por otro lado, el cuarto punto refleja una serie de mejoras propuestas para la reducción de las revisiones de mantenimiento programado y por último, el quinto punto hace referencia a un método de seguimiento y control para asegurar que las propuestas se cumplen y que se alcanzan los objetivos.

- Capítulo 4: Este capítulo consta de un breve resumen del proyecto en el que se destacan las mejoras conseguidas y las conclusiones obtenidas.
- Capítulo 5: Finalmente, el último capítulo contiene una recopilación de documentos necesarios para el desarrollo del proyecto.

2 ENTORNO DE TRABAJO

2.1 La empresa

La empresa a raíz de la cual se enmarca este proyecto de fin de grado es Indra Sistemas, una multinacional española que ofrece servicios de tecnología y consultoría en multitud de sectores. En concreto, Indra es un proveedor líder mundial de soluciones propias en los mercados de Transporte y Defensa.

Dentro del área de Defensa, la empresa lleva a cabo diversas actividades. Una de ellas es el mantenimiento programado¹ y correctivo² tanto de aeronaves nuevas como de aeronaves en su fase intermedia de su ciclo de vida. Es decir, de aeronaves que poseen una vida media de unos veinte años aproximadamente.

En cuanto al análisis económico-financiero de la empresa, cabe destacar que Indra ha acelerado su crecimiento en el último año obteniendo, en 2019, datos históricos con un resultado neto de 121 millones de euros de beneficio. Además, la empresa cuenta con más de 49.000 empleados y mantiene operaciones comerciales en más de 140 países.

2.2 Proceso de mantenimiento programado de aeronaves

En concreto, el proceso de mantenimiento con el que se trabajará a lo largo del proyecto es el mantenimiento de tipo programado que se realiza a los aviones en su fase intermedia del ciclo de vida. Para una mayor claridad, dividiremos este proceso en los cinco subprocesos que se detallan a continuación.

2.2.1 Planificación

El subproceso de Planificación comienza con la solicitud por parte del cliente (Operador aéreo, Fuerzas Armadas, etc.) de la ejecución del mantenimiento programado previamente definido por el poseedor del Certificado de Tipo³ (CT) de una aeronave.

El subproceso Planificación, por tanto, consistirá en el desarrollo del orden y precedencia de las tareas contempladas dentro de este plan de mantenimiento, así como en la realización de un estudio de los posibles riesgos del proceso con su consiguiente plan de mitigación. Finalmente, la planificación de los trabajos y el plan de mitigación serán presentados a la Dirección para su aprobación.

2.2.2 Pruebas iniciales

A continuación, como paso previo a la realización de las pruebas iniciales, y con la intención de prever posibles daños y/o incidentes de seguridad, será de obligado cumplimiento la realización de una primera inspección general de la aeronave.

Seguidamente, un grupo formado por mecánicos e ingenieros aeroespaciales llevarán a cabo una serie de pruebas funcionales iniciales de recepción (arranque de motores, pruebas de combustible, pruebas de mandos de vuelo...). Una vez realizadas estas pruebas funcionales se realizará una fase de preservación de la aeronave, como paso previo a la inducción de la aeronave dentro del hangar.

¹ El mantenimiento programado es aquel que se realiza de acuerdo con un programa de calendario establecido o un número establecido de unidades de utilización (UNE-EN 13306 Terminología del mantenimiento, 2018)

² Mantenimiento que se realiza después del reconocimiento de una avería y que está destinado a poner a un elemento en un estado en que pueda realizar una función requerida. (UNE-EN 13306 Terminología del mantenimiento, 2018)

³ Para que una aeronave posea dicho certificado, el titular debe presentar a la Autoridad correspondiente un plan de mantenimiento que asegure la aeronavegabilidad continuada de la aeronave a lo largo de su vida en servicio. Una vez aprobado dicho plan, éste debe desarrollarse tanto en su faceta programada como correctiva.

Por otro lado, los ingenieros aeroespaciales serán los encargados de interpretar y analizar el perfil de pruebas realizado junto con los parámetros recogidos y proceder a la elaboración de un documento que indicará los fallos y averías presentes en la aeronave (Informe 1).

2.2.3 Inspección

Tras las pruebas del apartado anterior, se realizará la fase de inspección. En primer lugar se realizarán las inspecciones denominadas de ensayos no destructivos (END⁴).

Con posterioridad a las inspecciones de END, y basándose en los manuales de mantenimiento aplicables los mecánicos de aeronaves certificados realizarán las inspecciones visuales: generales y detalladas. Tras la realización de las inspecciones, se generarán sendos informes donde quedarán recogidos los diferentes resultados (Informes 2 y 3 respectivamente).

Si se da el hipotético caso de que la aeronave no presenta ni fallos ni defectos, los mecánicos montarán todas las piezas que hubiesen sido desmontadas para acceder a la realización de todos los trabajos, y a continuación ser el ingeniero aeroespacial con la habilitación correspondiente, otorgada por la Autoridad, el que firme la renovación del Certificado de Aeronavegabilidad o CRS⁵ dando por concluido el proceso de mantenimiento y dejando el avión listo para la entrega al cliente.

2.2.4 Reparación

En la fase de reparación, el grupo de mecánicos sustituirá o reparará tanto los defectos estructurales como los fallos y averías de los sistemas de la aeronave, contando siempre con los conocimientos y los medios adecuados.

2.2.5 Pruebas finales

Finalmente, para comprobar la aeronavegabilidad de la aeronave revisada y/o reparada se efectuarán una serie de pruebas funcionales de aceptación o entrega, obteniéndose un documento de entrega (Informe 4).

Si el resultado de las pruebas es satisfactorio, los ingenieros generarán la documentación necesaria para la posterior firma del CRS. Si, por el contrario, tras las pruebas, se detecta alguna anomalía, ésta deberá ser corregida antes de la entrega al cliente.

⁴ Pruebas que no alteran de forma permanente las propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales de los elementos. Las más comunes en el campo aeronáutico son: líquidos penetrantes, partículas magnéticas, corrientes inducidas, ultrasonidos, Rayos X y ensayos termo-gráficos.

⁵ Certificate of Release: certificado que acredita que la aeronave cumple todas las normas y requisitos necesarios para poder volar.

3 METODOLOGÍA LEAN SEIS SIGMA

3.1 Lean Seis Sigma

Lean Seis Sigma es un método de mejora continua diseñado para eliminar defectos, maximizar la eficiencia y mejorar la satisfacción de los clientes. A la hora de reducir los defectos y los desperdicios generados para mejorar un proceso, podemos reducir la variabilidad del proceso (Seis Sigma), cambiar la media del proceso (Lean) o actuar simultáneamente en ambas (Lean Seis Sigma).

3.1.1 Origen

Las técnicas de organización de la producción surgen a principios del siglo XX en Estados Unidos con los trabajos realizados por F.W. Taylor⁶ y Henry Ford⁷.

Taylor estableció las primeras bases de la organización de la producción y posteriormente, Ford introdujo las primeras cadenas de fabricación de automóviles. Se trataba de acciones y técnicas que pretendían acabar con la producción en masa. Sin embargo, la ruptura con estas técnicas se produce en Japón, en donde se encuentra el primer germen reconocido del pensamiento Lean.

No obstante, los orígenes de la filosofía Lean hay que buscarlos en la figura del japonés Sakichi Toyoda⁸. Sakichi, conocido como el “Rey de los inventores japoneses” por sus contribuciones al desarrollo industrial, creó más de cien patentes entre las que destaca un dispositivo capaz de parar la máquina de coser cuando se rompía un hilo. Así, este sistema de “automatización con un toque humano” permitía a un solo operario controlar varias máquinas, lo que supuso una mejora en la productividad y un intento constante de mejorar los métodos de trabajo.

En 1929, este inventor y empresario textil decide vender los derechos de sus patentes de telares a la empresa británica Platt Brothers y fundar junto a su hijo Kiichiro la *Toyota Motor Company*. Esta firma, al igual que el resto de las empresas japonesas, se enfrentó al reto de construir una industria competitiva tras la Segunda Guerra Mundial. Pretendían lograr beneficios sin recurrir a las economías de escala. Para ello comenzaron a estudiar los métodos de producción de Estados Unidos con especial atención al control estadístico de procesos desarrollado por W. Shewart⁹ y a las técnicas de calidad de Edwards Deming¹⁰ y Joseph Moses Juran¹¹.

A finales de 1949 tras una visita a las empresas automovilísticas americanas, dos jóvenes ingenieros de la empresa, Eiji Toyoda y Taiicho Ohno, al que se le considera el padre del Lean Manufacturing, concluyeron que para fabricar automóviles de modelos variados a bajo coste se debía, en la medida de lo posible, suprimir los *stocks* y reducir los despilfarros. A partir de estas reflexiones, Ohno estableció las bases del nuevo sistema de gestión de Toyota, conocido como TPS (*Toyota Production System*) o JIT (*Just in Time*). Este sistema trataba de producir solo lo que el cliente demandaba y cuando éste lo solicitaba.

Posteriormente, las aportaciones de Ohno se complementaron con los trabajos del ingeniero Shigeneo Shingo y se desarrollaron nuevas técnicas que fueron enriqueciendo el sistema Toyota (*Kanban, Poka-Yoke...*). La suma de todas estas innovaciones al proceso de fabricación y su gran éxito hizo que el Gobierno japonés fomentara el modelo de Toyota dando lugar a la ventaja competitiva de la industria japonesa del último cuarto del siglo XX.

⁶ Frederick Winslow Taylor (1856-1915) fue un economista e ingeniero industrial estadounidense conocido por haber promovido la organización científica del trabajo.

⁷ Henry Ford (1863-1947), fundador de la Ford Motor Company, es considerado como el padre de las cadenas de producción utilizadas en la producción en masa.

⁸ Sakichi Toyoda (1867-1930) fue un inventor y empresario japonés, fundador de la Toyota Motor Company.

⁹ Walter Andrew Shewart (1891-1967) fue un físico, ingeniero y estadístico estadounidense conocido como el padre del control estadístico de la calidad.

¹⁰ William Edwards Deming (1900-1993) fue un estadístico estadounidense y principal difusor del concepto de calidad total.

¹¹ Joseph Moses Juran (1904-2008) fue un experto rumano-estadounidense en la gestión de la calidad.

En los años ochenta y principios de los noventa, Motorola era una de las muchas empresas que tenía problemas a la hora de hacer frente a la competencia japonesa. En 1987, Bob Galvin, Director General de la compañía por aquel entonces, con ayuda de los ingenieros Bill Smith y Maike Harry, puso en marcha un programa de calidad a largo plazo llamado “Programa de Calidad Seis Sigma” con el fin de seguir siendo competitivos en el mercado, mejorar la calidad de los productos y garantizar la fidelidad de los clientes. Este programa, que debía aplicarse en toda la compañía (productos, servicios y administración) establecía Seis Sigma como el nivel de capacidad necesario para obtener cero defectos. El nuevo programa permitía seguir y comparar el rendimiento de la empresa con las necesidades del cliente de una forma sencilla y con un alto nivel de calidad. Como resultado, el rendimiento de Motorola mejoró al instante consiguiendo ahorrar hasta 14 mil millones de dólares y aumentar los beneficios en un 20% anual durante los diez años posteriores al comienzo del programa.

Años más tarde, Harry fundó la *Six Sigma Academy* refinando las tácticas y estrategias. En 1991, se implantó la metodología Seis Sigma en Allied Signal llegando a conseguir un ahorro de 600 millones de dólares al año. Pero no fue hasta que Jack Welch la incorporó en General Electric en 1995 cuando verdaderamente se dio a conocer. Posteriormente, Seis Sigma ha ido evolucionando hasta ser una técnica que adquiere su máxima efectividad cuando se combina con Lean Manufacturing dando lugar a la metodología Lean Seis Sigma (LSS). En 2002, la publicación del libro “*Lean Six Sigma: Combining Six Sigma with Lean Speed*” dio a conocer los primeros conceptos relacionados con esta metodología.

3.1.2 Lean Manufacturing

Lean Manufacturing es una filosofía de trabajo, basada en las personas, que define la forma de mejora y optimización de un sistema de producción focalizándose en identificar y eliminar todo tipo de “desperdicios”, definidos éstos como aquellos procesos o actividades que usan más recursos de los estrictamente necesarios. (Hernández Matías & Vizán Idoipe, 2013)

Lean Manufacturing es un conjunto de técnicas centradas en identificar aquello que no agrega valor al cliente. En concreto, los ocho desperdicios o *mudas* que afectan negativamente a la productividad son los siguientes:

- Sobreproducción: El desperdicio por sobreproducción es el que se origina al fabricar más cantidad de la necesaria o más rápido de lo requerido.
- Inventario: El almacenamiento de productos es consecuencia de tener más existencias de las requeridas.
- Espera: El desperdicio o despilfarro por tiempo de espera es el resultado del consumo del tiempo que no agrega valor en actividades como el ajuste de máquinas o la espera de materiales. Son los tiempos perdidos o muertos.
- Transporte: Este despilfarro es el resultado de una manipulación innecesaria de materiales.
- Movimientos de las personas: Este tipo de *muda* se refiere al movimiento innecesario de operarios.
- Defectos: El despilfarro derivado de los errores da lugar a una gran pérdida de productividad, pues se debe realizar un trabajo extra como consecuencia de no haber ejecutado correctamente el proceso productivo.
- Procesos innecesarios: Este desperdicio proviene de aquellas tareas innecesarias y redundantes que no aportan valor al resultado final.
- Talento perdido: Se trata de un desperdicio del talento, habilidades, conocimientos y experiencias de los trabajadores de la empresa u organización.

Por otro lado, la “Casa del Sistema Toyota” o “Templo Lean” mostrada en la Figura 3-1 es un esquema visual que ayuda a entender la filosofía Lean. Como su nombre indica, este esquema tiene forma de casa o templo en el que se pueden diferenciar cuatro zonas: el techo, los pilares, la zona central y los cimientos. El techo de la casa está constituido por las metas perseguidas en esta filosofía, que se identifican con la mejor calidad y el menor coste y tiempo de entrega. Sujetando el techo se encuentran los dos pilares fundamentales de Lean Manufacturing, los sistemas JIT y *Jidoka*. Así, los cimientos de la casa son la base sobre la que se asientan los pilares y constituyen las herramientas y técnicas que se deben utilizar a la hora de implantar Lean en las

empresas. Y por último, la zona central de la casa: el factor humano. Éste hace referencia a un aspecto clave en la filosofía Lean, donde la formación, dedicación e involucración de los trabajadores y de la dirección es esencial para satisfacer las necesidades y expectativas de los clientes.

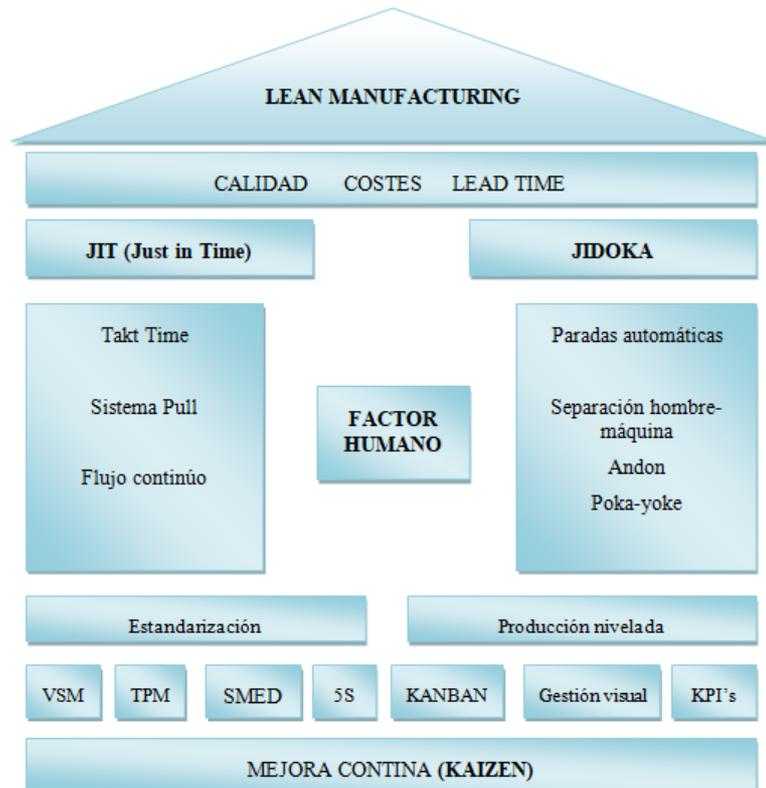


Figura 3-1 Templo Lean. Fuente: [Elaboración propia]

3.1.2.1 Pilares de Lean Manufacturing

Las siglas JIT se corresponden a la expresión anglosajona “*Just In Time*” y hacen mención a un sistema de gestión basado en la eliminación de desperdicios y en la llegada a tiempo de las materias primas y productos para la fabricación o el servicio al cliente. El sistema *Just In Time* o “Justo a tiempo” en español, está basado en tres elementos:

- *Takt Time* (TT): El *Takt Time* marca la velocidad de la línea de producción, significa sincronizar el ritmo de la producción con el de las ventas para evitar la sobreproducción. Para su cálculo se ha de tener cuenta el tiempo de trabajo medido en minutos o segundos y la producción requerida.

$$TT = \frac{\text{Tiempo de trabajo}}{\text{Producción requerida}}$$

- Sistema *Pull*: El sistema *Pull* limita la producción en función de las necesidades de los clientes. Se trata de producir aquello que se va a vender. En estos sistemas, cada proceso retira del anterior las piezas necesarias para continuar. De esta forma, el proceso anterior no comienza hasta que no es necesario.
- Flujo continuo: Se entiende por flujo continuo la fabricación o producción de forma regular y continuada.

El término *Jidoka* puede definirse como “automatización con un toque humano”. Este sistema consiste en la parada automática de las máquinas tras la detección de un fallo o problema en una operación. De este modo, en cada proceso se obtienen productos de calidad minimizando el número de defectos. Así, para alcanzar sus objetivos, *Jidoka* cuenta con dos herramientas: *Poka-Yoke* y *Andon*.

La palabra *Poka-Yoke* proviene de los términos japoneses *Poka* (errores imprevistos) y *Yokeru* (acción de evitar) y puede traducirse como “evitar errores imprevistos” o “a prueba de errores”. Así, esta herramienta nos permite disponer de un sistema a prueba de errores que ayuda a evitar los errores humanos. Por otra parte, *Andon* es una herramienta visual que nos da la posibilidad de conocer el estado actual de las operaciones en un área, identificar que acciones se deben realizar o que situaciones requieren atención inmediata.

3.1.2.2 Técnicas y herramientas Lean

Los cimientos principales del Lean Manufacturing sobre los que deben fundamentarse el resto de las técnicas Lean consisten en la estandarización, la nivelación de la producción o *heijunka* y la aplicación sistemática de la mejora continua o *kaizen*.

En primer lugar, la estandarización es una técnica que persigue la elaboración de instrucciones o descripciones gráficas y escritas que muestren y detallen el mejor método para hacer las cosas. Estandarizar implica hacer el trabajo de la mejor forma posible.

Por otro lado, *Heijunka* es una metodología que sirve para planificar y nivelar la demanda de clientes en volumen y variedad durante un día o turno de trabajo. El sistema *Heijunka* no varía la producción según la demanda del cliente, sino que se basa en ella para ajustar los volúmenes y secuencias de productos a fabricar para conseguir una producción que evite los despilfarros. (Hernández Matías & Vizán Idoipe, 2013)

Por último, la mejora continua es uno de los conceptos clave más importantes de la filosofía Lean. *Kaizen* significa “cambio para mejorar” y deriva de las palabras japonesas *KAI* (cambio) y *ZEN* (bueno). El espíritu de mejora continua se basa en un progreso continuo con el que se pretende alcanzar la excelencia. Se trata de un concepto que requiere del trabajo en equipo y de un cambio en la mentalidad de la organización.

En cuanto a las herramientas Lean Manufacturing que se han ido implementando con éxito en empresas de muy diferentes sectores y tamaños encontramos:

- *VSM (Value Stream Mapping)*: El mapa de la cadena de valor es una herramienta que permite representar de forma gráfica la cadena de valor y los flujos materiales y de información del proceso productivo. El principal objetivo del VSM es identificar dónde se producen los desperdicios dentro del proceso con el fin de eliminarlos y ganar mayor eficiencia.
- *TPM (Total Productive Maintenance)*: El Mantenimiento Productivo Total o TPM es un conjunto de técnicas que tratan de maximizar la eficacia de los sistemas de producción y evitar todo tipo de pérdidas asegurando cero accidentes, defectos y averías.
- *SMED (Single-Minute Exchange of Dies)*: Es una metodología o conjunto de técnicas que persiguen la reducción de los tiempos de preparación de una máquina o de cambio de herramientas en la cadena de producción.
- *Las 5S*: Técnica utilizada para la mejora de las condiciones del trabajo de la empresa a través de la organización, el orden y la limpieza en el puesto de trabajo. Su nombre proviene de las cinco palabras que en japonés designan la organización, el orden, la limpieza, la estandarización y la disciplina: *Seiri, Seiton, Seiso, Seiketsu* y *Shitsuke* respectivamente.
- *Kanban*: Se trata de un sistema de control y programación sincronizada de la producción basado en el uso de tarjetas o señales (*kanban*, en japonés) que advierten de una necesidad dentro de la cadena de producción.
- *Gestión visual*: El control o gestión visual son un conjunto de técnicas de control y comunicación visual que tienen por objetivo plasmar la situación del sistema productivo y el avance de las acciones de mejora.
- *KPI (Key Performance Indicator)*: Los indicadores clave de comportamiento o KPI's son métricas o indicadores que permiten el seguimiento de los progresos de mejora continua en las empresas u organizaciones.

3.1.2.3 Principios Lean

Los principios básicos mostrados en la Figura 3-2 sobre los que basa la filosofía Lean Manufacturing son cinco:

- Especificar el valor: El primer principio Lean tiene que ver con especificar el valor. Es decir, definir de la forma más exacta posible qué es lo que el cliente quiere o necesita. El valor hace referencia a lo que el cliente desea y por lo que está dispuesto a pagar.
- Identificar la cadena de valor: La cadena de valor hace referencia a todas aquellas actividades, tareas o pasos que se realizan en un proceso. Una vez conocidas las preferencias, exigencias y necesidades del cliente se deben evaluar todas las actividades involucradas en el proceso objeto de estudio para determinar cuáles de ellas aportan valor y cuáles no.
- Hacer que el valor fluya: Una vez identificada la cadena de valor, los procesos deben orientarse de tal forma que se mantenga un flujo continuo y regular de materiales y productos, evitando generar desperdicios como los movimientos y transportes innecesarios, la acumulación de *stock* y las esperas.
- Sistema *Pull*: El sistema *Pull* limita la producción en función de las necesidades de los clientes. Se trata de tener en cuenta lo que el cliente desea en cada momento y producir de acuerdo a su demanda.
- Perseguir la perfección: El quinto y último principio de Lean consiste en perseguir la perfección. La búsqueda continua de la perfección en cada operación o proceso, desde la concepción del producto hasta su entrega, es crucial para el logro de la excelencia empresarial y la satisfacción del cliente.

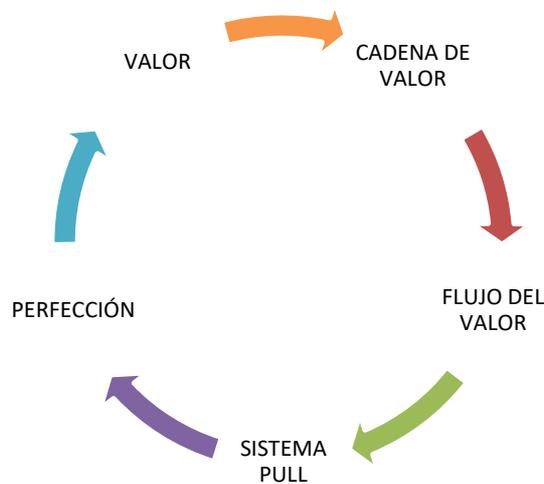


Figura 3-2 Principios Lean Manufacturing. Fuente: [Elaboración propia]

3.1.3 Seis Sigma

Seis Sigma o *Six Sigma* en inglés (SS), es una metodología de mejora de procesos centrada en la reducción de la variabilidad de los mismos que utiliza herramientas estadísticas para conseguir reducir los defectos y aumentar la satisfacción del cliente. Seis Sigma se enfoca en cómo incrementar la competitividad en el mercado al aumentar la satisfacción del cliente, mejorar la involucración del trabajador en la empresa e inculcar un cambio optimista en nuestro modo de vida para hacer crecer el negocio.

3.1.3.1 Variabilidad

Sigma es la letra griega “ σ ” usada en estadística para representar la desviación estándar de una población y se basa en la curva de distribución normal para conocer el nivel de variación de cualquier actividad. Es un parámetro que muestra la variabilidad existente en un proceso.

El nivel sigma es una forma de medir el proceso, es un indicador de variación que corresponde a cuantas desviaciones estándar caben entre los límites de especificación del proceso. Cuanto mayor sea el número de desviaciones estándar entre el promedio y los límites aceptables del proceso, menor será la probabilidad de que dicho proceso funcione más allá de los límites aceptables y cause un defecto. Como podemos observar en la Figura 3-3, a mayor nivel sigma mayor rendimiento. Así, un proceso con un nivel seis sigma tendrá un rendimiento del 99,999% mientras que el de otro proceso con un nivel uno sigma será del 68,26%. Por otro lado, en la Figura 3-4 vemos como a medida que el nivel sigma aumenta, la variabilidad del proceso disminuye.

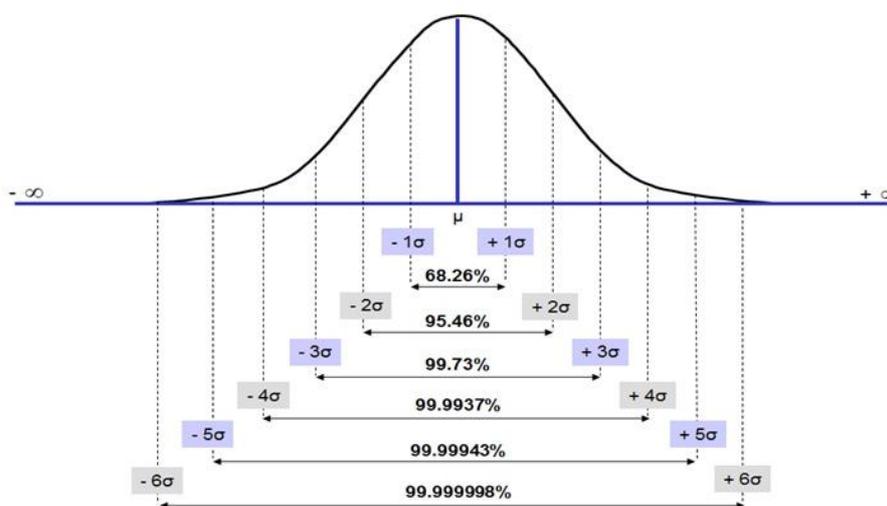


Figura 3-3 Niveles sigma. Fuente: [www.sixsigma-institute.org]

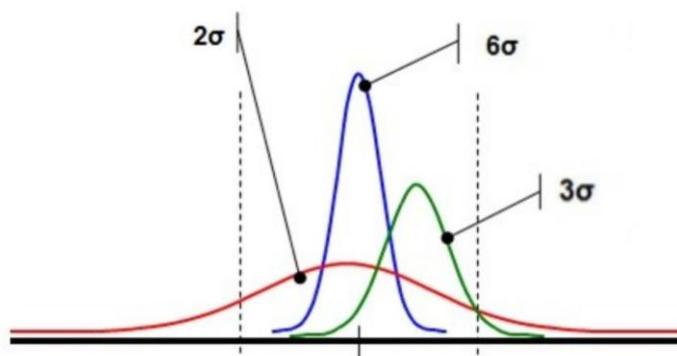


Figura 3-4 Variabilidad nivel sigma. Fuente: [Elaboración propia]

El nivel sigma está relacionado con el índice DPMO (defectos por millón de oportunidades). El objetivo principal de la metodología Seis Sigma consiste en obtener un índice DPMO no superior a los 3,4 defectos por millón, entendiendo por defecto todo aquello que cause la insatisfacción del cliente. Como podemos observar en la Tabla 1, un índice DMO de 3,4 corresponde a un nivel 6σ .

Nivel σ	Índice DPMO
1	690.000
2	308.537
3	66.807
4	6.210
5	230
6	3,4

Tabla 1 Niveles sigma. Fuente: [Elaboración propia]

3.1.3.2 Principios Seis Sigma

Seis Sigma se basa en seis principios claros o elementos críticos. Al igual que en la mayoría de los grandes inventos, en Seis Sigma no es todo nuevo. Algunos de sus principios surgen del pensamiento empresarial moderno mientras que otros se basan en el sentido común. Estos principios son:

- Auténtica orientación al cliente: La disciplina Seis Sigma establece como máxima prioridad la orientación al cliente, ya que las mejoras tras la implementación de la metodología se definen por su impacto en la satisfacción del cliente y su valor.
- Gestión orientada a datos y hechos: Seis Sigma empieza por determinar que medidas son las fundamentales para valorar el rendimiento del negocio. Seguidamente, los datos y los análisis servirán para comprender las variables principales.
- Orientación a procesos, gestión por procesos y mejora de procesos: Seis Sigma sitúa al proceso como un factor principal y clave para el éxito. Uno de los logros más notables de los esfuerzos Seis Sigma hasta la fecha ha sido convencer a los líderes y los directivos, especialmente en las actividades y mercados basados en servicios, de que dominar los procesos no es un mal necesario, sino realmente una forma de construir ventajas competitivas en la entrega de valor de los clientes. (Pande, Neuman, & Cavanagh, 2002)
- Gestión proactiva: Ser proactivo da lugar a la creatividad y al cambio. La gestión proactiva, en el ámbito empresarial, hacer referencia a definir objetivos ambiciosos, establecer prioridades de forma clara, centrarse en la prevención de problemas y plantearse por qué se hacen las cosas. Seis Sigma aboga por un estilo de gestión dinámico, sensible y proactivo.
- Colaboración sin fronteras: “Sin fronteras” es uno de los lemas para el éxito empresarial de Jack Welch, quién fomentó el trabajo en equipo y la colaboración dentro de las empresas, con los distribuidores y con los clientes.
- Búsqueda de la perfección, tolerancia a los errores: Este principio puede resultar contradictorio, parece imposible encaminarse hacia la perfección y tolerar los errores. Sin embargo, para aprender y poder mejorar hay que equivocarse. Para alcanzar el éxito primero hay que fracasar. Cualquier empresa que quiera implementar Seis Sigma debe esforzarse por ser cada vez mejor y estar dispuesta a aceptar y gestionar errores ocasionales.

3.1.4 Metodología DMAIC

La metodología DMAIC (*define, measure, analyze, improve, control*) es la empleada en los proyectos Lean Seis Sigma. Esta metodología, utilizada para mejorar procesos ya existentes, es considerada como una evolución del ciclo PDCA (del inglés *plan, do, check, act*).

El ciclo Deming o ciclo PDCA, originalmente ideado por Deming, es una herramienta de mejora continua muy utilizada en la calidad. Como vemos en la Figura 3-5, el ciclo PDCA está formado por cuatro etapas cíclicas que permiten reevaluar las actividades periódicamente para incorporar nuevas mejoras. Estas etapas son las siguientes:

- Planificar: Consiste en definir los objetivos, actividades y métodos a utilizar para conseguir unos resultados de acuerdo con los requisitos del cliente.
- Hacer: Se trata de ejecutar esas actividades planificadas.
- Verificar: Hay que comparar el resultado obtenido tras la ejecución de las actividades con el objetivo marcado inicialmente.
- Actuar: Se trata de realizar acciones correctivas y preventivas que permitan mejorar continuamente el desempeño.

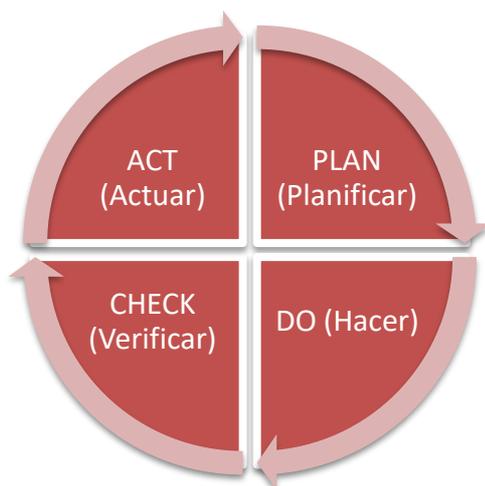


Figura 3-5 Ciclo PDCA. Fuente: [Elaboración propia]

La diferencia más importante entre estas dos herramientas radica en que el ciclo DMAIC es un ciclo de mejora basado en datos que se utiliza para mejorar y estabilizar procesos, mientras que el ciclo PDCA se emplea principalmente para la mejora continua en la gestión de procesos.

En definitiva, la metodología Seis Sigma utiliza un ciclo de mejora más completo. DMAIC es utilizado para la resolución de problemas más complejos, con gran cantidad de datos, mientras que el PDCA al ser un método más clásico únicamente se utiliza para problemas de tamaño medio. (Gisbert Soler, y otros, 2018)

En concreto, la metodología base de Seis Sigma está formada por las cinco etapas mostradas en la Figura 3-6, las cuales nos permiten hacer un análisis más profundo del proceso a mejorar recurriendo a métodos estadísticos. Estas fases son:

- Definir: Consiste en determinar y establecer los objetivos del proyecto y el problema a abordar.
- Medir: Se trata de recolectar datos e información para evaluar la situación inicial del proceso estudiado.
- Analizar: La finalidad de esta etapa es identificar la causa raíz del problema a solucionar.

- Mejorar: El objetivo principal de esta fase es establecer una solución al problema identificado.
- Controlar: Se trata de asegurar los avances conseguidos tras la implantación de las mejoras o soluciones propuestas.



Figura 3-6 Ciclo DMAIC. Fuente: [Elaboración propia]

3.1.4.1 Fase Definir

La primera fase o etapa de esta metodología es la de Definir. En ella se establecerán cuáles van a ser los objetivos de la implementación del programa Lean Seis Sigma, definiendo las bases del proyecto.

En primer lugar se deberá identificar el proyecto en el cual se va a implementar la metodología, indicando su alcance, los problemas que afectan al proceso estudiado y los objetivos de mejora. También se debe indicar quienes participarán y el nivel en el que se va a involucrar cada uno de los integrantes del equipo. Se identificarán a alto nivel los clientes y sus necesidades y otros datos que se consideren esenciales para garantizar el éxito del programa LSS.

Mediante la elaboración de un mapa de procesos se deberán especificar que actividades están involucradas en el proceso que se quiere mejorar y cómo están relacionadas. En cuanto a la definición del problema, cuánto más centrada y concreta sea, más fácil será entender los objetivos y expectativas del proyecto. Una buena definición del problema evita apuntar soluciones escondidas y describe el efecto que provoca y no la causa.

La mayoría de los proyectos evolucionan con el tiempo, por lo que es posible que en cada fase se aprenda algo más del proceso. En ese caso, se tendrá que volver a analizar el ámbito, la definición y el objetivo del proyecto. Durante toda la fase será esencial por tanto, documentar todos los procesos de trabajo.

3.1.4.2 Fase Medir

Una vez completada la fase de definición, se deben obtener datos y mediciones del proceso. El objetivo principal de esta segunda etapa es medir el rendimiento actual del proceso que se busca mejorar.

El primer paso a la hora de medir es asegurarse de que se comprende plenamente cómo funciona el proceso. Seguidamente, se deberá realizar la toma de datos, identificando a la fuente y preparando el muestreo y plan de recogida de datos.

En esta tercera fase, también analizaremos el sistema de medición y los datos utilizados a través de una serie de gráficos de tiempo, frecuencia y control. En definitiva, se trata de calcular el rendimiento para fijar los datos de partida del proceso y calcular el nivel sigma actual.

3.1.4.3 Fase Analizar

A través del análisis de los datos obtenidos en la etapa anterior podremos determinar la causa raíz de los fallos o problemas y proponer oportunidades de mejora.

A veces, tras un análisis rápido y visual del mapa de procesos elaborado en la primera etapa, es posible evidenciar algunas fuentes de ineficiencias en el proceso. Sin embargo, estas sospechas o hipótesis deben validarse y confirmarse con datos.

Para lograr una mejora en las actividades y en los resultados de la empresa, se deben realizar análisis de datos y procesos. Mientras que para el análisis de datos existen algunas herramientas estadísticas como por ejemplo, el análisis de la varianza (ANOVA) o el diseño de experimentos (DOE), para el análisis de procesos se suelen emplear análisis de valor añadido y de tiempos con el fin de establecer el tiempo de ciclo, la capacidad del proceso e identificar los cuellos de botella que limitan el proceso estudiado.

Al final de la fase Analizar, se debe tener al menos una hipótesis confirmada con respecto a las causas del problema.

3.1.4.4 Fase Mejorar

El objetivo de la fase Mejorar es establecer una solución al problema o problemas identificados. Para cada causa y problema hay que identificar las soluciones potenciales, priorizarlas y seleccionar las que se vayan a implantar.

Durante esta etapa debemos estar comunicados con todos los miembros del equipo de trabajo y mantenernos receptivos a nuevas ideas y diferentes opiniones o puntos de vista. No es bueno juzgar ni descartar ideas de forma inmediata, una solución descabellada puede conducir a una buena solución final.

Con la participación de los integrantes del equipo, se pueden establecer los criterios para la evaluación de las posibles mejoras. Dichos criterios deben ser objetivos y pueden incluir aspectos como el coste o el tiempo de ejecución.

Una vez identificadas las mejoras a implantar, se debe llevar a cabo un seguimiento de las nuevas tareas a realizar con el fin de comparar el antes y el después. Para ello, se deben evaluar los resultados y los riesgos pudiéndose utilizar pruebas piloto o métodos de prueba de errores. Se trata de determinar si hay una mejora en el proceso objeto del proyecto.

3.1.4.5 Fase Controlar

El objetivo final de la última fase, denominada fase de Control, es asegurar que las ventajas y avances obtenidos a través de las mejoras implementadas en la fase anterior se mantengan una vez finalizado el proyecto. Tras la implantación de las mejoras y documentación de los resultados, hay que seguir midiendo el comportamiento del proceso y ajustarlo cuando se produzcan desviaciones o cambien los requerimientos.

La mejora de la calidad se verá reflejada a través de los nuevos ideales sigma alcanzados. Para controlar la implantación de los nuevos métodos de trabajo y la evolución de las variables críticas se elaborará un plan de control.

Es primordial tener una cultura que recompense el mantenimiento de los procesos mejorados. Es fundamental asegurarse de que todas las experiencias, análisis y resultados quedan bien documentados y transferidos a quienes van a seguir gestionando el proceso. Por último, es importante hacer un cierre adecuado del proyecto, reconociendo el esfuerzo y dedicación de todos los involucrados.

3.1.5 Roles Lean Seis Sigma

En Lean Seis Sigma, los roles y grados de responsabilidad están muy bien identificados. Se organizan según una jerarquía dependiendo del nivel de formación y se les atribuyen nombres relacionados con la disciplina de las artes marciales.

El nivel de jerarquía Lean Seis Sigma, mostrado en la Figura 3-7, tiene la siguiente estructura:

- **Líderes ejecutivos:** Para que un proyecto LSS tenga éxito, debe estar totalmente respaldado por algún ejecutivo de alto nivel, como pueden ser el presidente de la organización o CEO (*Chief Executive Officer*). Los líderes ejecutivos se encargarán de impulsar la metodología Lean Seis Sigma como estrategia organizacional de la empresa y de facilitar los recursos necesarios para su implantación.
- **Los Campeones (*Champions*):** Por lo general, los campeones son miembros de la dirección. Sus funciones principales son ofrecer soporte para la identificación y selección de proyectos, ayudar a eliminar las barreras para la correcta ejecución de los proyectos y guiar al equipo de trabajo de acuerdo con la estrategia organizacional.
- **Cinturón Negro Máster (*Master Black Belt*):** Los *Master Black Belts* poseen una formación rigurosa, son expertos en el uso de las herramientas Lean y Seis Sigma y como tales, dedican el 100% de su tiempo a proyectos LSS. Estos profesionales asumen la función de mentores y entrenadores de *Black Belts* y son los principales agentes de cambio dentro de la organización hacia Lean Seis Sigma.
- **Cinturón Negro (*Black Belt*):** Los cinturones negros dominan el uso de las herramientas estadísticas. Estos profesionales, que dedican el 80% de su tiempo a programas LSS, son líderes en el desarrollo, ejecución y seguimiento de proyectos LSS.
- **Cinturón Verde (*Green Belt*):** Los *Green Belts* dominan las herramientas Lean y Seis Sigma. Estos profesionales participan y lideran proyectos LSS bajo la tutela de los *Black Belts* pero su objetivo principal es generar oportunidades de mejora en la organización.
- **Cinturón Amarillo (*Yellow Belt*):** Los cinturones amarillos dominan la metodología Lean y contribuyen, como miembros del equipo, en los programas LSS.
- **Cinturón Blanco (*White Belt*):** Los cinturones blancos, generalmente, tienen un papel de apoyo dentro de los proyectos LSS.



Figura 3-7 Roles Lean Seis Sigma. Fuente: [Elaboración propia]

3.1.6 Beneficios de Lean Seis Sigma

La aplicación de Lean Seis Sigma es válida para cualquier empresa que busque maximizar sus resultados y hacer que sus operaciones sean más acertadas. Adoptar la metodología Lean Seis Sigma proporciona diversas ventajas para las empresas orientadas a la excelencia operativa. Entre los beneficios se pueden mencionar:

- Reducción de costes.
- Reducción de inventario.
- Aumento de la productividad.
- Reducción de defectos.
- Cumplimiento de plazos de entregas.
- Aumento de ventas.
- Mejora en la satisfacción de los clientes.
- Enriquecer la comunicación entre la empresa y el cliente, y entre los empleados.

Otro de los beneficios o ventajas principales que aporta a las empresas esta metodología es la capacidad de promover el entrenamiento dentro de la organización para acelerar el desarrollo y la puesta en común de nuevas ideas. Lean Seis Sigma establece una cultura de organización que permite mantener los resultados con el paso del tiempo.

4 IMPLEMENTACIÓN DE LEAN SEIS SIGMA

4.1 Definir

El objetivo de esta primera etapa es determinar la finalidad del proyecto y sus límites. Las herramientas LSS que utilizaremos serán: diagrama SIPOC, diagrama de flujo, la voz del cliente y el acta de constitución.

4.1.1 Diagrama SIPOC

El diagrama SIPOC es una de las técnicas más útiles en la gestión y mejora de procesos. Este diagrama es de gran ayuda a la hora de entender el proceso a mejorar ya que proporciona una visión global y sencilla del mismo.

El nombre de esta herramienta, como se muestra en la Figura 4-1, procede de los acrónimos en inglés de los cinco elementos que la componen. El proveedor (*supplier*) es la persona o grupo de personas que suministra los recursos necesarios (*inputs*) para el proceso (*process*) mientras que el cliente (*customer*), como sabemos, es el destinatario final del resultado del proceso (*output*).

A la hora de definir el segmento “P” del diagrama, se ha utilizado un diagrama formado por cinco bloques. Cada uno de estos bloques representan los subprocesos principales del proceso estudiado: Planificación, Pruebas Iniciales, Inspección, Reparación y Pruebas Finales.

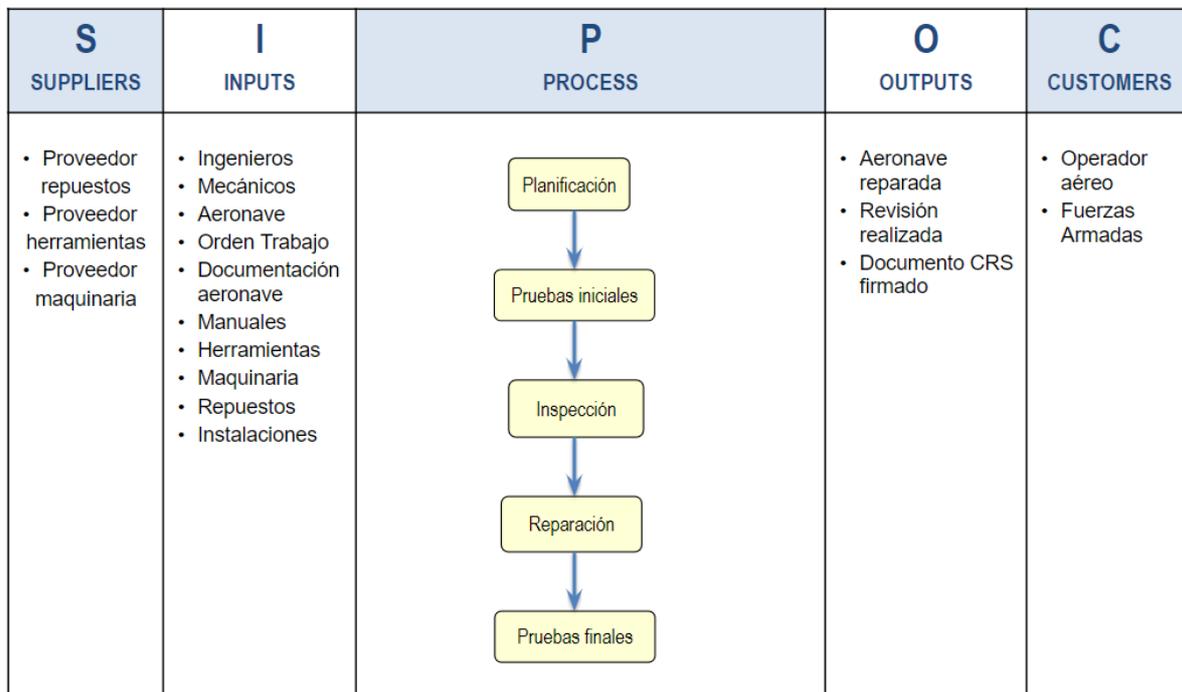


Figura 4-1 Diagrama SIPOC. Fuente: [Elaboración propia]

4.1.2 Diagrama de flujo

Los diagramas de flujo, son diagramas claros y fáciles de comprender. A la hora de representar gráficamente un proceso haciendo uso de este diagrama, emplearemos una serie de figuras geométricas definidas de antemano que se conectan entre así a través de líneas que marcan la dirección del flujo. La simbología más común se explica brevemente en la Tabla 2.

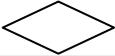
Símbolo	Nombre	Función
	Inicio/ Final	Representa el inicio o el final de un proceso
	Línea de flujo	Indica el orden de ejecución de las actividades
	Actividad	Muestra la tarea que se debe realizar
	Decisión	Nos permite analizar una situación
	Documento	Hace referencia a un documento generado o consultado

Tabla 2 Simbología Diagrama flujo. Fuente: [Elaboración propia]

Esta herramienta nos permite estudiar el proceso de mantenimiento de aeronaves en profundidad. Como observamos en la Figura 4-2, cada subproceso se ha dividido en las tareas que se han de realizar teniendo en cuenta aquellos documentos que se generan o se consultan.

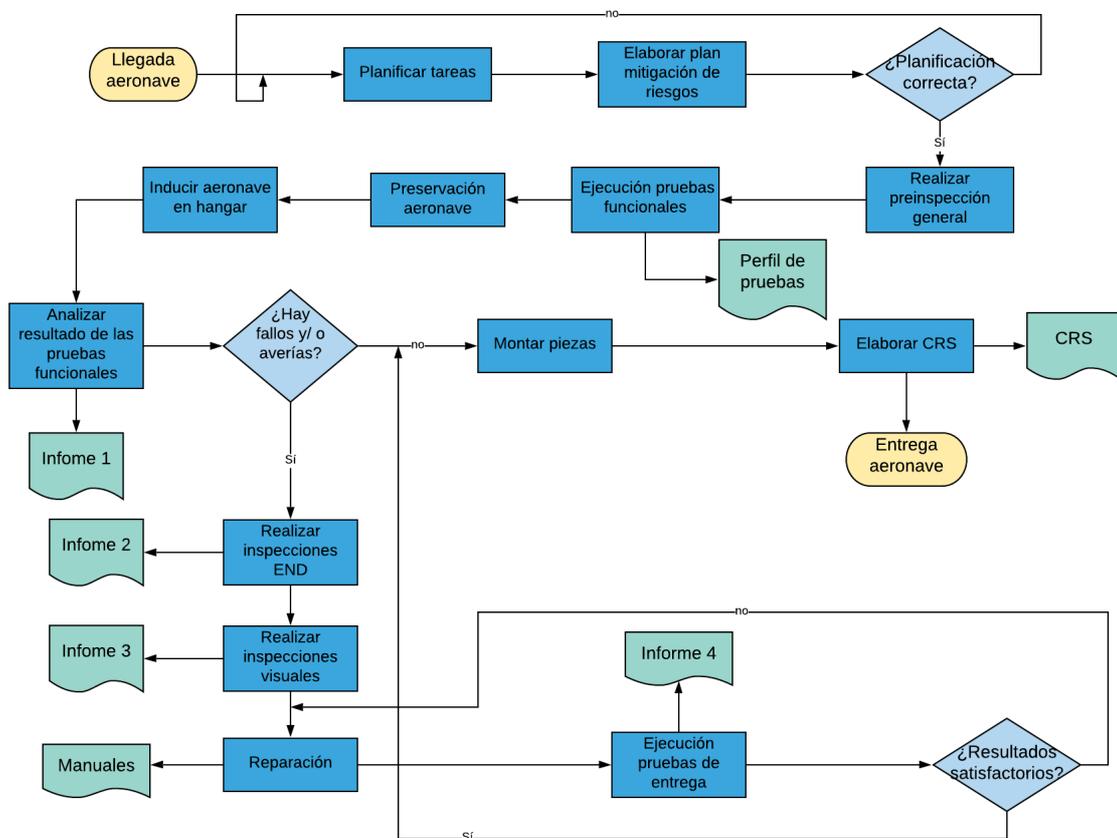


Figura 4-2 Diagrama de flujo. Fuente: [Elaboración propia]

4.1.3 Voz del cliente

La voz del cliente es una de las herramientas más importantes dentro de la metodología Seis Sigma. Hasta ahora nos habíamos centrado en describir y definir el proceso de mantenimiento programado desde el punto de vista de alguien que está muy familiarizado con él y con su entorno, pero hay que tener en cuenta que muchas veces, el cliente no conoce el proceso y se limita a tener consciencia del resultado final que éste genera. Se trata de escuchar y conocer a los clientes, no de pensar por ellos.

De los clientes debemos conocer sus necesidades, qué es importante para ellos y qué consideran como defecto. Para recoger toda esta información relativa al cliente existen dos formas básicas de hacerlo. En la forma proactiva, la empleada en este caso, será la empresa la encargada de obtener dicha información mientras que en la reactiva será el cliente quién la facilite. En cuanto a las técnicas de toma de datos encontramos métodos tradicionales como los sondeos o las entrevistas y métodos de nueva generación como el almacenamiento y la explotación de datos (*data warehousing* y *data mining* respectivamente). En concreto, los dos últimos son los empleados en esta ocasión.

La voz del cliente (VOC, *Voice of Customers*) es una herramienta que nos ayuda a determinar e identificar los parámetros clave en los requerimientos de calidad formulados por el cliente (CTQ, *Critical to Quality*). Estos parámetros quedan reflejados en el diagrama de árbol de la Figura 4-3.

Por un lado, con el fin de garantizar la seguridad de la tripulación y de los pasajeros, el cliente busca que a la hora de realizar las revisiones se cumplan todos los procedimientos y actuaciones indicados en las normativas aplicables (EASA¹² y PERAM¹³), que la documentación y los datos asociados a la revisión se correspondan con la realidad y que éstos estén actualizados en todo momento y que los elementos, rotables y consumibles, utilizados estén certificados. Por otro lado, para mantener la operatividad de la aeronave, al operador aéreo le interesa que al cumplir el intervalo de mantenimiento de las revisiones, la aeronave sea revisada de forma casi inmediata, evitando los tiempos de espera a la entrada de la aeronave en el hangar y asegurando la entrega a tiempo. De este modo, se establece un máximo de cuatro meses desde la llegada del avión para llevar a cabo las revisiones.

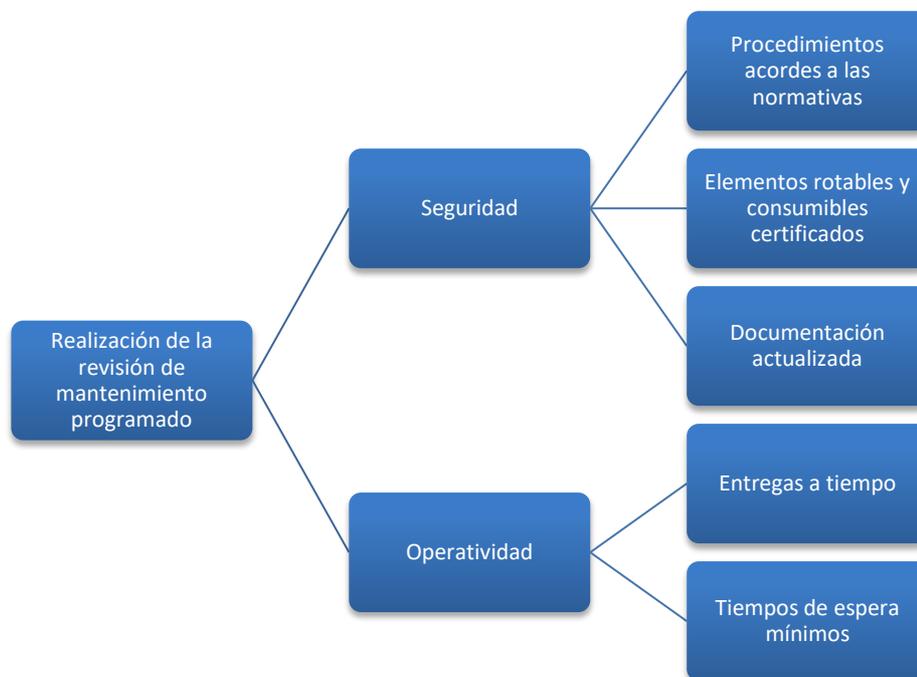


Figura 4-3 Árbol CTQ's. Fuente: [Elaboración propia]

¹² European Union Aviation Safety o Agencia Europea para la Seguridad Aérea.

¹³ Publicación Española de Requisitos de Aeronavegabilidad Militares.

4.1.4 Project charter

El *project charter* o acta de constitución del proyecto es una herramienta en la cual se detallan los aspectos fundamentales del proyecto.

4.1.4.1 Definición del problema

La duración de las revisiones de mantenimiento programado está determinada por el fabricante del modelo de aeronave, estableciéndose una duración mínima de tres meses y una máxima de siete meses. Además, el plan de mantenimiento de la aeronave aprobado por la Autoridad Aeronáutica establece que el intervalo entre revisiones programadas debe ser de veinticuatro meses.

Por otro lado, se sabe que el cliente establece la duración ideal de las revisiones programadas en cuatro meses. Sin embargo, la realidad indica que en los últimos años, la mayoría de las revisiones realizadas por la empresa tienen una duración mucho mayor a la estipulada como modelo, lo que genera una disminución de ingresos y un gran descontento por parte del cliente, ya que se produce un detrimento en la operatividad de la aeronave.

A su vez, como muestra la curva de la Figura 4-4, al aumentar el tiempo de duración de las revisiones se incrementa el coste asociado a ellas, ya que los recursos materiales y humanos necesarios también se ven incrementados. Por otro lado, en la Figura 4-5 se muestra la distribución ideal de las revisiones de mantenimiento programado. Así, un aumento en la duración de las revisiones significará un mayor solape entre aviones, esto es, el número de revisiones realizadas por la empresa será menor mientras que el número de revisiones no asumibles aumentará. Es decir, el aumento de la duración de las revisiones se traduce en una disminución de los ingresos.

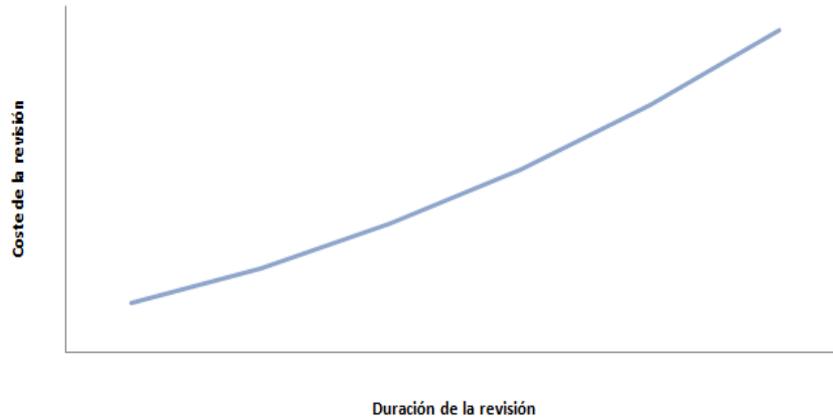


Figura 4-4 Tiempo empleado vs Coste de la revisión. Fuente: [Elaboración propia]

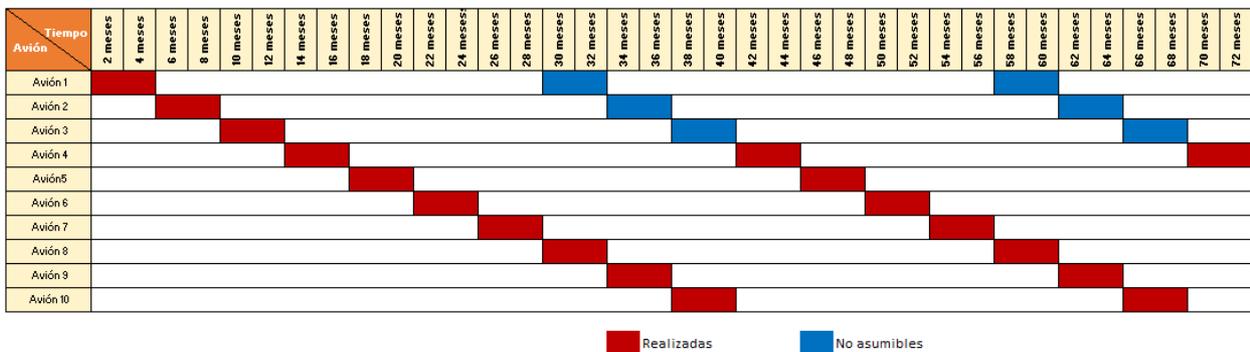


Figura 4-5 Distribución ideal de las revisiones. Fuente: [Elaboración propia]

4.1.4.2 Objetivos y alcance del proyecto

El proyecto se enmarca en un concepto genérico que pretende conseguir un proceso de mantenimiento más eficiente y eficaz. Mediante la elaboración de este proyecto buscaremos reducir el tiempo de las revisiones de mantenimiento programado garantizando que se cumplan los requisitos establecidos por el cliente.

Además de cumplir con las especificaciones del cliente, al reducir la duración de las revisiones se aumentará el número de revisiones realizadas por la empresa y la distribución de las revisiones se parecerá más a la ideal o teórica de la Figura 4-5. Es un objetivo ambicioso pero realista y alcanzable, ya que se trata de reducir la duración de las revisiones sin aumentar el personal ni las instalaciones designadas a estas operaciones.

Con esta reducción se prevé aumentar el rendimiento así como aumentar los ingresos al llevar a cabo las revisiones que en la situación anterior no se podían asumir.

4.1.4.3 Limitaciones del proyecto

A la hora de desarrollar el proyecto se va a tener en cuenta las siguientes limitaciones:

- Disponemos de un solo hangar para desarrollar las distintas tareas, por lo cual, solo podremos reparar un avión a la vez.
- Los recursos humanos con los que cuenta la empresa son limitados, es decir, no se puede contratar nuevos empleados.

Finalmente, en la Figura 4-6 quedan resumidos los objetivos, el alcance y las limitaciones del proyecto, así como los miembros de que conforman el equipo.

PROJECT CHARTER	
<p>Caso de negocio</p> <p>El operador aéreo, cliente potencial de la empresa, no permite el retraso de las revisiones mantenimiento programado. Con ello, el tiempo máximo establecido por el cliente para el desarrollo de las mismas es de 4 meses.</p>	<p>Definición del problema</p> <p>Durante los últimos años, la media de la duración de las revisiones de mantenimiento programado es de 5,5 meses. Esto supone que de las trece revisiones realizadas, nueve han superado el límite establecido por el cliente.</p>
<p>Alcance</p> <p>Se encuentra dentro del alcance de este proyecto, la propuesta de una serie de mejoras que ayuden a reducir la duración de las revisiones de mantenimiento programado.</p> <p>Las revisiones de mantenimiento no programado realizadas por la empresa se encuentran fuera del alcance del proyecto.</p>	<p>Objetivos</p> <p>El objetivo principal de este proyecto es la reducción de la duración de las revisiones de mantenimiento programado con el fin de aumentar la satisfacción del cliente e incrementar los ingresos.</p>
<p>Limitaciones</p> <p>A la hora de llevar a cabo este proyecto de mejora se tendrá en cuenta que tan solo se dispone de un hangar para desarrollar las tareas y que los recursos humanos con los que cuenta la empresa son limitados.</p>	<p>Miembros del equipo</p> <ul style="list-style-type: none"> - Champion -Master Black Belt -Ingenieros aeronáuticos -Mecánicos

Figura 4-6 Project Charter. Fuente: [Elaboración propia]

4.2 Medir

El objetivo de esta etapa es conocer la situación inicial del proceso de mantenimiento de aeronaves. Para ello, se ha recurrido a los datos históricos de la empresa, obteniendo las mediciones relativas a las últimas trece revisiones cumplimentadas.

El plan de medición de tiempo de la empresa asegura que los datos son un reflejo exacto de lo ocurrido en la realidad. Los criterios de valoración de los tiempos empleados en la medición son los siguientes:

- El tiempo de la revisión comienza a contar desde el momento en el que el avión se posiciona en las instalaciones de la empresa mediante un vuelo Ferry.¹⁴
- El tiempo de la revisión finaliza cuando, tras la firma del CRS, el cliente acepta el avión.

Por otro lado, para establecer la línea base del proceso, se tuvo en cuenta el ciclo de tiempo para el desarrollo de las revisiones de mantenimiento programado de los últimos seis años. Los resultados de esta línea base del proyecto fueron una media de 5,5 meses y una desviación estándar de 1,034. A continuación se representa los resultados obtenidos.

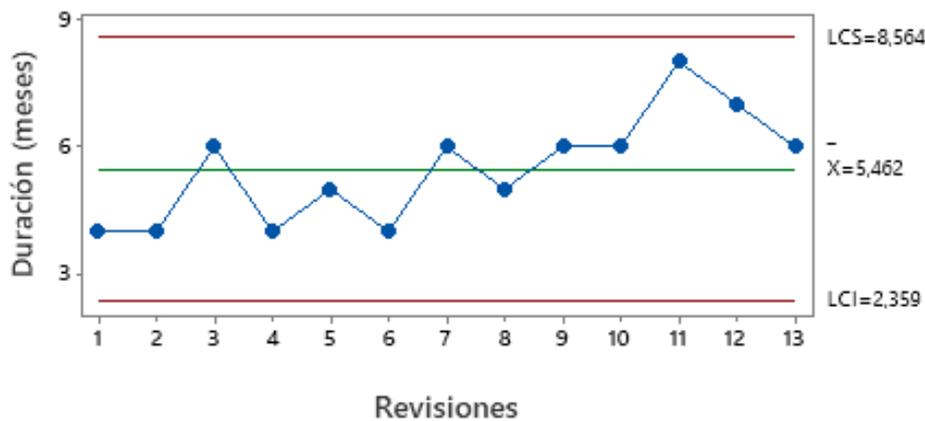


Figura 4-7 Gráfico de control. Fuente: [Elaboración propia]

Como se comprueba en la gráfica de las Figura 4-7, los datos mostraron que las duraciones siguieron un patrón aleatorio sin exceder los límites de control, considerando que el proceso de mantenimiento programado de las aeronaves en su fase intermedia del ciclo de vida estaba bajo control.

Por otro lado, los índices de capacidad son valoraciones numéricas de la capacidad del proceso que hacen referencia al nivel con el que se cumplen las especificaciones del proceso, es decir, indican si un proceso es capaz de cumplir con las especificaciones del cliente. Los índices de capacidad asociados con la variación a corto plazo son C_p y C_{pk} , y a largo plazo P_p y P_{pk} .

Para poder interpretar correctamente los índices de capacidad se comprobó que los datos recolectados verificaban la hipótesis de normalidad. Como se muestra en la gráfica de la Figura 4-8, el nivel P-valor (0,073) resultó mayor que el nivel de significancia (0,05), lo que nos permite concluir que los datos siguen una distribución normal.

¹⁴ Un vuelo Ferry es aquel que se realiza en condiciones especiales una vez cumplido el intervalo de mantenimiento de las revisiones de la aeronave, desde la base operativa al centro de mantenimiento.

Es conocido que el rendimiento en función del nivel sigma está tabulado, por lo que consultando el Anexo A obtenemos un nivel sigma actual de 1, nivel considerado como muy bajo.

$$\text{Rendimiento} = \left(1 - \frac{\text{Defectos encontrados}}{\text{Posibles defectos}}\right) \times 100$$

$$\text{Rendimiento} = \left(1 - \frac{9}{13}\right) \times 100 = 31\%$$

4.3 Analizar

En esta tercera etapa analizaremos cuáles son las principales causas por las que las revisiones duran más de lo establecido. Algunas de las herramientas más empleadas para analizar datos y descubrir los problemas en profundidad, identificando y validando sus causas raíces son el diagrama de Ishikawa y el diagrama de Pareto.

4.3.1 Diagrama de Ishikawa

El diagrama de Ishikawa o diagrama causa-efecto, también conocido como diagrama fishbone o espina de pescado debido a la forma que acaba teniendo, muy similar al esqueleto de un pez, consiste en una representación gráfica que permite visualizar las causas que explican un determinado problema.

Como se observa en la Figura 4-11, para cada categoría definida (máquinas, métodos, materiales, mano de obra, medidas y medio) se han establecido las posibles causas del aumento de la duración de las revisiones de mantenimiento programado.

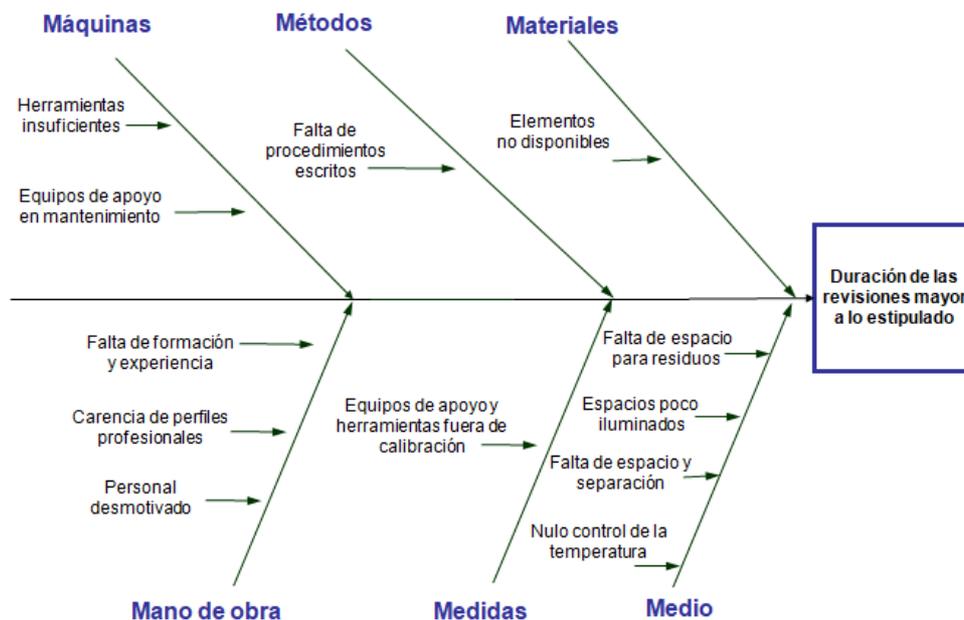


Figura 4-11 Diagrama de Ishikawa. Fuente: [Elaboración propia]

En primer lugar, se observó que tan solo se disponía de cinco cajas de herramientas para un total de 20 mecánicos, lo que suponía que no todos ellos podían trabajar de forma adecuada y por lo tanto, una mayor lentitud en algunas de las tareas como el montaje y desmontaje de las piezas. También se observó, que durante el periodo de tiempo en que las revisiones incrementaron su duración, se estaba realizando el mantenimiento de varias máquinas o equipos de apoyo y otras tenían cumplida su calibración, esto es, dicha maquinaria no podía utilizarse.

Como se ha mencionado al inicio de este proyecto, los aviones con los que se trabaja están en la fase intermedia de su ciclo de vida, por lo que no están afectados ni por la incertidumbre de la fase inicial de desarrollo ni por la cercanía de su límite de validez (LOV¹⁵) en el que se incrementa de manera exponencial el mantenimiento requerido. Sin embargo, en lo relativo a la aviónica y a los sistemas del avión, es en esta etapa en la que se inicia el fenómeno de la obsolescencia, debido, en gran medida, al desarrollo de nuevas tecnologías en respuesta a las exigentes demandas normativas. Es por ello por lo que algunos de los elementos que son necesarios durante la fase de mantenimiento serán obsoletos y estarán descatalogados. Por consiguiente, dado que son escasos y normalmente tienen un coste elevado y su *lead time* es alto, su adquisición entraña una dificultad añadida. Con lo cual, no siempre estarán disponibles cuando se necesiten y si no se prevé con tiempo suficiente su compra la planificación inicial puede verse alterada.

Con respecto a las mediciones se observó que con frecuencia se cometían errores debido a la no existencia de procedimientos a la hora de realizar algunas de las pruebas iniciales o finales y que varios de los instrumentos de medida no estaban calibrados.

Por otro lado, con respecto a la mano obra se observó además de: una falta de motivación, de experiencia y de formación en los nuevos trabajadores incorporados en los últimos años, una carencia de los perfiles profesionales requeridos debido a la jubilación de varios compañeros con un gran *know-how*¹⁶ a sus espaldas.

Finalmente, con respecto a las instalaciones, se observó una falta de espacio y separación en algunos lugares del hangar y la carencia de un espacio adecuado para el tratamiento y el almacenamiento de residuos según la norma ISO 14001. Así mismo, se apreció un nulo control sobre la temperatura y la falta de luminosidad en algunos lugares de trabajo, lo que potenciaba la falta de motivación de los trabajadores.

4.3.2 Diagrama de Pareto

Por otro lado, para tratar de determinar cuál es la causa raíz más importante de las identificadas anteriormente, se ha utilizado el diagrama de Pareto.

Como muestra la Tabla 3, cada una de las causas se ha evaluado en función del impacto que generan en una revisión. Es decir, teniendo en cuenta los días en los que la duración de las revisiones de mantenimiento programado se ve aumentada por cada causa.

¹⁵ Limit of validity o Límite de validez de la aeronave: periodo máximo de capacidad operativa segura de la aeronave.

¹⁶ Conocimiento y experiencia adquirida a lo largo de los años de trabajo.

Causa	Descripción	Impacto (días)
1	Herramientas insuficientes	10
2	Equipos de apoyo en mantenimiento	7
3	Falta de procedimientos escritos	5
4	Elementos no disponibles	30
5	Falta de formación y experiencia	15
6	Carencia de perfiles profesionales	10
7	Personal desmotivado	7
8	Equipos de apoyo y herramientas fuera de calibración	4
9	Inadecuada gestión de residuos	4
10	Espacios poco iluminados	4
11	Falta de espacio y separación	4
12	Nulo control de la temperatura	2

Tabla 3 Causas del problema. Fuente: [Elaboración propia]

La Figura 4-12 muestra el diagrama de Pareto, que consiste en un gráfico de barras que clasifica de izquierda a derecha, en orden descendente, las causas identificadas según el impacto generado. Así, atendiendo al principio de Pareto o regla 80/20, observamos que las causas que provocaron cerca del 80% del retraso fueron:

- La no disponibilidad de elementos.
- La falta de formación y experiencia del nuevo personal.
- La insuficiencia de herramientas en el hangar.
- La carencia de perfiles profesionales.
- Equipos de apoyo en mantenimiento.
- Personal desmotivado.

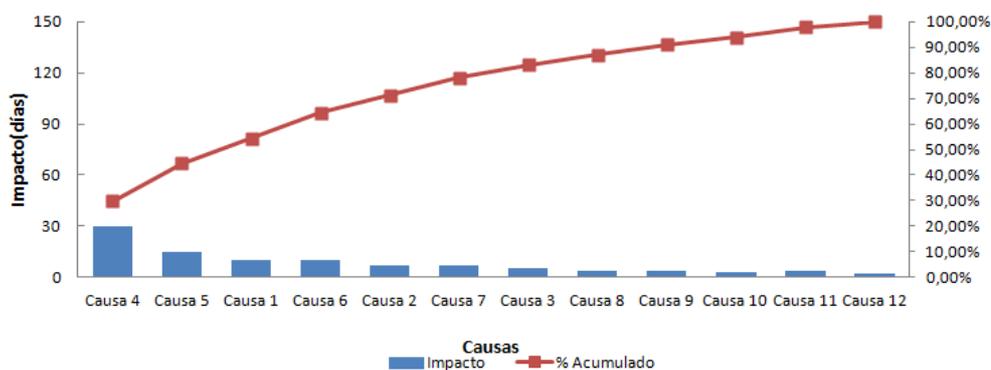


Figura 4-12 Diagrama de Pareto. Fuente: [Elaboración propia]

4.4 Mejorar

Una vez descritas las causas hay que identificar posibles soluciones potenciales para cada una de ellas.

4.4.1 Propuesta de mejoras

La tormenta de ideas es una herramienta que facilita la búsqueda de oportunidades de mejora liberando la creatividad y generando nuevas ideas sobre un tema o problema determinado. Se trata de anotar distintas ideas para seleccionar las más adecuadas. Las mejoras que se plantean son las siguientes:

1. Actualización del plan de compras mediante un monitoreo constante del inventario.

Garantizar la eficiencia del proceso de compras generará una reacción positiva que se traduce en el ahorro de tiempo y dinero. La actualización del plan de compras actual mediante un monitoreo constante del inventario nos dará la oportunidad de conocer que repuestos se consumen con mayor rapidez, que elementos requieren un abastecimiento inmediato o que repuestos tienen una baja rotación para evitar compras innecesarias. Se trata de disponer, en todo momento, de aquellos recursos materiales que sean necesarios.

2. Valoración de los proveedores mediante la elaboración de un historial de compras.

La no disponibilidad de algunos de los recursos necesarios se ve favorecida por la dificultad que supone encontrar ciertos rotables que están obsoletos o descatalogados. En la mayoría de los casos los proveedores que trabajan con estos elementos son pocos.

Dado que la búsqueda de proveedores es un proceso laborioso que requiere un gran esfuerzo, la elaboración de un historial de compras (Anexo B) puede ser de gran ayuda. Un historial que reúna de manera eficiente todos los datos relacionados con los proveedores (plazos de entregas, calidad, etc.) puede ayudar a tomar decisiones rápidas y adecuadas, así como a detectar si se debe iniciar la búsqueda de nuevos proveedores tras la valoración de los mismos.

3. Implantación de un programa de capacitación.

La contratación de nuevos mecánicos es otra de las causas principales de la excesiva duración de las revisiones. La falta de experiencia y formación dan lugar a una mayor lentitud a la hora de realizar los trabajos.

Para intentar resolver este problema se plantea un programa de capacitación que consistiría en un cambio en la composición de los equipos de trabajo y la creación del puesto de líder de equipo. Se trata de crear ciclos de formación en el trabajo, de dividir a los trabajadores en grupos según las tareas relacionadas con la mecánica y la aviónica que se realizan normalmente en las revisiones. El objetivo de esta mejora es que el mecánico experto, es decir, que el líder de equipo transmita sus conocimientos al resto de miembros del grupo. Una vez completado la formación en un ciclo, el personal rotaría al siguiente, consiguiendo de esta manera una formación polivalente.

Dado que hay 20 mecánicos, de los cuales cuatro son expertos, se crearán cuatro grupos. Así, habría dos grupos relacionados con la mecánica y dos con la aviónica, de cinco integrantes cada uno.

4. Elaboración de un plan de formación interna.

Otra posible mejora relacionada con la falta de formación de los mecánicos es la elaboración de un plan de formación interna (Anexo C) para ampliar la oferta formativa incorporando cursos teóricos específicos que permitan profundizar en las habilidades y destrezas correspondientes en cada puesto de trabajo. Se pretende contribuir al aprendizaje, perfeccionamiento y especialización en el uso de diversos equipos de apoyo y puesta al día de los nuevos procedimientos.

5. Elaboración de un plan de motivación.

La falta de motivación observada entre los empleados generada por la mala integración de los nuevos mecánicos y la poca comunicación lleva a proponer un plan de motivación. La motivación, el talento y la implicación de los empleados de la organización son pilares fundamentales para el buen funcionamiento de la empresa.

A la hora de elaborar el plan de motivación se definirán una serie de estrategias y medidas relacionadas con el entorno laboral, el trabajo en equipo, la comunicación y las recompensas.

En primer lugar, para garantizar unas mejores condiciones de trabajo en el hangar, se plantea la mejora de la iluminación en el mismo y el acondicionamiento de la temperatura mediante la reparación de los aires acondicionados y calefacción, que desde años no funcionan adecuadamente. Seguidamente, para fomentar el trabajo en equipo se propone establecer metas colectivas y reuniones periódicas que permitirán compartir los problemas, experiencias y conocimientos, así como mejorar la comunicación entre los trabajadores y la dirección. Además se propone la creación de un buzón de sugerencias que potencie la participación dinámica de los trabajadores en las posibles mejoras a incorporar. Dichas sugerencias y aspectos a mejorar propuestos serán estudiados por los responsables y se hará público su contenido y acción tomada al respecto, valorando así la participación de los empleados de la empresa.

Por otro lado, se plantea la implantación de una política de notificación de errores cometidos al realizar el trabajo que no sea punitiva y que fomente la comunicación de los mismos de forma temprana y que impida que aguas arriba se generen problemas de graves consecuencias (implantación de una política SMS¹⁷). De esta manera, el operario se sentirá más cómodo en su puesto de trabajo y el temor a notificar los errores involuntarios desaparecerá mejorando el ambiente de trabajo y por supuesto, la seguridad. Finalmente, se sugiere la creación de un plan de incentivos tanto económicos como un reconocimiento moral y/o días u horas libres en función de los objetivos cumplidos.

6. Compra de herramientas y equipos de apoyo.

Con el fin último de proporcionar a los mecánicos las herramientas y equipos necesarios se propone la compra de los más demandados a lo largo del proceso. De esta manera, los mecánicos dispondrían en todo momento de las herramientas necesarias, agilizando el proceso.

7. Leasing de herramientas y equipos de apoyo.

Otra de las opciones a barajar relacionada con la falta de herramientas en el hangar es el alquiler de las mismas. De manera puntual, se podrían alquilar aquellas herramientas o equipos que fuesen necesarios con la opción de compra una vez finalizado el contrato.

8. Elaboración de un plan de mantenimiento y calibración.

Finalmente, para evitar el aumento de la duración de las revisiones por la imposibilidad de utilizar equipos que se encuentren en mantenimiento o fuera de calibración se propone elaborar un plan de mantenimiento y calibración. Se trata de programar la calibración y el mantenimiento de los distintos equipos de forma escalonada para poder disponer de la mayoría de ellos durante las revisiones. Para ello, será fundamental ver que equipos hacen falta en cada revisión conjuntamente con la fase de planificación de la revisión.

4.4.2 Análisis de costes

El análisis de costes de cada una de las propuestas nos permitirá identificar qué inversión será necesaria realizar para llevar a cabo cada una de ellas. Para la puesta en marcha de las mejoras será necesario incurrir en una serie de gastos. Además de los gastos específicos de cada propuesta, hay que tener en cuenta los costes indirectos del proceso. Estos costes son aquellos que están relacionados con el proceso de mantenimiento de aeronaves en general y que, por lo tanto, no se pueden asignar a una propuesta en concreto. A continuación, se detallan estos costes indirectos.

- Luz: Considerando el volumen de trabajo y las dimensiones del hangar se estima que el gasto de luz asciende a un total de 4.273,85 euros mensuales.
- Agua: Teniendo en cuenta el volumen de trabajo, el importe mensual asociado a este gasto es de 1.700,00 euros aproximadamente.
- Teléfono e Internet: Los gastos de la empresa relacionados con el uso de internet y del teléfono ascienden a 350,00 euros mensuales.

¹⁷ Safety Management System o Sistema de gestión de la seguridad.

- Consumibles de oficina: Los gastos relacionados con la compra y mantenimiento de los materiales de uso común en el proceso, ya sean para las oficinas o para el suman un total de 6.856,00 euros anuales.
- Instalaciones: La necesidad de mantener el hangar y las oficinas en buenas condiciones para su uso genera un gasto de 3.428,00 euros mensuales.
- Seguros: Que una empresa del sector aeroespacial tenga contratado el correcto programa de seguros es esencial. En de caso de accidente, el hecho de no disponer de un programa de seguros adecuado puede llegar a dejar a una empresa fuera del sector. Es por ello, que el coste de las primas relacionadas con los seguros suma fácilmente la cantidad de 100.000,00 euros anuales.
- Salarios del personal: Se trata de reflejar cuanto ha de pagar la empresa por los empleados. Teniendo en cuenta el convenio del metal por el que se rige la empresa se ha establecido el sueldo bruto mensual de cada uno de los trabajadores. Además, como apreciamos en la Tabla 4, para conocer el coste anual del personal se ha contemplado el pago de 14 pagas (12 pagas y 2 pagas extras) y se ha considerado el gasto que supone la Seguridad Social para el empresario (36,4% del salario).

Puesto de trabajo	Nº de empleados	Sueldo bruto mensual (€/persona)	Seguridad social mensual (€/persona)	Coste mensual (€/persona)	Coste anual total (€)
Director	1	3.500,50	1.274,18	4.774,68	66.845,52
Ingeniero	6	1.652,60	601,55	2.254,15	189.384,60
Mecánico	20	1.235,21	449,62	1.684,83	471.752,40
Administrativo	1	1.293,95	471,00	1.764,95	24.709,30
Auxiliar Administrativo	2	1.174,55	427,54	1.602,09	44.858,52

Tabla 4 Costes salariales. Fuente: [Elaboración propia]

Una vez detallados cada uno de estos costes, vemos en la Tabla 5 que el importe total anual relativo a los costes indirectos del proceso de mantenimiento programado estudiado es de 1.021.428,54 euros.

Coste indirecto	Total anual (€)
Luz	51.286,20
Agua	20.400,00
Teléfono e Internet	4.200,00
Consumibles	6.856,00
Instalaciones	41.136,00
Seguros	100.000,00
Salario del personal	797.550,34
TOTAL	1.021.428,54

Tabla 5 Costes indirectos. Fuente: [Elaboración propia]

Una vez detallados los costes de tipo indirecto, se desglosarán cada uno de los gastos específicos en los que se incurriría si se realizasen cada una de las propuestas.

En primer lugar, para impulsar la actualización del plan de compras mediante un monitoreo constante del inventario (mejora 1) se requiere un trabajo extra por parte de los ingenieros de la empresa. La gestión y control del inventario de forma continuada requiere más horas de trabajo. Suponiendo que el coste de las horas extras de ingeniería para la empresa es de 50,00 euros/hora, que son tres los ingenieros encargados de dicha tarea y que, cada uno de ellos le dedica como máximo 60 horas anuales, los costes salariales aumentarán en 9.000,00 euros al año. Es decir, el coste salarial total sería de 806.550,34 euros al año.

Puesto que se estima que el cargo de trabajo a la hora de elaborar un plan de mantenimiento y calibración (mejora 8) sería el mismo que en el caso anterior, los costes salariales en este caso también se verían incrementados en 9.000,00 euros anuales.

Del mismo modo, para poder elaborar un historial de compras con el que valorar la calidad de los proveedores (mejora 2) será necesario un trabajo extra por parte de uno de los ingenieros. Suponiendo que dicho ingeniero realiza como máximo 60 horas extras al año y que el coste para el empresario es de 50,00 euros/hora, el coste salarial incrementará en 3.000,00 euros al año.

Por otro lado, la instauración del programa de capacitación (mejora 3) consiste principalmente en la creación de un nuevo puesto de trabajo, el de líder de equipo. Dado que este puesto conlleva una mayor responsabilidad, aquellos mecánicos expertos que se conviertan en líderes de equipo tendrán un sueldo superior. Como se desglosa en la Tabla 6, con el nuevo puesto los costes salariales ascienden a 802.525,03 euros anuales, lo que implica un incremento de 4.974,69 euros al introducir esta nueva medida.

Puesto de trabajo	Nº de empleados	Sueldo bruto mensual (€/persona)	Seguridad social mensual (€/persona)	Coste mensual (€/persona)	Coste anual total (€)
Director	1	3.500,50	1.274,18	4.774,68	66.845,52
Ingeniero	6	1.652,60	601,55	2.254,15	189.384,60
Líder de equipo	4	1.300,34	473,32	1.773,66	99.325,17
Mecánico	16	1.235,21	449,62	1.684,83	377.401,92
Administrativo	1	1.293,95	471,00	1.764,95	24.709,30
Auxiliar Administrativo	2	1.174,55	427,54	1.602,09	44.858,52
TOTAL					802.525,03

Tabla 6 Costes salariales programa de capacitación. Fuente: [Elaboración propia]

Recurriendo a diferentes cursos ofrecidos en la empresa, se estima que el coste asociado a un curso para 15 trabajadores impartido por un profesional es de 4.175,00 euros aproximadamente. Considerando que el plan de formación interna (mejora 4) cuenta con cinco cursos a lo largo del año, los gastos anuales debidos a la formación de los empleados sumarán un total de 20.875,00 euros.

Por otra parte, el plan de motivación propuesto (mejora 5) incluye, entre otros aspectos, una reforma de las zonas de trabajo. La reparación y mejora de la instalación de aire acondicionado y calefacción y la mejora de la iluminación en el hangar y su mantenimiento supondría un gasto de 50.000,00 euros aproximadamente. A esto, hay que añadirle la cantidad destinada a los incentivos y a las horas de trabajo destinadas a la elaboración del plan. Es decir, fácilmente, el gasto relacionado con la quinta mejora rondaría los 60.000,00 euros.

Con el fin de tasar de forma aproximada los gastos relacionados con la compra de aquellas herramientas y equipos de apoyo más demandados (mejora 6), se ha recurrido al catálogo de la empresa *RS Components* (Anexo D). Así, dado que el transporte de dichos recursos es gratuito y que el coste relacionado con el mantenimiento de los mismos es de 1.000,00 euros, el coste total de esta mejora es de 14.356,19 euros. En cambio, estimando que el leasing de dichos recursos (mejora 7) nos permitiese reducir en un 20% los costes asociados a la compra de los mismos, el coste total originado por la mejora siete sería de 11.484,95€.

Finalmente, en la Tabla 7 quedan resumidos los costes asociados a cada una de las mejoras propuestas en el caso en el que fuesen implantadas en la empresa.

Mejora	Descripción	Coste específico (€)	Coste indirecto (€)	Coste total (€)
1	Actualización plan de compras	9.000,00	1.021.428,54	1.030.428,54
2	Valoración proveedores	3.000,00	1.021.428,54	1.024.428,54
3	Programa de capacitación	4.974,69	1.021.428,54	1.026.403,23
4	Plan de formación interna	20.875,00	1.021.428,54	1.042.302,54
5	Plan de motivación	60.000,00	1.021.428,54	1.081.428,54
6	Compra de herramientas y equipos	14.356,19	1.021.428,54	1.035.784,73
7	Leasing de herramientas y equipos	11.484,95	1.021.428,54	1.032.913,49
8	Plan mantenimiento y calibración	9.000,00	1.021.428,54	1.030.428,54

Tabla 7 Análisis de costes de las mejoras. Fuente: [Elaboración propia]

4.4.3 Elección de mejoras

Una vez definidas y analizadas desde un punto de vista económico, hay que priorizar las mejoras y decidir cuales se va a implantar. La matriz de impacto y esfuerzo es una herramienta que resume visualmente las ventajas y desventajas de las posibles soluciones para el problema estudiado. Permite establecer prioridades entre las soluciones a elegir teniendo en cuenta el nivel de dificultad para implementar dicha solución y el impacto que generaría esa elección.

Un proyecto o idea de alto impacto será aquella que genera la expectativa de una reducción de la duración de las revisiones en veinte días o más. Las ideas que requieran de una inversión superior a 10.000 euros serán consideradas de alto esfuerzo. Así, las mejoras que se llevarán a cabo para solventar el problema estudiado serán las que generen un alto impacto en la empresa pero no necesiten un esfuerzo demasiado alto.

Los resultados de la valoración del impacto generado de las mejoras propuestas vienen recogidos en la Tabla 8. Atendiendo a las causas que se verían solventadas tras la implantación de cada mejora, podemos calcular el tiempo en el que se verían reducidas las duraciones de las revisiones. De este modo, las mejoras que generarían un gran impacto, es decir, las que permitirían reducir la duración de las revisiones en veinte días o más serían:

- Actualización del plan de compras mediante un monitoreo constante del inventario.
- Valoración de los proveedores mediante la elaboración de un historial de compras.
- Implantación de un programa de capacitación.
- Elaboración de un plan de formación interna.

Mejora	Descripción	Causas solventadas	Tiempo reducido (días)
1	Actualización plan de compras	Elementos no disponibles	30
2	Valoración proveedores	Elementos no disponibles	30
3	Programa de capacitación	Falta de formación y experiencia Carencia de perfiles profesionales	25
4	Plan de formación interna	Falta de formación y experiencia Carencia de perfiles profesionales	25
5	Plan de motivación	Personal desmotivado Espacios poco iluminados Nulo control de la temperatura	13
6	Compra de herramientas y equipos	Herramientas insuficientes	10
7	Leasing de herramientas y equipos	Herramientas insuficientes	10
8	Plan mantenimiento y calibración	Equipos de apoyo en mantenimiento Equipos de apoyo y herramientas fuera de calibración	11

Tabla 8 Evaluación del impacto de las mejoras propuestas. Fuente: [Elaboración propia]

Por otro lado, tras el análisis de costes es conocido que algunas de las iniciativas para reducir la duración de las revisiones exigen un gran desembolso de dinero, muy superior a los 10.000 euros. Con todo ello, las mejoras que necesitarían de un gran esfuerzo a la hora de poder ser implementadas son:

- Elaboración de un plan de formación interna.
- Elaboración de un plan de motivación.
- Compra de herramientas y equipos de apoyo.
- Leasing de herramientas y equipos de apoyo.

Los resultados del análisis de las mejoras se representan de forma gráfica en la matriz de la Figura 4-13.

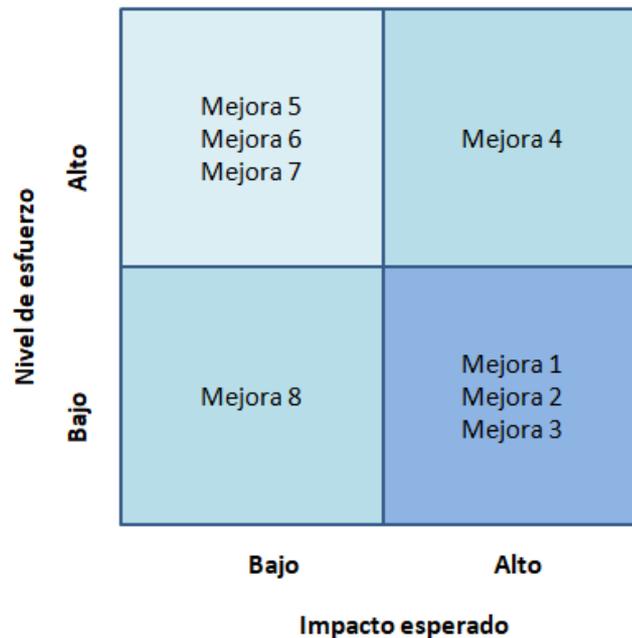


Figura 4-13 Matriz Impacto vs Esfuerzo. Fuente: [Elaboración propia]

Dado que las propuestas más apropiadas son aquellas cuyo impacto es alto pero su esfuerzo es bajo, se implantarán las siguientes mejoras:

- Actualización del plan de compras mediante un monitoreo constante del inventario.
- Valoración de los proveedores mediante la elaboración de un historial de compras.
- Implantación de un programa de capacitación.

Por otro lado, aunque la elaboración de un plan de motivación (mejora 5) ha sido considerada de alto esfuerzo y bajo impacto, debe ser implementada. Los trabajadores son el recurso más importante de la empresa. Reconocer la labor de los empleados y hacerles partícipes del proceso de mejora es esencial para implementar cambios y obtener buenos resultados.

En cuanto a la elaboración de un plan de mantenimiento y calibración (mejora 8), se estima que el impacto generado en la duración de las revisiones será bajo por lo que su implantación no es esencial. Sin embargo, aunque la mejora 4 (elaboración de un plan de formación interna) ha sido categorizada de alto impacto y esfuerzo, ésta no habría porqué implementarla. La opción de implantar la propuesta número 3 (implantación de un programa de capacitación) genera los mismos resultados y requiere un menor esfuerzo.

Finalmente, las mejoras más adecuadas para implantar en la empresa y reducir así la duración de las revisiones de mantenimiento programado son:

- Actualización del plan de compras mediante un monitoreo constante del inventario.
- Valoración de los proveedores mediante la elaboración de un historial de compras.
- Implantación de un programa de capacitación.
- Elaboración de un plan de motivación.

La actualización del plan de compras reduciría el tiempo de las revisiones en treinta días, la valoración de los proveedores a través del historial de compras evitaría un retraso de otros treinta días, y la puesta en marcha del programa de capacitación y del plan de motivación impedirían un retraso de treinta y ocho días. Teniendo en cuenta lo expresado anteriormente, mediante la implementación de estas cuatro mejoras, se podría reducir la duración de las revisiones de mantenimiento programado un máximo de 98 días.

4.5 Controlar

Tras la elección de las mejoras a implantar, hay que asegurarse de que dichas propuestas de mejora se cumplen. Para ello se ha elaborado un plan de control del proceso de mantenimiento programado de aeronaves.

El objetivo principal de este plan es determinar y especificar las acciones que se deben tomar en caso de que se observen variaciones en cuanto a la duración de la ejecución de las revisiones de mantenimiento programado.

Como queda reflejado en la Tabla 9, el control de las revisiones consistirá en ir anotando en una hoja de registro u hoja de control (Anexo D) la duración de cada una de ellas, distinguiendo entre la duración total y la duración de cada una de las fases en las que se divide el proceso. También se anotarán cualquier tipo de disconformidades o alteraciones que den lugar a un incremento de la duración de las revisiones.

En caso de que se produzca una variación en la duración de alguna de las etapas o fases que conforman las revisiones, las instrucciones y medidas a tomar serán las indicadas por el comité de repuesta. Este comité estará formado por los ingenieros y los mecánicos expertos de la empresa. Las labores principales de este comité serán analizar las variaciones, proponer las soluciones adecuadas para evitar que los problemas originados en una etapa afecten a las etapas posteriores y cerciorarse de que las mejoras implantadas se cumplen.

Parte del proceso	Duración estimada (meses)	Frecuencia de control	Método de control	Instrucciones en caso de variación
Planificación	0,5	Cada revisión	Hoja de registro	Consultar comité de respuesta
Pruebas iniciales	0,5	Cada revisión	Hoja de registro	Consultar comité de repuesta
Inspección	1	Cada revisión	Hoja de registro	Consultar comité de repuesta
Reparación	1	Cada revisión	Hoja de registro	Consultar comité de repuesta
Pruebas finales	1	Cada revisión	Hoja de registro	Consultar comité de repuesta

Tabla 9 Plan de control. Fuente: [Elaboración propia]

5 CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo de fin de grado era implementar la metodología Lean Seis Sigma en un proceso de mantenimiento programado de aeronaves con el fin de proponer una serie de mejoras que permitiesen reducir la duración de las revisiones, dando lugar a una mayor satisfacción de los clientes y a un aumento de los ingresos.

En un primer momento, la metodología DMAIC permitió estudiar y comprender el estado inicial del área de mejora así como identificar y analizar las causas potenciales de la excesiva duración de las revisiones.

Como viene recogido a lo largo de este documento, se analizaron los datos relativos a las últimas trece revisiones de mantenimiento programado realizadas por la empresa llegando a la conclusión de que las causas principales de la excesiva duración de las revisiones y por lo tanto, del descontento de los clientes, estaban relacionadas tanto con la falta de recursos, ya fuesen materiales o humanos, como con la falta de motivación de los trabajadores.

Para mitigar dichas causas se propusieron ocho mejoras, de las cuales cuatro de ellas fueron las seleccionadas para ser implementadas atendiendo al esfuerzo económico que supondrían y al impacto que generarían en la empresa. Las propuestas elegidas, con las que se conseguiría una reducción de la duración de las revisiones de 98 días fueron las siguientes:

- Actualización del plan de compras mediante un monitoreo constante del inventario.
- Valoración de los proveedores mediante la elaboración de un historial de compras.
- Implantación de un programa de capacitación.
- Elaboración de un plan de motivación.

Como se puede observar, la implantación de la metodología LSS tendría efectos positivos en la empresa. La duración de las revisiones de mantenimiento programado se ajustaría a lo establecido por el cliente. Es decir, con la ayuda de estas propuestas sería posible realizar las revisiones programadas en un máximo de cinco meses. Así, además de aumentar los ingresos, al poder realizar más revisiones en el mismo periodo de tiempo estaríamos aumentado la satisfacción del cliente y con ello, la posición de la empresa frente a la competencia.

6 ANEXO

6.1 Anexo A: Tabla de conversión Nivel Sigma

Abridged Process Sigma Conversion Table

<i>Long-Term Yield</i>	<i>Process Sigma</i>	<i>Defects Per 1,000,000</i>	<i>Defects Per 100,000</i>	<i>Defects Per 10,000</i>	<i>Defects Per 1,000</i>	<i>Defects Per 100</i>
99.99966%	6.0	3.4	0.34	0.034	0.0034	0.00034
99.9995%	5.9	5	0.5	0.05	0.005	0.0005
99.9992%	5.8	8	0.8	0.08	0.008	0.0008
99.9990%	5.7	10	1	0.1	0.01	0.001
99.9980%	5.6	20	2	0.2	0.02	0.002
99.9970%	5.5	30	3	0.3	0.03	0.003
99.9960%	5.4	40	4	0.4	0.04	0.004
99.9930%	5.3	70	7	0.7	0.07	0.007
99.9900%	5.2	100	10	1.0	0.1	0.01
99.9850%	5.1	150	15	1.5	0.15	0.015
99.9770%	5.0	230	23	2.3	0.23	0.023
99.9670%	4.9	330	33	3.3	0.33	0.033
99.9520%	4.8	480	48	4.8	0.48	0.048
99.9302%	4.7	680	68	6.8	0.68	0.068
99.9040%	4.6	960	96	9.6	0.96	0.096
99.8650%	4.5	1,350	135	13.5	1.35	0.135
99.8140%	4.4	1,860	186	18.6	1.86	0.186
99.7450%	4.3	2,550	255	25.5	2.55	0.255
99.6540%	4.2	3,460	346	34.6	3.46	0.346
99.5340%	4.1	4,660	466	46.6	4.66	0.466
99.3790%	4.0	6,210	621	62.1	6.21	0.621
99.1810%	3.9	8,190	819	81.9	8.19	0.819
98.930%	3.8	10,700	1,070	107	10.7	1.07
98.610%	3.7	13,900	1,390	139	13.9	1.39
98.220%	3.6	17,800	1,780	178	17.8	1.78
97.730%	3.5	22,700	2,270	227	22.7	2.27
97.130%	3.4	28,700	2,870	287	28.7	2.87
96.410%	3.3	35,900	3,590	359	35.9	3.59
95.540%	3.2	44,600	4,460	446	44.6	4.46
94.520%	3.1	54,800	5,480	548	54.8	5.48
93.320%	3.0	66,800	6,680	668	66.8	6.68
91.920%	2.9	80,800	8,080	808	80.8	8.08
90.320%	2.8	96,800	9,680	968	96.8	9.68
88.50%	2.7	115,000	11,500	1,150	115	11.5
86.50%	2.6	135,000	13,500	1,350	135	13.5
84.20%	2.5	158,000	15,800	1,580	158	15.8
81.60%	2.4	184,000	18,400	1,840	184	18.4
78.80%	2.3	212,000	21,200	2,120	212	21.2
75.80%	2.2	242,000	24,200	2,420	242	24.2
72.60%	2.1	274,000	27,400	2,740	274	27.4
69.20%	2.0	308,000	30,800	3,080	308	30.8
65.60%	1.9	344,000	34,400	3,440	344	34.4
61.80%	1.8	382,000	38,200	3,820	382	38.2
58.00%	1.7	420,000	42,000	4,200	420	42
54.00%	1.6	460,000	46,000	4,600	460	46
50%	1.5	500,000	50,000	5,000	500	50
46%	1.4	540,000	54,000	5,400	540	54
43%	1.3	570,000	57,000	5,700	570	57
39%	1.2	610,000	61,000	6,100	610	61
35%	1.1	650,000	65,000	6,500	650	65
31%	1.0	690,000	69,000	6,900	690	69
28%	0.9	720,000	72,000	7,200	720	72
25%	0.8	750,000	75,000	7,500	750	75
22%	0.7	780,000	78,000	7,800	780	78
19%	0.6	810,000	81,000	8,100	810	81
16%	0.5	840,000	84,000	8,400	840	84
14%	0.4	860,000	86,000	8,600	860	86
12%	0.3	880,000	88,000	8,800	880	88
10%	0.2	900,000	90,000	9,000	900	90
8%	0.1	920,000	92,000	9,200	920	92

6.2 Anexo B: Historial de compras

Fecha	
Revision	
Hoja	__ de __

HISTORIAL DE COMPRAS			
Número de pedido		Prioridad	
Fecha del pedido		Fecha de llegada	
Recursos a adquirir			
Cantidad			
Precio			
Responsable de compra			

VALORACIÓN DEL PROVEEDOR			
PROVEEDOR			
REQUISITOS	VALORACIÓN		
Cumplimiento fecha de entrega	Si	No	
Cumplimiento estándares de calidad	Si	No	
Capacidad de adaptación a la empresa	Si	No	
Capacidad de producción	Alta	Media	Baja
Forma de pago			
Garantía	Si	No	
Comunicación	Buena	Mala	
Localización geográfica			
Puntuación total	__ / 60		

Los requisitos valorados como “Si”, “Alta” o “Buena” obtendrán una puntuación de 10 para el cómputo final mientras que las valoradas como “No” o “Mala”, cero. La opción “Media” será valorada con 5 puntos, siendo la máxima puntuación 60.

6.4 Anexo D: Herramientas y equipos de apoyo



Su cesta de la compra en rsonline.es

Este pedido aún no se ha realizado pero se ha guardado automáticamente para su siguiente visita a rsonline.es

Descripción	Cantidad	Precio unitario	Coste
 <p>Kit de herramientas Facom CM.130A, Mecánica, contiene Destornillador, vasos, llave, 148 piezas 7227202 Facom CM.130A Estado RoHS - No aplicable</p>	5 ✓ 5 Disponible para entrega en 2 día(s) laborable(s).	1.733,60 € Unidad	8.668,00 €
 <p>Escalera de tijera RS PRO, 5 peldaños, 1677mm, , escalón, Aluminio, peso: 5kg 1874995 RS PRO ALT-5021D5 Estado RoHS - No aplicable</p>	1 ✓ 1 Disponible para entrega en 2 día(s) laborable(s).	182,00 € Unidad	182,00 €
 <p>Plataforma de trabajo Zarges 40267 Aluminio, carga 150kg 8179911 Zarges 40267 Estado RoHS - No aplicable</p>	1 ✓ 1 Disponible para entrega en 2 día(s) laborable(s).	139,18 € Unidad	139,18 €
 <p>Carro de servicio RS PRO de Aluminio con 3 niveles, dim. de plataforma 630 x 424mm, carga 150kg 6693759 RS PRO KT-707F Estado RoHS - No aplicable</p>	1 ✓ 1 Disponible para entrega en 2 día(s) laborable(s).	212,16 € Unidad	212,16 €
 <p>Eslinga de elevación RS PRO, 9t 0674207 RS PRO TCAY100A002 Estado RoHS - No aplicable</p>	1 ✓ 1 Disponible para entrega en 2 día(s) laborable(s).	514,18 € Unidad	514,18 €
 <p>Multímetro digital de mano, 1000V ac, 10A ac, TRMS, CAT III, CAT IV 3944470 Fluke FLUKE 175 Estado RoHS - No aplicable</p>	2 ✓ 2 Disponible para entrega en 24/48 horas	253,00 € Unidad	506,00 €

91 512 96 99

@ es.rs-online.com

91 512 96 99

Página 1 de 2

 <p>Correa de recuperación anticaídas Petzl, Delantero, trasero, Estirable, No, No 1225284 Petzl C73JFA 1 Estado RoHS - No aplicable</p>	5 ✓ 5 Disponible para entrega en 24/48 horas	163,33 € Unidad	816,65 €
--	---	--------------------	-----------------

Forma de envío

Forma de envío: Entrega a domicilio (Cuenta crédito o Tarjeta crédito/débito). Consulte condiciones en la página de ayuda, apartado de Pago.

Total productos	11.038,17 €
Entrega	Gratuito
IVA	2.318,02 €
Total del pedido	13.356,19 €

Teniendo en cuenta que el coste de transporte es gratuito, el coste total asociado a la compra de las herramientas y equipos de apoyo más demandados es de 13.356,19€.

7 REFERENCIAS

- Go Lean Six Sigma. (12 de Febrero de 2012). *The Basics of Lean Six Sigma*. Recuperado el 17 de Mayo de 2020, de <https://goleansixsigma.com/?s=the+basics+of+lean+six+sigma>
- RS Components Ltd. (s.f.). *RS Components*. Recuperado el 2 de Junio de 2020, de <https://es.rs-online.com/web/>
- Ayeni, P., Baines, T., Liightfoot, H., & Ball, P. (2011). State-of-the-art of 'Lean' in the aviation maintenance, repair, and overhaul industry. *Journal of Engineering Manufacture*, 225(11), 2108-2123.
- Broccoletti, M. (2013). *Lean Six Sigma Yellow Belt Training*.
- Carreras, M. R. (2010). *Lean Manufactruing, la evidencia de una necesidad*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos.
- Cudney, E. A., & Kestle, R. (2010). *Implementing Lean Six Sigma Throughout the Supply Chain*. Boca Raton: Productivity Press.
- EAE Business School. (8 de Septiembre de 2014). *Incentivos laborales: cómo aumentar la motivación de tus empleados*. Recuperado el 19 de Mayo de 2020, de <https://retos-directivos.eae.es/aumenta-la-mptivacin-de-tus-empleados-con-un-buen-plan-de-incentivos-laborales/>
- Encyclopedia Britannica. (16 de Diciembre de 2019). *W. Edwards Deming*. Recuperado el 17 de Marzo de 2020, de <https://www.britannica.com/biography/W-Edwards-Deming>
- Enríquez, R. M. (18 de Julio de 2013). *frederick-winslow-taylor-y-sus-aportes-a-la-administracion*. Recuperado el 17 de Marzo de 2020, de <https://www.gestiopolis.com/frederick-winslow-taylor-y-sus-aportes-a-la-administracion/>
- fxtrader. (6 de Diciembre de 2010). *Six Sigma: La alta calidad puede disminuir los costos y aumentar la satisfacción del cliente*. Recuperado el 23 de Marzo de 2020, de <https://www.emprendices.co/six-sigma-la-alta-calidad-puede-disminuir-los-costos-y-aumentar-la-satisfaccion-del-cliente/>
- García, J. M. (4 de Febrero de 2016). *Walter Shewhart*. Recuperado el 17 de Marzo de 2020, de [ttps://wshewhart.blogspot.com/2016/02/walter-shewhart-walter-andrew-shewhart.html](https://wshewhart.blogspot.com/2016/02/walter-shewhart-walter-andrew-shewhart.html)
- García, M. (3 de Octubre de 2019). *Herramientas del Lean Six Sigma: la metodología para la excelencia operacional*. Recuperado el 4 de Marzo de 2020, de <https://www.apd.es/herramientas-del-lean-six-sigma/>
- García, M. P., Quispe, C. A., & Ráez, L. G. (2003). Mejora continua de la calidad en los procesos. *Industrial Data*, 6(1), 89-94.
- Gisbert Soler, V., Pérez Molina, A. I., Pérez Bernabéu, E., Calabuig Valor, M., Pons Vidal, B., Campoy Brotons, F. Á., . . . Rojas Lema, S. (2018). *Cuadernos de investigación aplicada*. Alicante: Área de Innovación y Desarrollo.
- Giugni, P. (6 de Febrero de 2009). *JOSEPH M. JURAN*. Recuperado el 17 de Marzo de 2020, de <https://www.pablogiugni.com.ar/joseph-m-juran/>
- Grokhovskaya, V. (23 de Febrero de 2018). *5 MRO Supply Chain Challenges Aviation Companies Need To Prepare For*. Recuperado el 18 de Mayo de 2020, de <https://supplychainbeyond.com/5-mro-supply-chain-challenges-in-aviation/>

- Henderson, G. R. (2011). *Six Sigma Quality Improvement with Minitab*. Chichester: John Wiley & Sons, Incorporated.
- Hernández Matías, J. C., & Vizán Idoipe, A. (2013). *Lean Manufacturing conceptos, técnicas e implantación*. Madrid, Madrid, España.
- Hill, J., Thomas, A. J., Mason, R. K., & El-Kateb, S. (2018). The implementation of a Lean Six Sigma framework to enhance operational performance in an MRO facility. *Production & Manufacturing research*, 6(1), 26-48.
- Historia y Biografía. (4 de Marzo de 2017). *Henry Ford*. Recuperado el 17 de Marzo de 2020, de <https://historia-biografia.com/henry-ford/>
- Indra. (2019). *Informes mantenimiento de aeronaves*.
- Indra Prensa. (27 de Febrero de 2020). *Indra aceleró su crecimiento en 2019: la cartera creció un 11%, alcanzando un récord histórico, y la rentabilidad volvió a mejorar, con un aumento del EBIT del 11%*. Recuperado el 15 de Marzo de 2020, de [indracompany: https://www.indracompany.com/es/noticia/indra-acelero-crecimiento-2019-cartera-crecio-11-alcanzando-record-historico-rentabilidad](https://www.indracompany.com/es/noticia/indra-acelero-crecimiento-2019-cartera-crecio-11-alcanzando-record-historico-rentabilidad)
- Jiménez, F. J. (3 de Junio de 2019). *Industrias Siderometalúrgicas de Sevilla Convenio Colectivo del Sector Industrias Siderometalúrgicas de la provincia de Sevilla, 2018 – 2020*. Recuperado el 1 de Junio de 2020, de <https://www.convenioscolectivos.net/industrias-siderometalurgicas-de-la-provincia-de-sevilla/>
- Jong, S. d. (2016). Measuring lean implementation for maintenance services companies. *International Journal of Lean Six Sigma*.
- Jong, S. d., & Beelaerts van Blokland, W. W. (2016). Measuring lean implementation for maintenance service companies MRO Aviation Industry. *International Journal of Lean SixSigma*, 7(1), 35-61.
- López, B. S. (22 de 10 de 2019). *Nivel sigma y DPMO*. Recuperado el 9 de Abril de 2020, de Ingeniería industrial online: <https://www.ingenieriaindustrialonline.com/gestion-de-calidad/nivel-sigma-y-dpmo/>
- Magaz, J. (2015). Clase abierta: Lean Six Sigma de mejora de procesos. EOI Escuela de Organización.
- Pande, P. S., Neuman, R. P., & Cavanagh, R. R. (2002). *Las claves de Seis Sigma*. Madrid: McGRAW-HILL.
- Perez Wilson, M. (1999). *Six Sigma*. Arizona: Advanced Systems Consultants.
- Peterson, W. (2014). *Lean APPLIED TO MRO Business Process*. Tennessee: The Univeristy of Tennessee.
- Redacción APD. (27 de Agosto de 2019). *Lean Six Siga ¿Cómo funciona esta metodología para reducir fallos?* Recuperado el 17 de Marzo de 2020, de <https://www.apd.es/lean-six-sigma-como-funciona/>
- RM, J. A. (21 de Mayo de 2008). *Six Sigma: La Empresa hacia El Error Cero*. Recuperado el 3 de Mayo de 2020, de [mia.republica.com: mia.republica.com/planificacion/six-sigma-la-empresa-hacia-el-error-cero.html](http://mia.republica.com/mia.republica.com/planificacion/six-sigma-la-empresa-hacia-el-error-cero.html)
- Rother, M., & Shook, J. (2003). *Learning to see: value-stream mapping to create and elimnate muda*. Lean Enterprise Institute.
- Rowlands, G. M., Maxey, J., Price, M., Watson-Hemphill, K., Jaimet, P., David, R., & Cox, C. (2005). *The Lean Six Sigma Pocket Toolbook*. New York: McGraw-Hill.
- Sánchez, D. P. (18 de Marzo de 2013). *Gastos generales y Costes indirectos* . Recuperado el 1 de Junio de 2020, de <https://www.eoi.es/blogs/embaon-alumnos/2013/03/18/gastos-generales-y-costes-indirectos/>
- Sánchez, J. V. (2010). *Gestión de la calidad : mejora continua y sistemas de gestión : teoría y práctica* . Madrid: Pirámide.
- Schonberger, R. J. (2007). *Best Practices in Lean Six Sigma Process Improvement : A Deeper Look*. Hoboken: John Wiley & Sons.

- Six Sigma Institute. (s.f.). *What is Six Sigma?* Recuperado el 3 de Mayo de 2020, de Six Sigma Institute : https://www.sixsigma-institute.org/What_Is_Six_Sigma.php
- SixSigma. (18 de Noviembre de 2019). *Kaizen Is a Core Six Sigma Philosophy*. Recuperado el 4 de Marzo de 2020, de <https://www.6sigma.us/kaizen/kaizen-is-a-core-six-sigma-philosophy/>
- SixSigma. (12 de Mayo de 2020). *So Which Is It — DMAIC or DMADV?* Recuperado el 17 de Mayo de 2020, de <https://www.6sigma.us/lean-six-sigma-articles/so-which-is-it-dmaic-or-dmadv/>
- SixSigma. (17 de Febrero de 2020). *Why Root Cause Analysis Is so Important*. Recuperado el 26 de Abril de 2020, de <https://www.6sigma.us/six-sigma-in-focus/why-root-cause-analysis-is-so-important/>
- skylinkintl. (18 de Abril de 2013). *why six sigma is essential to reducing your aircraft maintenance cost*. Recuperado el 20 de marzo de 2020, de <https://www.skylinkintl.com/blog/why-six-sigma-is-essential-to-reducing-your-aircraft-maintenance-cost/>
- Socconini, L. (3 de Mayo de 2020). *eansixsigmainstitute.org*. Recuperado el 8 de Mayo de 2020, de <https://leansixsigmainstitute.org/what-is-lss/>
- Socconini, L. (4 de Mayo de 2020). *leansixsigmainstitute.org*. Recuperado el 8 de Mayo de 2020, de <https://leansixsigmainstitute.org/lean-six-sigma-management-system/>
- Soporte de Minitab 18*. (s.f.). Recuperado el 17 de Mayo de 2020, de <https://support.minitab.com>
- Tennant, G. (2002). *Design for Six Sigma*. Aldershot: Gower Publishing Limited.
- Tonkin, L. A. (2007). The Real Power of LeanMilitary TransformationAligning today's lean initiatives for long-term, collaborativeimprovements. *Target*, 23(3), 6-19.
- Touron, J. (26 de Septiembre de 2016). *Lean Manufacturing: definición, origen y evolución*. Recuperado el 17 de Marzo de 2020, de <https://www.sistemasoe.com/lean-manufacturing/>
- (2018). *UNE-EN 13306 Terminología del mantenimiento*. Madrid: Asociación Española de Normalización.
- Villanova University. (17 de Enero de 2020). *How Six Sigma Can Affect Aviation Industry*. Recuperado el 5 de Marzo de 2020, de <https://www.villanovau.com/resources/six-sigma/how-six-sigma-can-affect-aviation-industry/>