

Trabajo Fin de Máster

Máster en Organización Industrial y Gestión de Empresas

Análisis centrado en fiabilidad de máquina
etiquetadora de envasado en industria de
manufacturas

Autor: José Pérez Torreglosa

Tutor: Juan Francisco Gómez Fernández

Dep. Teoría de la Señal y Comunicaciones
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018



Proyecto Fin de Máster
Máster en Organización Industrial y Gestión de Empresas

Análisis centrado en fiabilidad de máquina etiquetadora de envasado en industria de manufacturas

Autor:

José Pérez Torreglosa

Tutor:

Juan Francisco Gómez Fernández

Profesor Asociado Interino Asimilado

Co-Tutor:

Gonzalo Cerruela García

Dep. de Organización Industrial y Gestión de Empresas

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018

Proyecto Fin de Máster: Análisis centrado en fiabilidad de máquina etiquetadora de envasado en industria de manufacturas

Autor: José Pérez Torreglosa

Tutor: Juan Francisco Gómez Fernández

Co-Tutor: Gonzalo Cerruela García

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2018

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Resumen

Este proyecto tiene como objetivo principal un marco de gestión del mantenimiento aplicado según la madurez de la empresa para optimizar los procesos relacionados con la gestión del mantenimiento de una máquina etiquetadora de botellas. Se ha aplicado un marco de gestión del mantenimiento basado en varios libros que están disponibles en el departamento.

Las fases del marco de gestión que se han usado han venido determinadas por la madurez de la empresa y también por el tiempo. Es un trabajo que no es definitivo, se trata de un trabajo secuencia y sostenible para continuar avanzando en el conocimiento del equipo elegido.

Índice

Resumen	8
Índice	10
1 Introducción al Mantenimiento	13
1.1 <i>Objetivos del mantenimiento</i>	14
1.1.1 Objetivo de disponibilidad	14
1.1.2 Objetivo de fiabilidad	14
1.1.3 La vida útil	15
1.1.4 El cumplimiento de presupuesto	15
1.2 <i>La mentalidad de mantenimiento a corto plazo</i>	15
2 Gestión del Mantenimiento	16
2.1 <i>Introducción al modelo de gestión del mantenimiento</i>	16
2.2 <i>Propuesta de un modelo genérico para la gestión del mantenimiento</i>	16
2.2.1 Definición de los objetivos y estrategia del mantenimiento	18
2.2.2 Prioridad de activos y definición de la estrategia de mantenimiento	18
2.2.3 Intervención inmediata en los puntos débiles de gran impacto	18
2.2.4 Diseño de los planes de mantenimiento preventivo y recursos	19
2.2.5 Plan preventivo, programación y optimización de recursos	19
2.2.6 Asignación y control de la ejecución del mantenimiento	19
2.2.7 Análisis del coste del ciclo de vida de un activo y optimización de la sustitución	19
2.2.8 Mejora continua y utilización de nuevas técnicas	20
2.3 <i>Indicadores claves de rendimiento para la gestión del mantenimiento</i>	20
2.3.1 Indicador de fiabilidad	21
2.3.2 Indicador de disponibilidad	22
3 Desarrollo del Mantenimiento Centrado en la Fiabilidad (MCF)	11
3.1 <i>Descripción del proceso productivo</i>	12
3.2 <i>¿Por qué nos centramos en la etiquetadora?</i>	13
3.3 <i>Mantenimiento Centrado en la Fiabilidad (MCF)</i>	15
3.3.1 Características del MCF	15
3.3.2 Proceso de implantación del MCF	16
3.3.3 Método de evaluación de Criticidad basada en el concepto de Riesgo	17
3.3.4 Diagrama Entrada Proceso Salida (EPS)	20
3.3.5 AMEF: Análisis de los modos y efectos de fallo	24
Funciones y estándares de ejecución	25
Estándares de ejecución	26
Definir los fallos funcionales asociadas a cada función del activo	26
Definir los modos de fallos asociados a cada fallo funcional	26
3.3.6. Proceso de selección de las actividades de mantenimiento bajo el enfoque del MCF	26
Actividades preventivas	27
Actividades correctivas	29
4 Modelos para la optimización del mantenimiento	30
4.1 <i>Clasificación de los modelos de optimización</i>	31

4.4.1	Modelos de sustitución total	32
4.4.2	Modelos de sustitución parcial	33
4.4.3	Modelos de sustitución con mantenimiento preventivo imperfecto	34
4.4.4	Modelos de sustitución basados en la condición	35
4.4.5	Modelos de acumulación del deterioro o de impacto	35
4.4.6	Modelos de inspección	36
5	Resultados	38
6	Conclusiones	45
	Referencias	46
	Glosario	48

1 INTRODUCCIÓN AL MANTENIMIENTO

La norma UNE-EN 13306 “Mantenimiento, Terminología del mantenimiento” de Marzo de 2011 define el mantenimiento como “la combinación de todas las acciones técnicas, administrativas y de gestión realizadas durante el ciclo de vida de un elemento, destinadas a conservarlo o devolverlo a un estado en el que pueda desempeñar su función requerida”.

El mantenimiento ha pasado por diferentes etapas a lo largo del proceso industrial. En los inicios de la revolución industrial, eran los propios operarios quienes se encargaban de las reparaciones de los equipos. Conforme fue aumentando la complejidad de las máquinas y la dedicación a tareas de reparación también, se empezaron a crear los primeros departamentos de mantenimiento. Las tareas de estas dos épocas eran básicamente correctivas, dedicando todo su esfuerzo a solucionar los fallos producidos en los equipos.

A partir de la Primera Guerra Mundial, de la Segunda y sobre todo, tras la grave crisis energética del 73, se empieza a concebir el concepto de fiabilidad, liderando dicha corriente la industria automovilística y la aviación. Nuevos métodos de trabajo son desarrollados enfocando el avance de las técnicas de mantenimiento en varias vertientes:

- Un diseño más robusto a prueba de fallos y que minimice las actuaciones de mantenimiento.
- El mantenimiento basado en la condición sustituye al mantenimiento sistemático, aparece el mantenimiento predictivo.
- Se empiezan a analizar los fallos que han ocurrido y los que tienen una probabilidad de ocurrir (fallos potenciales). Se desarrolla el Mantenimiento Centrado en la Fiabilidad (RCM) como un estilo de gestión del mantenimiento, basado en el estudio de los equipos, el análisis de los modos de fallo y en técnicas estadísticas y tecnología de detección.
- El uso de la informática para la gestión de datos tales como órdenes de trabajo, gestión de las actividades preventivas, gestión de materiales, control de costes, etc. Con el objetivo de convertir dichos datos en información útil para la toma de decisiones.
- La implicación de toda la organización en el mantenimiento de las instalaciones, Mantenimiento Productivo Total. Este concepto se enfoca en que algunas de las tareas normalmente realizadas por el personal de mantenimiento se realicen por operarios de producción. Dichas tareas generalmente son trabajos de limpieza, lubricación, ajustes e inspección. Busca una mayor implicación del operario de producción en el cuidado de la máquina, el objetivo máximo de esta filosofía de mantenimiento es conseguir *Cero Averías, Cero Defectos y Cero Accidentes*.

La empresa sobre la que se desarrolla este trabajo se encuentra en un estado de transición a la gestión autónoma de los equipos (TPM) pero sin un plan de mantenimiento preventivo definido.

Las razones que llevan a desarrollar este trabajo son:

- La pérdida de producción implica un alto coste adicional, que en la mayoría de las ocasiones es superior al coste de reparación o reposición de los elementos dañados.
- El objetivo no es solo que la mayoría de los equipos estén disponibles mucho tiempo, sino que además deben ser fiables.
- La seguridad y el medio ambiente son aspectos con una gran importancia en la gestión industrial, por lo que es necesario gestionar dichos aspectos para incluirlos en las formas de trabajo de los departamentos de mantenimiento.

Por todas estas razones, es necesario gestionar el mantenimiento que permitan controlar los equipos y que no sean los equipos los que imponen los resultados, sino que estos se ajustan a unos valores definidos por la empresa.

1.1 Objetivos del mantenimiento

La reparación de las averías que surjan no es el objetivo fundamental del mantenimiento, los objetivos que el mantenimiento debe marcar y a los que dirigirse son:

- Cumplir un valor determinado de disponibilidad
- Cumplir un valor determinado de fiabilidad
- Asegurar una vida útil de los equipos como mínimo acorde al plazo de amortización de los mismos
- Conseguir los anteriores objetivos ajustándose a un presupuesto dado, normalmente el presupuesto óptimo de mantenimiento para dichos equipos



Figura 1. Objetivos básicos del mantenimiento

1.1.1 Objetivo de disponibilidad

Según la norma española UNE-EN 13306 “Mantenimiento, Terminología del mantenimiento”, la “disponibilidad es la aptitud de un elemento para encontrarse en un estado en que pueda realizar su función, cuando y como se requiera, bajo condiciones dadas, asumiendo que se dispone de los recursos externos necesarios”. Por tanto, la disponibilidad se puede definir como la proporción de tiempo en el que un equipo está en disposición de producir, con independencia de que lo haga o no por razones ajenas a su estado técnico.

Los principales factores que afectan a la disponibilidad son:

- Horas de producción
- Horas de indisponibilidad total para producir debidas a diferentes factores como labores de mantenimiento
- Horas de indisponibilidad parcial, es decir, horas que el equipo está en disposición de producir pero con una capacidad inferior a la nominal debido a alguna deficiencia que impide que trabaje a plena carga

1.1.2 Objetivo de fiabilidad

Según la norma española UNE-EN 13306 “Mantenimiento, Terminología del mantenimiento”, la “fiabilidad es la aptitud de un elemento a realizar una función requerida bajo unas condiciones determinadas durante un intervalo de tiempo dado”. En otras palabras, la capacidad de un equipo para cumplir su plan de producción previsto.

Los factores a tener en cuenta para el estudio de la fiabilidad son:

- Horas de producción
- Horas de parada o reducción de carga debidas exclusivamente a mantenimiento correctivo no programado

Se puede observar como no se tienen en cuenta en este factor las horas dedicadas a las actividades de mantenimiento programado.

El mantenimiento busca que el valor de la fiabilidad se encuentre siempre por encima de un valor establecido en el diseño técnico-económico de la planta.

1.1.3 La vida útil

El tercer gran objetivo del mantenimiento es que los equipos presenten un estado de degradación acorde con lo planificado de manera que ni la disponibilidad ni la fiabilidad ni el coste de mantenimiento presenten unos valores no acordes de los objetivos fijados en un largo período de tiempo, normalmente acorde con el plazo de amortización de los equipos.

1.1.4 El cumplimiento de presupuesto

Los objetivos anteriormente descritos no se pueden conseguir a cualquier precio. El departamento de mantenimiento debe conseguir los objetivos marcados ajustando sus costes a lo establecido en el presupuesto. Este presupuesto debe ser calculado con sumo cuidado, ya que un presupuesto inferior a lo que el equipo requiere empeora irremediabilmente los resultados de producción y hace disminuir la vida útil del equipo.

1.2 La mentalidad de mantenimiento a corto plazo

Una mentalidad cortoplacista es lo más perjudicial para los intereses económicos de cualquier instalación industrial. Normalmente, decisiones que dan resultado de forma inmediata pueden resultar muy dañinas más adelante. Así, la ausencia de una gestión de mantenimiento eficaz tiene un resultado destructivo para los equipos.

Por todas estas razones que se explican y se muestran en este capítulo es muy importante implantar una gestión de mantenimiento eficaz y que de resultados.

2 GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO

2.1 Introducción al modelo de gestión del mantenimiento

Los modelos de gestión del mantenimiento están frecuentemente asociados a un amplio rango de dificultades. Los principales problemas, que a priori, parecen difíciles de gestionar se deben a algunas de las siguientes razones:

- Falta de modelos de mantenimiento (Parra and Crespo, 2012). Hay una falta de modelos que puedan mejorar las dimensiones del mantenimiento. El mantenimiento es algo subdesarrollado con una falta de metodologías de prevención efectivas.
- Una amplia diversificación en los problemas de mantenimiento. El mantenimiento está compuesto de una serie de actividades para las que resulta muy difícil encontrar procedimientos e información que facilite a los sistemas a crear procesos de mejora. La amplia diversificación de los problemas que el mantenimiento encuentra se debe normalmente al alto nivel de variedad en la tecnología usada en la manufactura del producto, incluso en negocios dentro del mismo sector productivo; además, crear una metodología operativa de aplicabilidad general no ha sido una tarea fácil.
- La falta del conocimiento de la planta/proceso y datos. Managers, supervisores y operadores normalmente encuentran que la falta del conocimiento de la planta o el proceso es la principal restricción, seguido de la falta de datos históricos, para implementar políticas de mantenimiento adecuadas.
- La falta de tiempo para completar el análisis requerido. Muchos managers indican que no tienen el tiempo suficiente para llevar a cabo los análisis correspondientes de los problemas de mantenimiento. Las acciones y decisiones del día a día los distraen de las actividades fundamentales para mejorar el mantenimiento.
- La falta de un apoyo de gestión adecuado. La falta de liderazgo para fomentar programas de mejora del mantenimiento, el miedo a un incremento de paradas en la producción, etc. Son otras causas comunes del mantenimiento subdesarrollado en organizaciones.
- Exigentes factores de seguridad y medio ambiente. Además de los problemas comentados anteriormente, nuevas y más exigentes factores de seguridad y medio ambiente tales como regulaciones emergentes que presionan a la gestión del mantenimiento y añaden complejidad a su función.

Algunos autores (Parra y Crespo, 2006) han trabajado en la caracterización de la complejidad encontrada en la función de gestión del mantenimiento en un entorno productivo, creando herramientas que son capaces de evaluar cada uno de los factores revisados anteriormente. Los índices de complejidad de la gestión del mantenimiento pueden ser útiles como un método para comparar diferentes entornos productivos y ayudar a decidir el esfuerzo relativo y los recursos que se requieren para mantenerlos.

2.2 Propuesta de un modelo genérico para la gestión del mantenimiento

El modelo genérico propuesto para la gestión del mantenimiento que ahora se va a proponer y definir integra otros modelos encontrados en la literatura y consiste en ocho bloques secuenciales de gestión (Parra y Crespo, 2006). Cada bloque es, de hecho, un área clave de decisión para el mantenimiento de activos y la gestión del ciclo de vida. Dentro de cada una de esas áreas de decisión podemos encontrar métodos y modelos que pueden ser usados para ordenar y facilitar los procesos para la toma de decisiones.

El proceso de gestión del mantenimiento puede ser dividido en dos partes: la definición de la estrategia y la implementación de la estrategia. La primera parte, definición de la estrategia de mantenimiento, requiere la definición de los objetivos de mantenimiento como una entrada, la cual será derivada directamente de un plan de negocio. Esta parte inicial del proceso de gestión del mantenimiento condiciona el éxito del mantenimiento

en una organización, y determina la efectividad de la implementación de los planes de mantenimiento, calendarios, controles y mejoras. La eficacia nos muestra si un departamento o función cumple sus objetivos o las necesidades de la compañía de forma adecuada, y es, a menudo, presentada en términos de calidad de servicio proporcionada, vista desde la perspectiva del cliente. La eficacia se centra pues en la exactitud del proceso y si este da lugar a los resultados esperados (Valliasindi, 1989; Wireman, 1998; Palmer, 1999).

La segunda parte del proceso, la implementación de la estrategia seleccionada presenta un nivel de significancia diferente. Nuestra habilidad para tratar con el problema de la implementación de la gestión del mantenimiento (por ejemplo, nuestra habilidad para asegurar los niveles de calidad apropiados, la preparación del trabajo apropiada, herramientas adecuadas y un calendario de cumplimiento) nos permitirá minimizar los costes directos de mantenimiento (mano de obra y otros recursos de mantenimiento requeridos). En esta parte del proceso, tratamos con la eficiencia de nuestra gestión, que no debería ser menos importante. La eficiencia está actuando o produciendo con un mínimo coste, desperdicio o esfuerzo innecesario. La eficiencia se entiende como proveer el mismo o mejor mantenimiento por el mismo coste.

En dicho estudio, se presenta un modelo genérico propuesto para la gestión del mantenimiento que integra otros modelos encontrados en la literatura (Pintelon & Gelders, 1992; Vanneste & van Wassenhove, 1995) que consiste en ocho bloques secuenciales de gestión, como se muestra en la figura 2 (Parra y Crespo, 2006). Los tres primeros bloques condicionan la eficacia del mantenimiento, el cuarto y el quinto aseguran la eficiencia del mantenimiento, bloques seis y siete aseguran la evaluación del mantenimiento, así como del ciclo de vida de los activos y, finalmente, el bloque ocho se asegura de la mejora continua de la gestión del mantenimiento.



Figura 2. Los ocho bloques secuenciales de la gestión del mantenimiento

2.2.1 Definición de los objetivos y estrategia del mantenimiento

Respecto a la definición de los objetivos del mantenimiento y de los indicadores claves de rendimiento – KPI's (Fase 1), es común a los objetivos operacionales y estrategia, así como las medidas de rendimiento, son inconsistentes con la estrategia comercial global declarada (Gelders et al., 1994). Esta situación insatisfactoria puede ser evitada al introducir el cuadro de mando integral – BSC (Kaplan y Norton, 1992). El BSC es específico para cada organización que desarrolla y permite la creación de KPIs para la medida del desempeño de la gestión del mantenimiento que están alineados a los objetivos estratégicos de la organización.

2.2.2 Prioridad de activos y definición de la estrategia de mantenimiento

Una vez los objetivos y la estrategia del mantenimiento son definidos, hay un gran número de técnicas cuantitativas y cualitativas que intentan dar una base sistemática para decidir que activos deberían tener prioridad en el proceso de la gestión del mantenimiento (Fase 2), una decisión que debería ser tomada en concordancia con la estrategia de mantenimiento existente. La mayoría de las técnicas cuantitativas usan una variación de un concepto conocido como “número probabilidad/riesgo” – PRN (Moubray, 1997).

Activos con un mayor PRN serán analizados los primeros. A menudo, el número de activos que presenta cierto riesgo sobrepasa los recursos disponibles para gestionarlos. Es, además, extremadamente importante conocer donde se debe aplicar los recursos disponibles para suavizar el riesgo de una manera económica y eficiente. Calificar el riesgo es la parte del proceso de gestión del riesgo continuo que asigna prioridades relativas para los planes y la implementación del mantenimiento. En asignaciones profesionales de riesgo, el riesgo combina la probabilidad de que un evento ocurra y el impacto que tiene en caso de que ocurra. La medida más común del riesgo para este tipo de eventos es $R = P \times C$, donde P es la probabilidad y C es la consecuencia. El riesgo total es además la suma de las clases de riesgo individuales (Parra y Crespo, 2006). El procedimiento a seguir para llevar a cabo el análisis de criticidad de los activos seguido de las técnicas de evaluación del riesgo puede llevarse a cabo de siguiente modo:

- Definir el objetivo y alcance del análisis
- Establecer los factores de riesgo tomados en consideración y su importancia relativa
- Decidir el número de activos con un nivel crítico de riesgo
- Establecer un procedimiento general para la identificación y priorización de los activos críticos.

Tener en cuenta que asignar la criticidad será específica para cada sistema individual, planta o unidad de negocio. Por tanto, la criticidad de dos plantas similares en la misma industrial puede ser diferente ya que los factores de riesgo para ambas plantas pueden variar o tener distinta importancia relativa.

2.2.3 Intervención inmediata en los puntos débiles de gran impacto

Una vez los activos han sido priorizados y la estrategia de mantenimiento a seguir definida, el siguiente paso sería desarrollar las correspondientes acciones de mantenimiento asociadas con cada categoría de activos. Antes de hacer eso, debemos centrarnos en ciertos fallos repetitivos o crónicos que se dan lugar en los elementos con alta prioridad (Fase 3).

Encontrar y eliminar, si es posible, la causa de aquellos fallos podría ser una intervención inmediata dando lugar a un rápido e importante reembolso inicial de nuestra estrategia de mantenimiento.

Existen diferentes métodos desarrollados para llevar a cabo el análisis de los puntos débiles, uno de los más conocidos es el conocido como AMEF (Análisis de los Modos y Efectos de los Fallos). Este método consiste en una serie de acciones llevadas a cabo para descubrir por qué un fallo o problema particular existe y para corregir las causas. Las causas pueden ser clasificadas como físicas, humanas o latentes. La causa física es la razón por la que el activo falla, la explicación técnica de por qué las cosas se rompen o fallan. La causa humana incluye errores humanos (omisión o manipulación) que terminan en raíces físicas. Las causas de fallos latentes serán las que más preocupación albergarán a este punto del proceso. Tener en consideración que, aunque técnicas AMEF informales se suelen usar normalmente de forma individual o grupal para determinar acciones correctivas para un problema, éstas tienen limitaciones que pueden hacer el desarrollo de la solución a largo plazo difícil.

2.2.4 Diseño de los planes de mantenimiento preventivo y recursos

Diseñar el plan de mantenimiento preventivo (MP) para un sistema (Fase 4) requiere identificar sus funciones, el modo en el que esas funciones pueden fallar y entonces, establecer una serie de tareas de MP aplicables y efectivas, basadas en consideraciones de la economía y seguridad del sistema. Un método formal para hacer esto es el Mantenimiento Centrado en la Fiabilidad (Parra y Crespo, 2006). La metodología MCF nos permite la identificación de las necesidades reales de mantenimiento empezando por el análisis de las 7 preguntas:

- ¿Cuáles son las funciones y los estándares de rendimiento asociados al activo en su contexto operativo actual?
- ¿De qué modo falla el activo para cumplir su función?
- ¿Qué causa cada fallo funcional?
- ¿Qué ocurre cuando se da dicho fallo?
- ¿Cómo de importante es cada fallo?
- ¿Qué puede ser hecho para prevenir ese fallo?

2.2.5 Plan preventivo, programación y optimización de recursos

La optimización de la planificación y programación del mantenimiento (Fase 5) se puede llevar a cabo para mejorar la efectividad y la eficiencia de las políticas de mantenimiento resultando de un plan de mantenimiento preventivo inicial y un programa de diseño.

Los modelos para optimizar el plan de mantenimiento y calendarios variarán dependiendo del horizonte de tiempo del análisis. Los modelos a largo plazo abordan la planificación de la capacidad del mantenimiento, aprovisionamiento de repuestos y los problemas de determinación del intervalo de mantenimiento/sustitución; los modelos a medio plazo abordan, por consiguiente, la programación de las actividades de mantenimiento en una planta grande cerrada; mientras que los modelos a corto plazo se centran en el control y localización de los recursos (Duffuaa, 2002). Los enfoques del modelado, analítico y empírico, son muy diversos. La complejidad de los problemas es a menudo muy alta y fuerza la consideración de ciertas suposiciones para simplificar la resolución analítica de los modelos, o a veces, reducir las necesidades computacionales.

Por ejemplo, el uso del modelo de simulación Monte-Carlo puede mejorar la programación del MP, permitiendo la asignación de políticas de programación alternativas que podrían ser implementadas dinámicamente en la planta (Parra y Crespo, 2006).

2.2.6 Asignación y control de la ejecución del mantenimiento

La ejecución de las actividades de mantenimiento, una vez diseñadas, planificadas y programadas usando las técnicas descritas en los anteriores bloques han de ser evaluadas y las desviaciones han de ser controladas para poder garantizar los objetivos del negocio, así como los KPIs seleccionados por la organización (Fase 6). Mucho de los KPIs de alto nivel del mantenimiento están creados o compuestos usando otros indicadores técnicos y económicos de bajo nivel. Además, es muy importante asegurarse que la organización obtiene datos adecuados y que éstos son agregados/disgregados de acuerdo a los niveles requeridos para el análisis del rendimiento del mantenimiento.

2.2.7 Análisis del coste del ciclo de vida de un activo y optimización de la sustitución

El análisis del coste del ciclo de vida (Fase 7) calcula el coste de un activo abarcando su vida entera. El análisis de un activo corriente puede incluir los costes de planificación, investigación y desarrollo, producción, operación, mantenimiento y disposición. Costes tales como los de adquisición inicial (investigación, diseño, test, producción y construcción) son de forma general obvios, pero el análisis del coste del ciclo de vida crucialmente depende de los valores calculados a partir de los análisis de fiabilidad tales como el porcentaje de fallo, el coste de los repuestos, las veces que se repara y los costes de los componentes. Un análisis del coste del ciclo de vida es importante cuando se toman decisiones sobre el capital de los equipos (sustitución o nueva adquisición) (Campbell y Jardine, 2001), esto refuerza la importancia de los costes bloqueados como I+D, y ofrece tres importantes beneficios:

- Todos los costes asociados a un activo se vuelven visibles. I+D, mantenimiento etc.

- Permite un análisis de interrelaciones de funciones comerciales. Bajo coste en I+D puede derivar en alto coste de mantenimiento en el futuro.
- Se destacan las diferencias en el gasto en la etapa inicial, habilitando al personal correspondiente a desarrollar predicciones de beneficios adecuadas.

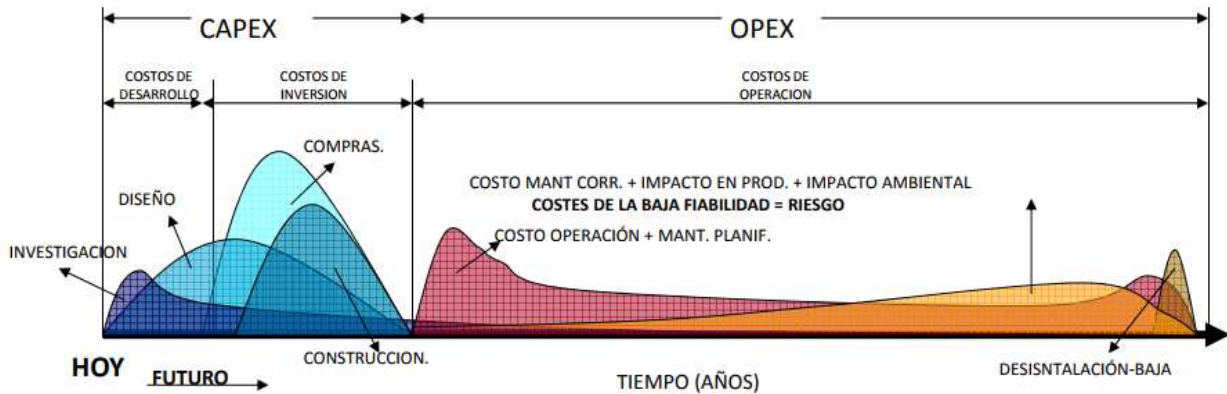


Figura 3. Análisis del coste del ciclo de vida

2.2.8 Mejora continua y utilización de nuevas técnicas

La mejora continua de la gestión del mantenimiento (Fase 8) será posible debido a la utilización de técnicas y tecnologías emergentes en áreas que son consideradas de tener un gran impacto como resultado de los pasos anteriores de nuestro proceso de gestión. En referencia a la aplicación de nuevas tecnologías para el mantenimiento, el concepto de “e-mantenimiento” (Parra y Crespo, 2006) se presenta como un componente del concepto de “e-fabricación” (Lee, 2003), en el que los ingresos de la información emergente y las tecnologías de comunicación pueden ser definidas (Tsang et al., 1999) como un apoyo al mantenimiento que incluye los recursos, servicios y gestión necesarios para permitir la ejecución proactiva del proceso de decisión.

2.3 Indicadores claves de rendimiento para la gestión del mantenimiento

La norma europea UNE-EN 15341 “Mantenimiento. Indicadores clave de rendimiento del mantenimiento” proporciona los Indicadores Clave de Rendimiento del Mantenimiento para apoyar a la gestión del logro de la excelencia en el mantenimiento y en el empleo de los activos técnicos de una manera competitiva.

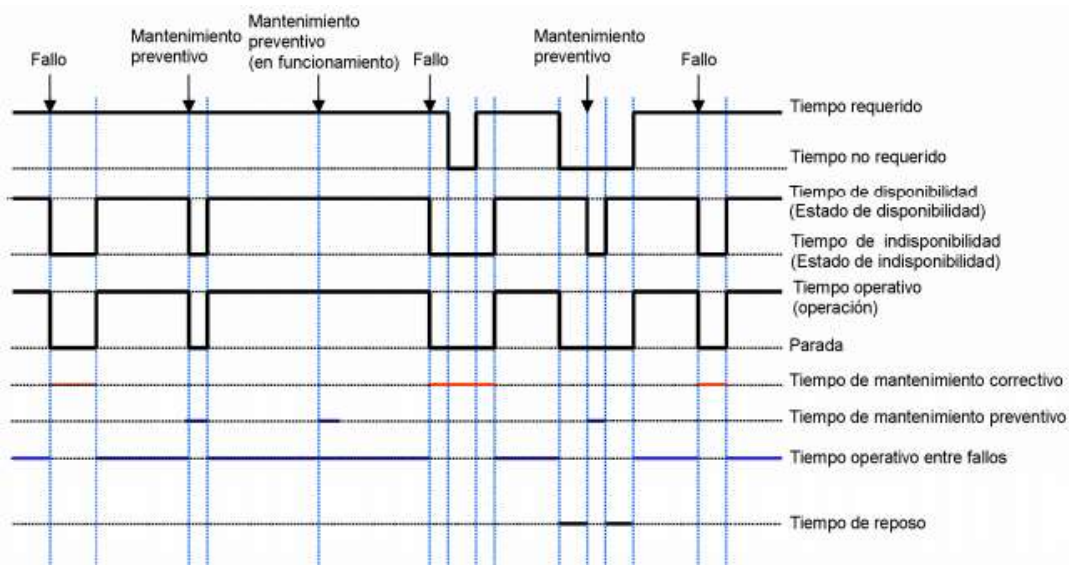


Figura 4. Tiempos relativos al mantenimiento

Se utilizarán los tiempos relativos al mantenimiento para el cálculo de los indicadores clave de rendimiento como marca la norma europea UNE-EN 15341.

Para este proyecto, los Indicadores Claves de Rendimiento propuestos están relacionados con:

- Disponibilidad (D)
- Fiabilidad (R)
- Mantenibilidad

Se van a presentar los parámetros que se van a utilizar en el cálculo de estos índices.

Parámetros	Definición
TTF	Tiempo hasta el fallos
TBF	Tiempo entre fallos
DT	Tiempo fuera de servicio
TTR	Tiempo en reparación
TOC	Tiempo fuera de control
MDT	Tiempo medio fuera de servicio
MTTF	Tiempo medio entre fallos
MTTR	Tiempo medio de reparación
MTOC	Tiempo medio fuera de control

Tabla 1. Indicadores que se van a utilizar en este trabajo

2.3.1 Indicador de fiabilidad

La fiabilidad puede ser definida como *la probabilidad de que un equipo cumpla con la función requerida (no falle) bajo unas condiciones específicas de operación durante un período de tiempo específico*.

La fiabilidad está relacionada con la tasa de fallo y con el tiempo medio entre fallos (MTTF). Si el número de fallos de un activo específico aumenta o si el MTTF disminuye, su fiabilidad disminuirá.

Indicador básico de fiabilidad: MTTF = tiempo medio entre fallos.

$$MTTF = \sum TTF / n \quad (1)$$

N = número de fallos.

2.2 Indicador de mantenibilidad

La mantenibilidad puede ser definida como *la capacidad que tiene un equipo para volver a su estado inicial y que cumpla su función en un período de tiempo dado, después de que aparezca un fallo, utilizando procedimientos de mantenimiento preestablecidos*.

La mantenibilidad está relacionada con el diseño y la complejidad del equipo, con el personal cualificado que lleva a cabo el mantenimiento, con las herramientas disponibles y con los procedimientos de mantenimiento. El parámetro fundamental para calcular la mantenibilidad está constituido por el tiempo medio de reparación (MTTR). Cuando el MTTR de un equipo específico es alto, el equipo presenta una baja mantenibilidad (su tiempo de reparación deberá ser reducido). Por el contrario, si el tiempo medio de reparación para un equipo específico es bajo, se considera que el equipo presenta una alta mantenibilidad.

Indicador básico de Mantenibilidad: MTTR = tiempo medio de reparación.

$$MTTR = \sum TTR / n \quad (2)$$

N = número de fallos

2.3.2 Indicador de disponibilidad

Este término puede ser expresado en una primera aproximación, como la proporción del tiempo en la que el activo está listo para dar la función requerida, bajo unas condiciones dadas, con respecto al tiempo que no cumple con la función requerida. Este último período se denomina indisponibilidad y como es obvio, es un período improductivo. El concepto de disponibilidad puede ser definido como *la posibilidad de que un equipo cumpla con su función requerida en cualquier período de tiempo*.

La disponibilidad está relacionada con el tiempo fuera de servicio y el tiempo medio entre fallos.

A partir de estos tres indicadores mencionados, la disponibilidad constituye la información de los parámetros más representativos y útiles para la gestión. El cálculo de la disponibilidad es más fácil en comparación con el cálculo de los otros dos parámetros y la interrelación de la fiabilidad y la mantenibilidad.

Se presenta a continuación el método para calcular la Disponibilidad Operativa (D_0)

- **Disponibilidad (D_0):** la disponibilidad operativa tiene en consideración el tiempo no operativo del equipo de una manera general (desde el tiempo que está fuera de servicio hasta que se pone en acción de nuevo), por ejemplo: éste incluye el retraso (pero no lo estima o cuantifica) que se da en la logística del mantenimiento (compra de repuestos, transporte, inactividad no especificada, etc.). La ecuación para calcular la disponibilidad operacional (D_0) es:

$$(3) D = \frac{MTTF}{MTTF + MDT} * 100\%$$

Donde:

- N = número de fallos
- MTTF = tiempo medio entre fallos
- MDT = tiempo medio fuera de servicio
- MTOC = tiempo medio fuera de control

$$MDT = MTTR + MTOC \quad (4)$$

$$MDT = \sum DT / n \quad (5)$$

$$MTTR = \sum TTR / n \quad (2)$$

$$MTOC = \sum TOC / n \quad (6)$$

$$MTTF = \sum TTF / n \quad (1)$$

3 DESARROLLO DEL MARCO DE GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO

En este capítulo se va a describir el modo en el que se ha desarrollado el marco de gestión del mantenimiento.

Lo primero que se va a presentar es el ciclo de gestión del mantenimiento. Es un ciclo de ocho fases que sirve de guía para desarrollar el marco y poder conseguir los objetivos propuestos.

La primera fase es la definición de objetivos, estrategias y responsabilidades del mantenimiento, para ello se va a hacer un estudio del proceso productivo de la línea a la que se le va a aplicar el marco, y así empezar a desarrollar el mismo para el elemento más crítico.



Figura 5. Fase 1 del ciclo de gestión del mantenimiento

El objetivo principal de este estudio es mejorar la productividad de la línea, aumentando los factores claves de rendimiento de disponibilidad y fiabilidad de los elementos que componen la línea. Para ello, se va a comenzar por el elemento más crítico.

Se va a proceder a realizar la descripción del proceso productivo para entender mejor la línea y basar este estudio en los resultados actuales que presenta el sistema.

Objetivo Estratégico	Medidas	Metas	Planes de acción	Perspectiva
Mejorar la productividad de la línea	Indicador clave de rendimiento de producción (en %)	Actual: 60% Objetivo: 75%	Reducir el número de fallos repetitivos y microparadas	Financiera
Mejorar el tiempo para reparar y la calidad del mantenimiento	Fallos repetitivos MTTR	Nº fallos repetitivos < 5 Reducir el MTTR en un 10%	Programa de análisis de fallos Programa de mejora del mantenimiento	Clientes
Asentar el paso 4 del TPM “Gestión Autónoma”	Nivel de entrenamiento de los operarios	Los operarios realicen labores básicas de mtto.	Formación y evaluación	Aprendizaje

3.1 Descripción del proceso productivo

La línea de envasado que se va a estudiar se compone de los elementos que se presentan a continuación, con su correspondiente flujo de producción.

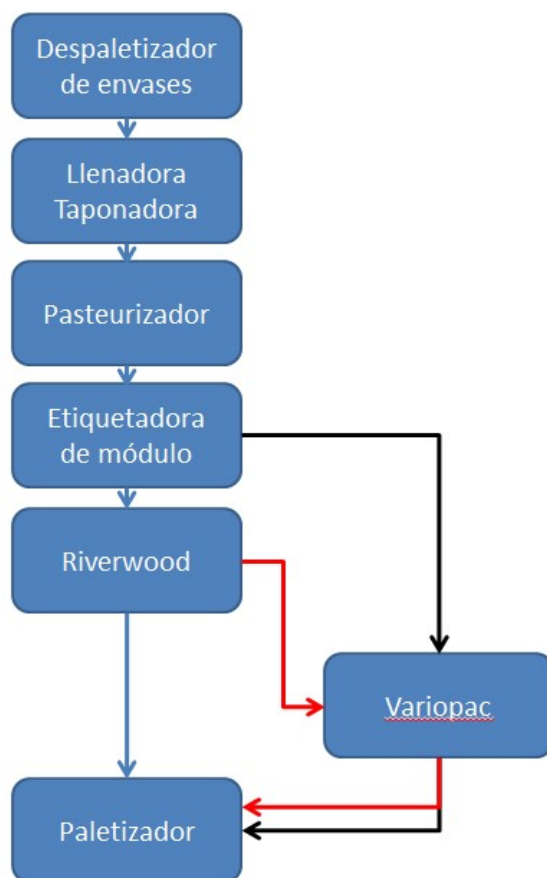


Figura 6. Flujo de producción

Resumen del proceso de producción: los envases vacíos, en esta línea botellas de vidrio nuevo de 20 cl de volumen, se despaletizan mediante la máquina despaletizadora de envases. Pasan a la llenadora y taponadora, para llenar los envases con el producto correspondiente y a la salida de la misma se les pone el tapón corona. Una vez llenas se pasteurizan (baño de agua caliente) los envases para eliminar los posibles microbios que puedan crecer en la cerveza. Salen del pasteurizador y se dirigen a la etiquetadora de módulo para ser etiquetados (solo collarín y cuello en esta línea). Una vez etiquetados los envases, según el formato que se esté produciendo realizará una de las siguientes trayectorias:

- a) Etiquetadora – Riverwood – Paletizador (línea azul en *Figura 1*)
- b) Etiquetadora – Variopac – Paletizador (línea negra en *Figura 1*)
- c) Etiquetadora – Riverwood – Variopac – Paletizador (línea roja en *Figura 1*)

Riverwood es una máquina que agrupa los envases en unas cajas de cartón, normalmente 6 envases por caja.

Variopac es una máquina que embala o bien envases sueltos (pack de 24 envases) o bien las cajas (pack de 4 cajas) que salen de la riverwood.

Una vez que se realiza el formato correspondiente, se manda las cajas o los packs a la paletizadora que agrupan los packs a una altura correspondiente (según formato) y se vuelven a embalar. Este es el proceso que se realiza en una línea de envasado de botellas de vidrio nuevo.

3.2 ¿Por qué nos centramos en la etiquetadora?

Para estudiar cuál es la máquina más crítica de la línea, se ha tomado como referencia la Fiabilidad (R), el Tiempo Promedio entre Fallos (MTBF), Tiempo Promedio en Reparación (MTTR) y Disponibilidad (D).

La disponibilidad (D) se ha calculado a través del MTBF y el MTTR con la siguiente expresión: $D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$

El tiempo medio entre fallos (MTBF) se calcula a partir de las horas en funcionamiento de la máquina en el año correspondiente y de los nº de fallos de la misma en el mismo año. $MTBF = \frac{\text{Horas en funcionamiento al año}}{\text{nº de fallos}}$

El tiempo medio fuera de servicio (MTTR), se obtiene de los informes de producción de la línea en los que se detalla las paradas que ha sufrido la máquina, la causa y el tiempo que ha estado fuera de servicio. Se calcula realizando la media de los tiempos en los que la máquina ha estado fuera de servicio.

La Fiabilidad (R) de cada máquina se ha calculado multiplicando la disponibilidad por el por el porcentaje de no pérdida de la máquina, es decir:

$$R = (1 - \% \text{ pérdida avería} - \% \text{ pérdida menor}) * D$$

Además de los factores relacionados con

A continuación, se presentan dos tablas con los resultados obtenidos:

MTBF / MTTR/DISPONIBILIDAD (D)	AÑO 2014				AÑO 2015			
	MTBF	MTTR	D		MTBF	MTTR	D	
maquina	nº de fallos	horas	horas		nº de fallos	horas	horas	
Despaletizadora de vidrio nuevo	79	63,41	0,80	98,75%	37	130,42	0,82	99,37%
Llenadora Taponadora	107	46,82	0,83	98,26%	97	49,75	0,52	98,96%
Pasteurizador	9	556,63	0,72	99,87%	7	689,36	0,65	99,91%
Etiquetadora de módulo	109	45,96	0,75	98,39%	148	32,60	1,01	97,01%
Riverwood - Agrupadora	67	74,77	0,72	99,05%	87	55,47	0,98	98,27%
Variopack - Embaladora de bandejas	87	57,58	0,78	98,66%	87	55,47	0,78	98,61%
Robot Paletizadora	80	62,62	0,69	98,90%	48	100,53	0,56	99,45%
Transportador de botellas	53	94,52	0,60	99,37%	51	94,62	0,54	99,43%
MTBF / MTTR/DISPONIBILIDAD (D)	AÑO 2016				AÑO 2017			
	MTBF	MTTR	D		MTBF	MTTR	D	
maquina	nº de fallos	horas	horas		nº de fallos	horas	horas	
Despaletizadora de vidrio nuevo	96	50,96	0,82	98,42%	44	67,29	0,60	99,12%
Llenadora Taponadora	105	46,59	0,65	98,63%	119	54,28	0,65	98,81%
Pasteurizador	14	349,41	1,16	99,67%	4	1614,89	0,67	99,96%
Etiquetadora de módulo	94	52,04	0,95	98,22%	153	42,22	0,89	97,94%
Riverwood - Agrupadora	87	56,23	0,73	98,72%	113	57,16	0,77	98,67%
Variopack - Embaladora de bandejas	141	34,69	0,78	97,81%	89	72,58	0,82	98,88%
Robot Paletizadora	60	81,53	0,67	99,19%	174	37,12	0,81	97,85%
Transportador de botellas	68	71,94	0,49	99,33%	40	161,49	0,60	99,63%

Tabla 2. Resultados obtenidos del MTBF, MTTR y Disponibilidad

FIABILIDAD	AÑO 2014				AÑO 2015			
	minor	avería	TOTAL	FIABILIDAD	minor	avería	TOTAL	FIABILIDAD
maquina	% pérdida	% pérdida	% pérdida	R	% pérdida	% pérdida	% pérdida	R
Despaletizadora de vidrio nuevo	0,70 %	1,65 %	2,35 %	96,42 %	0,65%	0,82 %	1,48%	97,91 %
Llenadora Taponadora	1,88 %	2,85 %	4,73 %	93,61 %	2,08%	1,59 %	3,67%	95,33 %
Pasteurizador	0,12 %	0,33 %	0,44 %	99,43 %				99,91 %
Etiquetadora de módulo	2,79 %	2,42 %	5,21 %	93,27 %	4,02%	3,91 %	7,94%	89,31 %
Riverwood - Agrupadora	1,47 %	1,11 %	2,58 %	96,49 %	2,54%	2,38 %	4,92%	93,43 %
Variopack - Embaladora de bandejas	2,22 %	1,60 %	3,81 %	94,90 %	1,96%	1,22 %	3,17%	95,48 %
Robot Paletizadora	2,53 %	1,38 %	3,91 %	95,04 %	1,87%	0,72 %	2,58%	96,88 %
Transportador de botellas	0,79 %	0,34 %	1,13 %	98,25 %		0,56 %	0,56%	98,87 %
FIABILIDAD total general				71,57 %				71,16 %
FIABILIDAD	AÑO 2016				AÑO 2017			
	minor	avería	TOTAL	FIABILIDAD	minor	avería	TOTAL	FIABILIDAD
maquina	% pérdida	% pérdida	% pérdida	R	% pérdida	% pérdida	% pérdida	R
Despaletizadora de vidrio nuevo	0,91%	1,4 %	2,29%	96,16 %	0,72%	0,4 %	1,11%	98,02 %
Llenadora Taponadora	1,83%	1,3 %	3,17%	95,50 %	1,68%	1,3 %	2,99%	95,86 %
Pasteurizador		0,4 %	0,38%	99,29 %			0,00%	99,96 %
Etiquetadora de módulo	2,75%	2,0 %	4,72%	93,58 %	3,46%	3,0 %	6,46%	91,61 %
Riverwood - Agrupadora	1,91%	1,2 %	3,14%	95,61 %	2,75%	1,7 %	4,43%	94,29 %
Variopack - Embaladora de bandejas	3,01%	2,2 %	5,17%	92,76 %	1,64%	1,0 %	2,67%	96,24 %
Robot Paletizadora	2,26%	0,8 %	3,06%	96,16 %	2,96%	3,1 %	6,08%	91,91 %
Transportador de botellas	0,99%	0,4 %	1,35%	97,99 %	1,13%	0,5 %	1,61%	98,03 %
FIABILIDAD total general				71,31 %				70,35 %

Tabla 3. Resultados obtenidos de Fiabilidad.

Además de estos resultados, se ha realizado un análisis de riesgo basado en la seguridad, que es el criterio al que la empresa define como el más importante. La etiquetadora es la máquina que sufre el mayor número de intervenciones durante el proceso productivo. Estas tareas van desde ir suministrando cargadores de etiquetas y cola, a intervenciones de parada en el caso de que no se esté etiquetando bien, ya que este equipo no es tan sensible a paradas automáticas como otros equipos, que defectos mínimos provocan la parada automática del equipo.

En base a los resultados obtenidos, se decide que el estudio se realice sobre la etiquetadora de módulo porque se observa que es la máquina que presenta una menor disponibilidad y fiabilidad, factores claves para el funcionamiento óptimo de cualquier activo.

3.3 Mantenimiento Centrado en la Fiabilidad (MCF)

El MCF sirve de guía para identificar las actividades de mantenimiento con sus respectivas frecuencias a los activos más importantes de un contexto operacional. Esta no es una fórmula matemática y su éxito se apoya principalmente en el análisis funcional de los activos de un determinado contexto operacional, realizado por un grupo natural de trabajo. “El esfuerzo desarrollado por el equipo natural, permite generar un sistema de gestión del mantenimiento flexible, que se adapta a las necesidades reales de mantenimiento de la organización, tomando en cuenta, la seguridad personal, el ambiente, las operaciones y la razón costo/beneficio” (Jones, 1995). (Jones, Richard, “Risk – Based Management: A Reliability – Centered Approach”, Gulf Publishing Company, First Edition, Houston, Texas 1995, Pág: 1).

El MCF se define de la siguiente forma: “Filosofía de gestión del mantenimiento, en la cual un equipo multidisciplinario de trabajo, se encarga de optimizar la fiabilidad operacional de un sistema que funciona bajo condiciones de trabajo definidas, estableciendo las actividades más efectivas de mantenimiento en función de la criticidad de los activos pertenecientes a dicho sistema, tomando en cuenta los posibles efectos que originarán los modos de fallo de estos activos, a la seguridad, al ambiente y a las operaciones”.

En otras palabras, el MCF es una metodología que permite identificar estrategias efectivas de mantenimiento que permitan garantizar el cumplimiento de los estándares requeridos por los procesos de producción.

A continuación se va a presentar un diagrama el marco de la gestión del mantenimiento que se va a seguir e implantar:

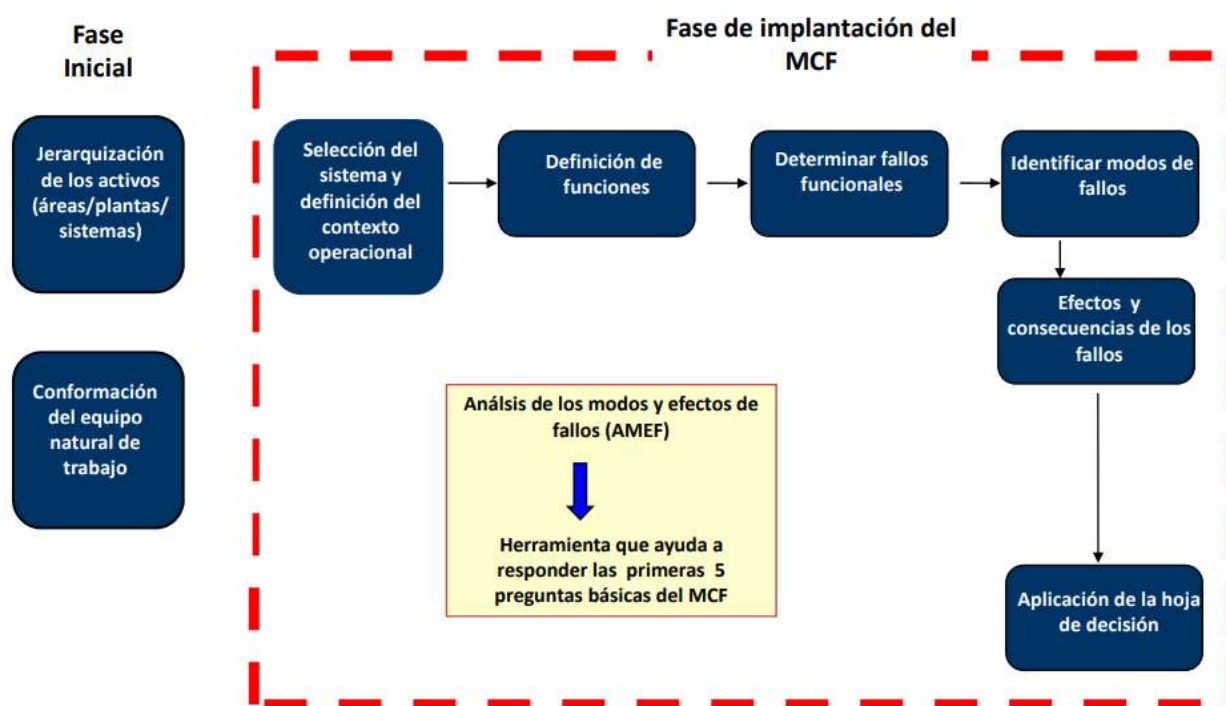


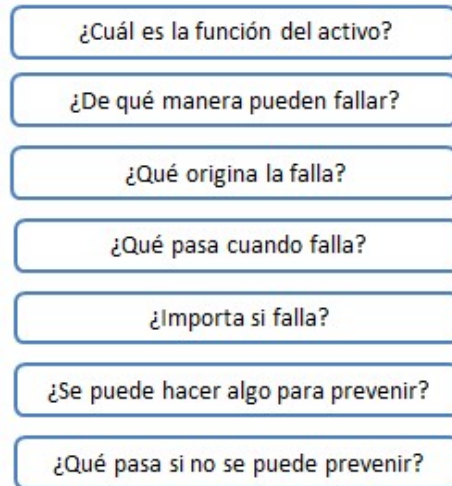
Figura 7. Marco de la gestión del mantenimiento

3.3.1 Características del MCF

- Herramienta que permite ajustar las acciones de control de fallos (estrategias de mantenimiento) al entorno operacional.
- Metodología basada en un procedimiento sistemático que permite generar planes óptimos de mantenimiento/produce un cambio cultural.
- Los resultados de la aplicación del MCF, tendrán un mayor impacto, en sistemas complejos con diversidad de modos de fallo.

- Maduración: mediano-largo plazo.

La metodología MCF, propone un procedimiento que permite identificar las necesidades reales de mantenimiento de los activos en su contexto operacional, a partir del análisis de las siguientes siete preguntas:



3.3.2 Proceso de implantación del MCF

A continuación, se presenta el esquema propuesto para implantar el MCF. El éxito del proceso de implantación del MCF, dependerá básicamente del desempeño del equipo natural de trabajo, el cual se encargará de responder las siete preguntas básicas del MCF, siguiendo el siguiente esquema:

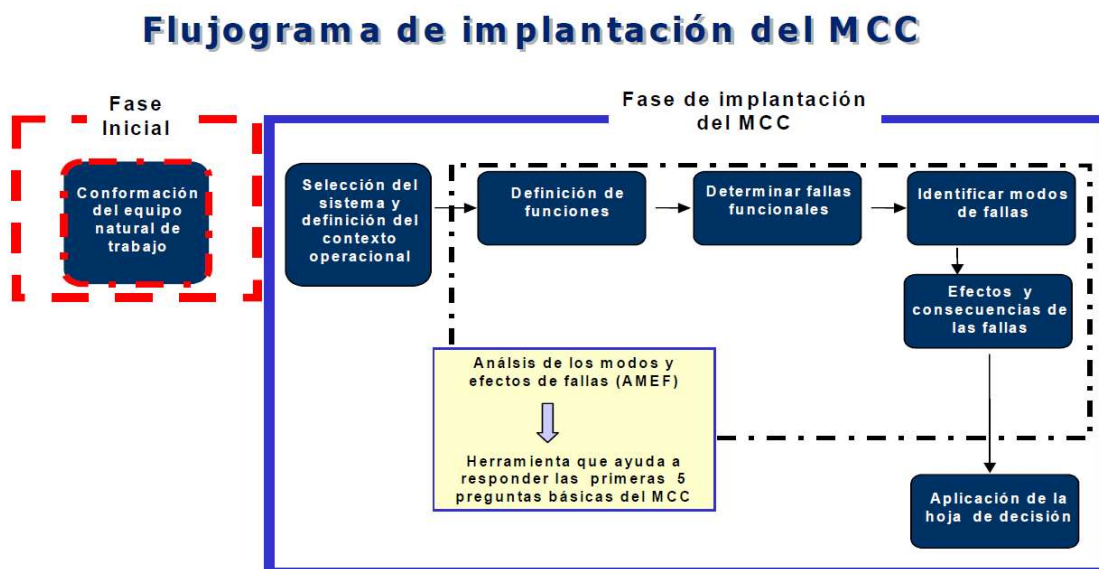


Figura 8. Flujograma de implantación del MCF

3.3.3 Método de evaluación de Criticidad basada en el concepto de Riesgo

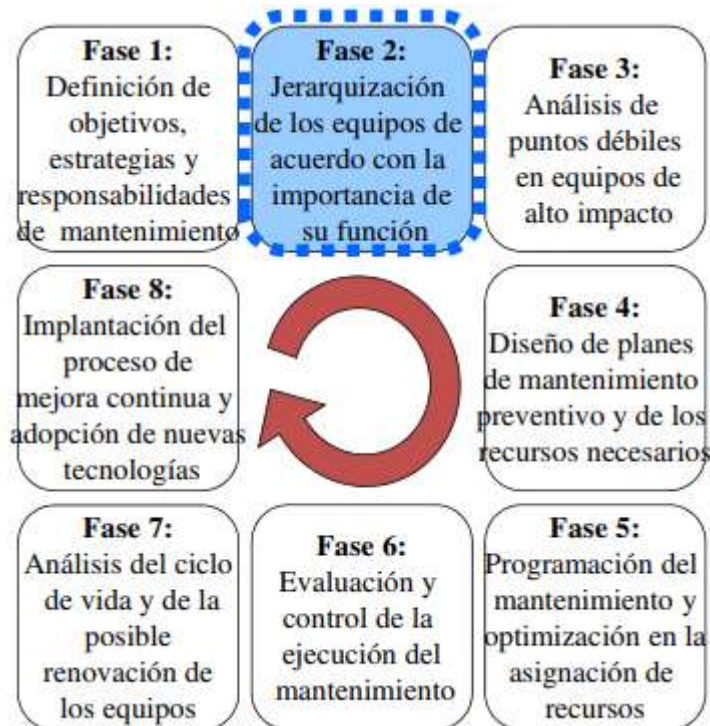


Figura 9. Fase 2 del ciclo de gestión del mantenimiento

Es una metodología que permite jerarquizar sistemas, instalaciones y equipos, en función de su impacto global, con el fin de optimizar el proceso de asignación de recursos (económicos, humanos y técnicos). El término crítico y la definición de criticidad pueden tener diferentes interpretaciones y van a depender del objetivo que se está tratando jerarquizar. Desde esta óptica existen una gran diversidad de herramientas de criticidad, según las oportunidades y las necesidades de la organización, la metodología propuesta, es una herramienta de priorización bastante sencilla que genera resultados semicuantitativos, basados en la teoría del Riesgo (Frecuencia de fallos x Consecuencias):

$$\text{Riesgo} = \text{Frecuencia} \times \text{Consecuencia}$$

$$\text{Frecuencia} = \# \text{ de fallos en un tiempo determinado}$$

$$\text{Consecuencia} = \text{Impacto Operacional} + \text{Flexibilidad} + \text{Costos Mtto.} + \text{Impacto SAH}$$

Los factores ponderados de cada uno de los criterios a ser evaluados por la expresión del riesgo se presentan a continuación:

$$\text{Criticidad Total} = \text{Frecuencia de fallos} \times \text{Consecuencia}$$

$$\text{Consecuencia} = \text{Impacto Operacional} + \text{Flexibilidad} + \text{Costos Mtto} + \text{Impacto SAH}$$

Frecuencia de Fallas:		Costo de Mito:	
Pobre mayor a 2 fallas/año	4	Mayor o igual a 3000 €	2
Promedio 1 - 2 fallas/año	3	Inferior a 3000 €	1
Buena 0.5 -1 fallas/año	2		
Excelente menos de 0.5 falla/año	1		
Impacto Operacional:		Impacto en Seguridad Ambiente Higiene (SAH):	
Pérdida de todo el despacho	10	Afecta la seguridad humana tanto externa como interna y requiere la notificación a entes externos de la organización	8
Parada del sistema o subsistema y tiene repercusión en otros sistemas.	7	Afecta el ambiente /instalaciones	7
Impacta en niveles de inventario o calidad	4	Afecta las instalaciones causando daños severos	5
No genera ningún efecto significativo sobre operaciones y producción	1	Provoca daños menores (ambiente - seguridad)	3
		No provoca ningún tipo de daños a personas, instalaciones o al ambiente	1
Flexibilidad Operacional:			
No existe opción de producción y no hay función de repuesto.	4		
Hay opción de repuesto compartido/almacen	2		
Función de repuesto disponible	1		

Tabla 4. Valores que pueden tomar los factores ponderados

Una vez evaluados cada uno de los factores presentados en la tabla anterior, se introducen en la fórmula de Criticidad Total (I) y se obtiene el valor global de la criticidad (máximo valor de criticidad que se puede obtener a partir de los factores ponderados evaluados = 112). Para obtener el nivel de criticidad de cada sistema se toman los valores totales individuales de cada uno de los factores principales: frecuencia y consecuencias y se ubican en la matriz de criticidad – valor de frecuencia en el eje Y, valor de consecuencias en el eje X.

- Área de sistemas No Críticos (NC)
- Área de sistemas de Media Criticidad (MC)
- Área de sistemas Críticos (C)

FRECUENCIA	4	MC	MC	C	C
	3	NC	MC	C	C
	2	NC	MC	MC	MC
	1	NC	NC	NC	MC
		7	14	21	28
		CONSECUENCIA			

Figura 10. Matriz General de Criticidad

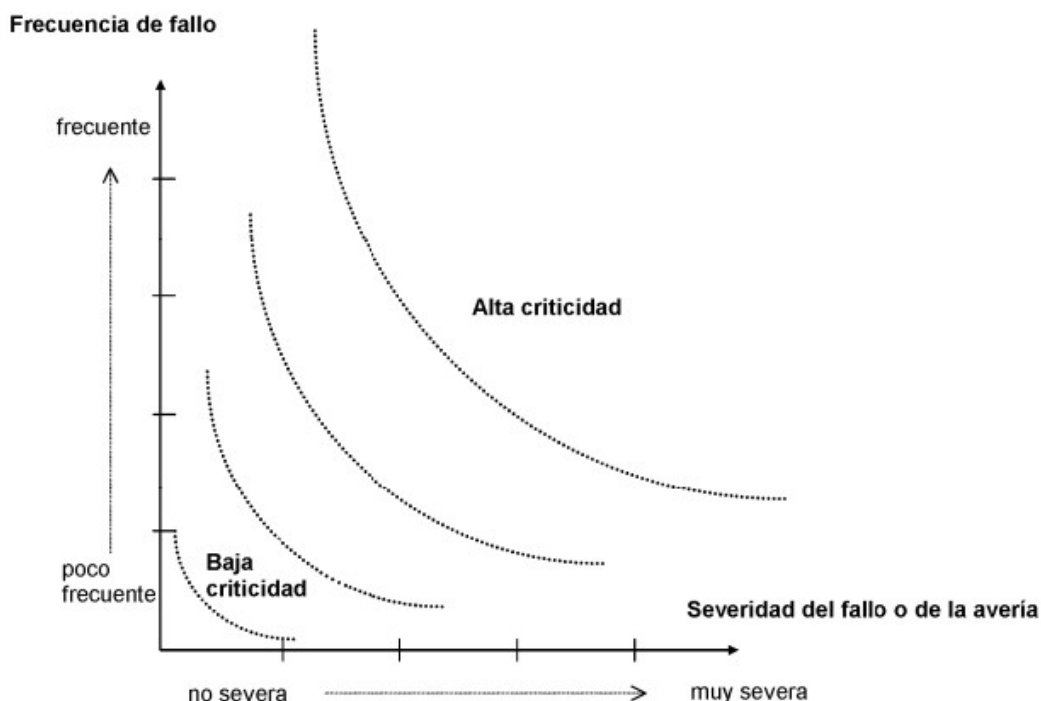


Figura 11. Curvas de Criticidad

Para obtener los valores de criticidad para jerarquizar los elementos del equipo a estudiar, lo primero que se ha realizado ha sido un estudio con los operarios responsables del sistema. Resultando de gran interés sus comentarios a algunos modos de fallo y posibles consecuencias.

Como por ejemplo, si el tornillo sinfín, cuya función es distribuir los envases llenos para una entrada ordenada y simultánea, está desgastado, los envases salen disparados a una gran velocidad. Aunque toda la máquina tiene unas protecciones de transparentes para evitar que en casos como éste, la seguridad del personal se pueda ver perjudicada.

A continuación, se presenta parte de la tabla de criticidad que se ha realizado, teniendo la tabla completa en el *Anexo Análisis de Criticidad*.

COMPONENTES	FUNCIÓN	MODOS DE FALLO
FOTOCÉLULAS ALIMENTACIÓN	Control de alimentación de botellas a etiquetadora	Catadióptrico y/o fotocélula sucia Catadióptrico y/o fotocélula desenfocada Falta de tensión a la fotocélula Pérdida intensidad de luz por vida útil

ANÁLISIS DE CRITICIDAD						
FF	IO	FO	CM	SHA	CONSECUENCIA	VALOR RIESGO
	2	1	1	0	4	NO CRÍTICO
	2	1	1	0	4	NO CRÍTICO
	4	1	1	0	6	NO CRÍTICO
	4	1	1	0	6	NO CRÍTICO

Tabla 5. Análisis de Criticidad

3.3.4 Diagrama Entrada Proceso Salida (EPS)

Es una herramienta gráfica que facilita la visualización del contexto operacional, en él se identifican: las entradas, los procesos y las salidas principales. A continuación, se presenta una tabla con el diagrama EPS del sistema a estudiar en base a la norma UNE-EN ISO 9001:2015 “Sistemas de gestión de la calidad”.

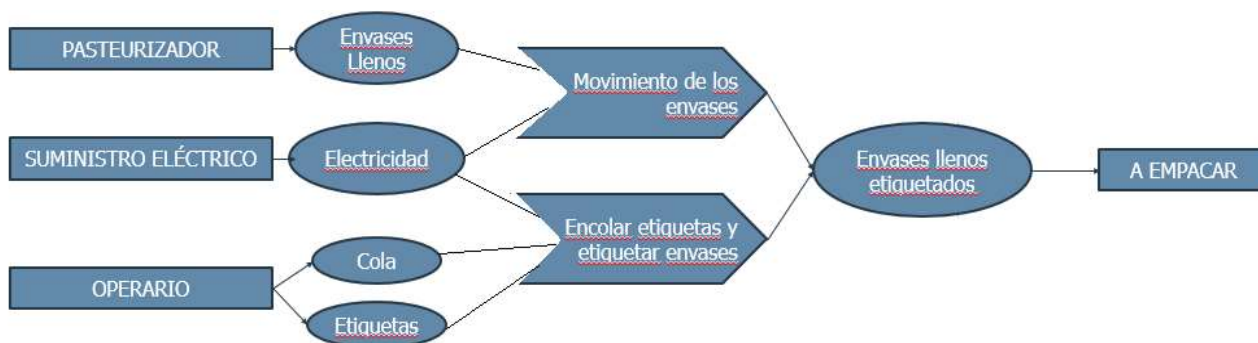


Figura 12. Diagrama EPS del sistema

Para comprender mejor este diagrama, se va a proceder a explicar el funcionamiento de dicha máquina etiquetadora de envases de vidrio.

El principal propósito de este sistema es suministrar y adherir etiquetas de papel a los envases de vidrio, tanto en el cuello como en el cuerpo. Para ello, utiliza un sistema modular para cada tipo de etiqueta (uno para las etiquetas del cuello y otro para las etiquetas del cuerpo).

A continuación, se va a presentar una tabla con los principales equipos del sistema, donde se agruparán según formen parte del sistema de entrada, carrusel central, sistema de salida o alguno de los sistemas modulares:

1 ENTRADA		2 CARRUSEL CENTRAL	3 ETIQUETADORAS	4 SALIDA
Bloqueador envases	de	Mesa portaenvases	Carro de etiquetas AMB	Rueda dentada
Tornillo sinfín		Cabezal de centrado	Conjunto encolador	
Rueda dentada		Sujeción límite de altura	Carrusel de paletas	
Placa transferencia	de	Brazo de apoyo	Cilindro de transferencia	
		Alojamiento principal		
		Ajuste vertical		
		Accionamiento principal		
		Lubricación central		

Tabla 6. Principales equipos del sistema agrupados por zonas

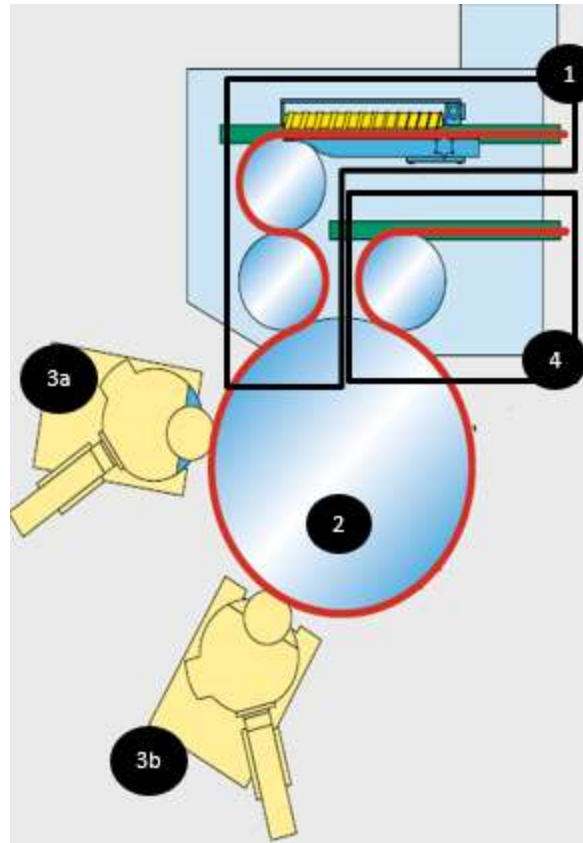


Figura 13. Principales partes del sistema

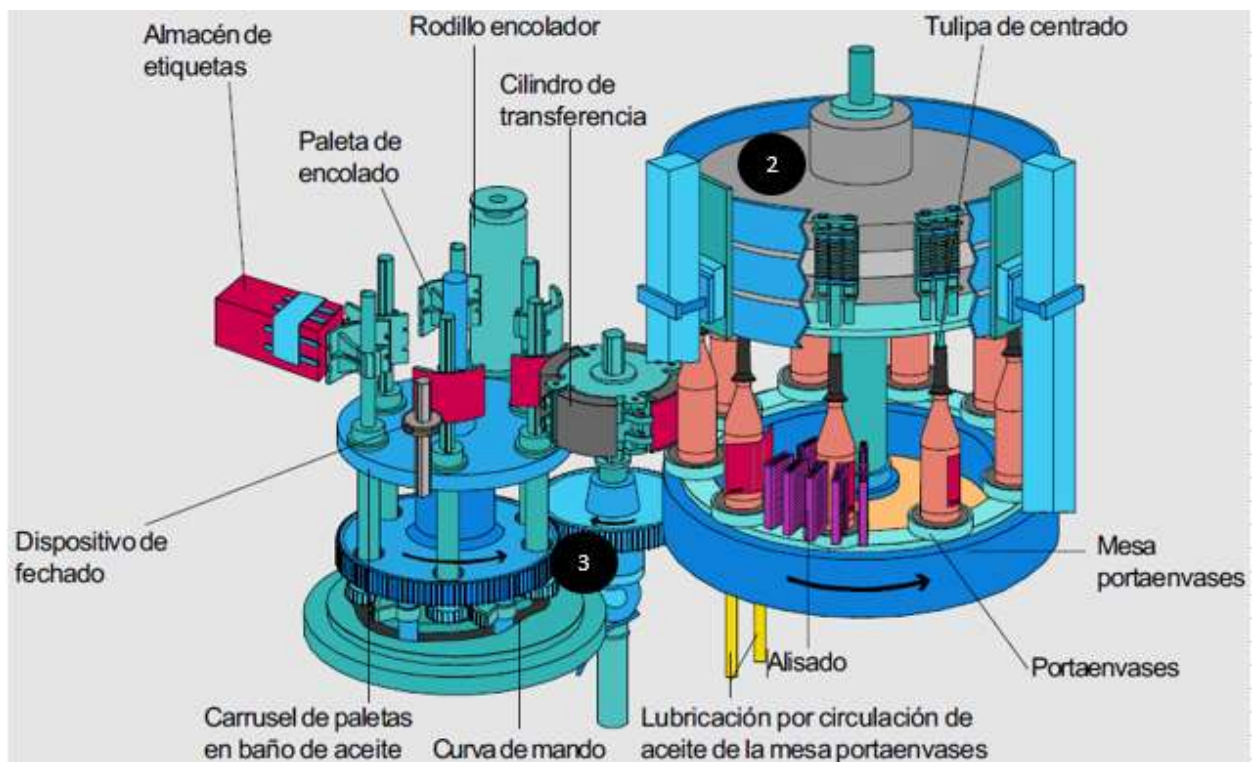


Figura 14. Carrusel de centrado (2) y Conjunto etiquetador (3)

El sistema de etiquetado recibe los envases de los transportes de entrada, y se introducen en el carrusel central a través del tornillo sinfín, estrella intermedia y estrella de entrada. El tornillo sinfín suministra los envases a la estrella intermedia al paso de la máquina. De la estrella intermedia pasan a la estrella de entrada que es la que introduce los envases en el carrusel central.

En el carrusel central los envases quedan firmemente sujetos y exactamente centrados entre los portaenvases y las tulipas centradoras. Las etiquetas son adheridas mediante el cilindro de transferencia y al final del carrusel hay unos cepillos que alisan las etiquetas de los envases. Los giros del envase necesarios para el alisado son controlados por los servomotores.

La cola, por lo general, se prepara en cubos y a partir de ellos se transporta mediante una bomba regulable de adhesivo hacia el rodillo encolador. La cantidad de cola es ajustada por una rasqueta, de forma que en el rodillo encolador se forma una capa fina de cola.

Las paletas son encoladas en su paso por el rodillo encolador, y pasa por el almacén de etiquetas para que se realice la entrega de etiquetas. La paleta encolada debe hacer un movimiento giratorio tocando toda la superficie de la primera etiqueta y no debe tocar ninguna uña de fijación.

Con la ayuda de las pinzas de transferencia se retira la etiqueta de la paleta y se retiene en la esponja hasta que se puede entregar al envase. Las pinzas de transferencia retienen la etiqueta a lo largo de todo el listón del yunque. La esponja del cilindro sale cuando el envase pasa por delante de la esponja para presionar la etiqueta contra la botella, al mismo tiempo que se abren las pinzas de transferencia.

Se van a presentar varias imágenes de un conjunto etiquetador del mismo modelo que se ha estudiado para comprender mejor su funcionamiento.

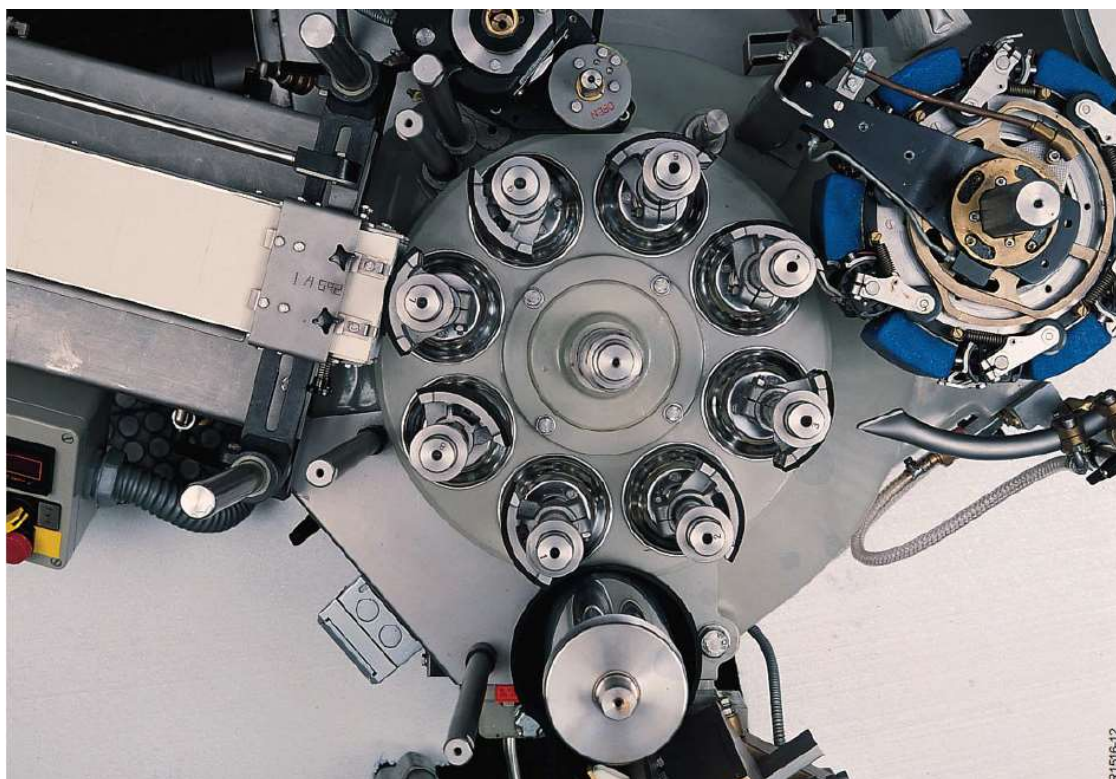


Figura 15. Vista superior del conjunto (1-almacén de etiquetas, 2-rodillo encolador, 3-cilindro de transferencia y 4-conjunto de paletas)

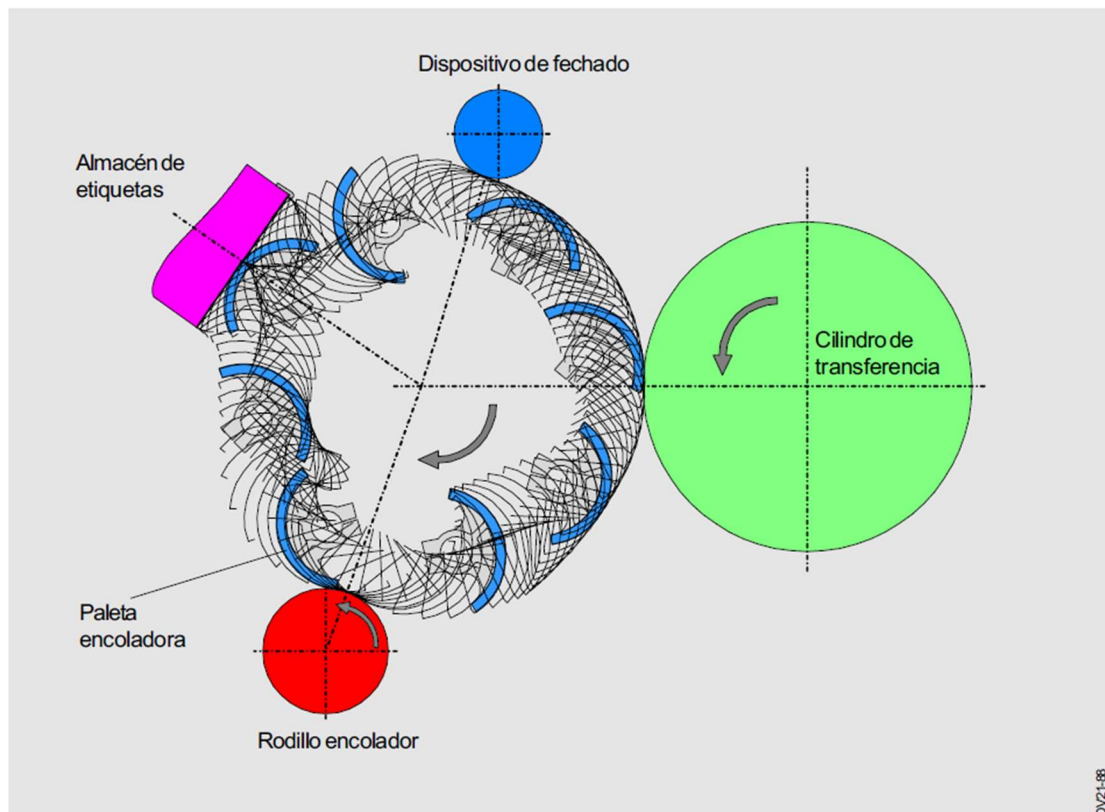


Figura 16. Movimiento que realizan cada una de las partes del conjunto y cada paleta



Figura 17. Carrusel de paletas y cilindro de transferencia

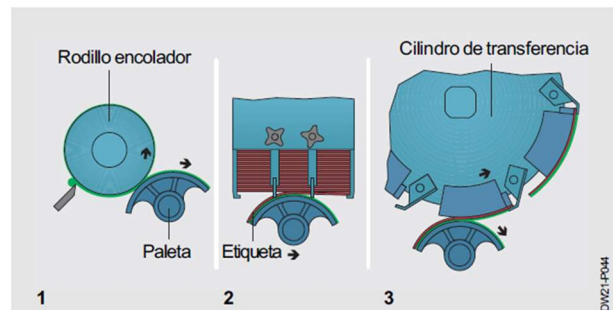


Figura 18. Secuencia que sigue una paleta encoladora

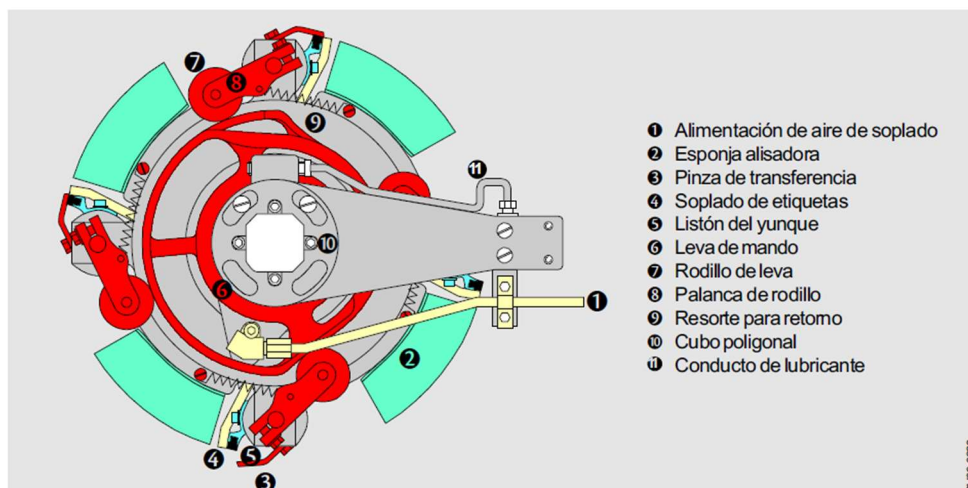


Figura 19. Partes del cilindro de transferencia

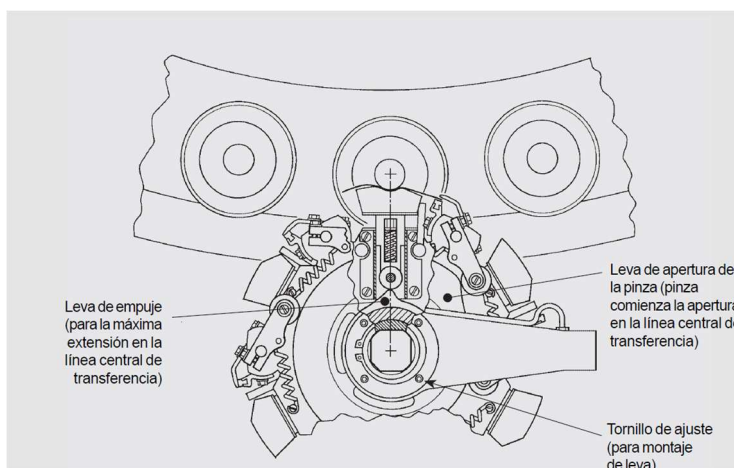


Figura 20. Movimiento de las esponjas del cilindro al paso de los envases

3.3.5 AMEF: Análisis de los modos y efectos de fallo

En este punto se desarrollan las fases 3 y 4 del ciclo visto anteriormente. Se analizarán los puntos débiles y se realizará un primer diseño de los planes de mantenimiento a través del Análisis de los Modos y Efectos de los Fallos (AMEF).

El AMEF, constituye la herramienta principal del MCF, para la optimización de la gestión del mantenimiento en una organización determinada. El AMEF es un método sistemático que permite identificar los problemas antes que estos ocurran y puedan afectar o impactar a los procesos y productos en un área determinada, bajo un contexto operacional dado. Hay que tener presente que la realización del AMEF, constituye la parte más importante del proceso de implantación del MCF, ya que a partir del análisis realizado por los grupos de trabajo MCF, a los distintos activos en su contexto operacional, se obtendrá la información necesaria para poder prevenir las consecuencias o efectos de los posibles fallos, a partir de la selección adecuada de actividades de mantenimiento, las cuales actuarán sobre cada modo de fallo y sus posibles consecuencias.

Por lo expresado anteriormente, se deduce que el objetivo básico del AMEF, es encontrar todas las formas o modos en los cuales puede fallar un activo dentro de un proceso, e identificar las posibles consecuencias o efectos de los fallos en función de tres criterios básicos para el MCF: seguridad humana, ambiente y operaciones (producción). Para poder cumplir con este objetivo, se debe realizar el AMEF siguiendo la siguiente secuencia:

- Explicar las funciones de los activos del área seleccionada y sus respectivos estándares de ejecución.
- Definir los fallos funcionales asociadas a cada función del activo.
- Definir los modos de fallo asociados a cada fallo funcional.

- Establecer los efectos o las consecuencias asociadas a cada modo de fallo.

Flujograma de implantación del AMEF

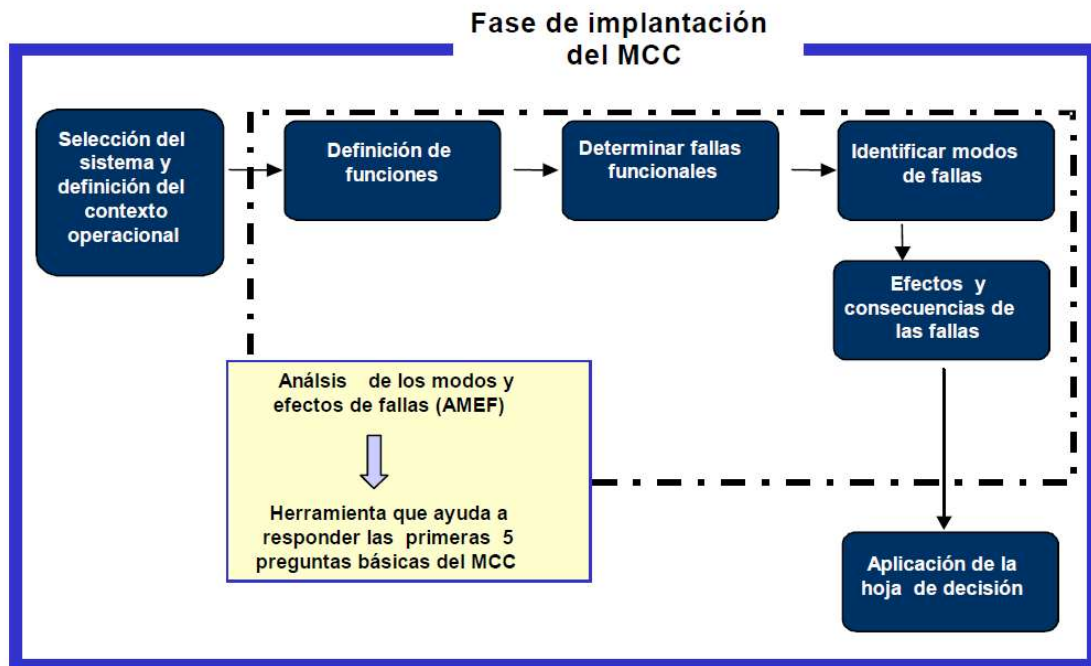


Figura 21. Flujograma para el desarrollo del AMEF

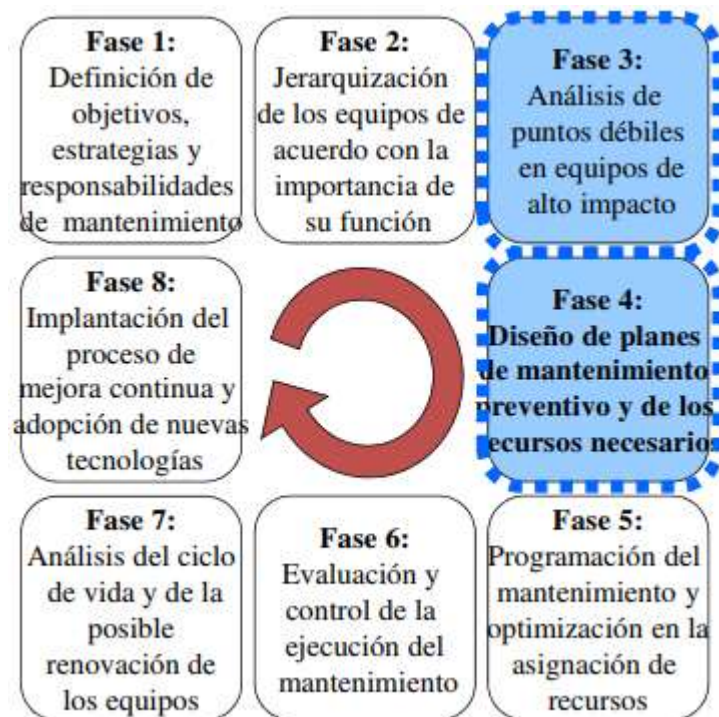


Figura 22. Fases 3 y 4 del ciclo de gestión del mantenimiento

Funciones y estándares de ejecución

En esta parte del proceso de implantación del MCC; se debe comprender que el objetivo básico del mantenimiento es preservar los activos en un estado que estos puedan cumplir con sus funciones básicas. Eso significa que los requerimientos de mantenimiento de cualquier activo podrán ser determinados si sus funciones

están claramente definidas y comprendidas. Para poder cumplir con esta fase del proceso de implantación del MCF, se deberá:

- Definir la función y diferenciar los distintos tipos de funciones según el MCF.
- Aclarar los estándares de ejecución (operacionales) de cada activo.
- Registrar los estándares de ejecución esperados asociados a cada función.

El MCF define el término función, como el propósito o la misión de un activo en un contexto operacional específico (cada activo puede tener más de una función en el contexto operacional). Para decidir cuándo un activo no está trabajando satisfactoriamente, es necesario definir qué es lo que el activo debe hacer para trabajar apropiadamente, por lo cual, uno de los aspectos importantes dentro del AMEF para el MCF, consiste en definir adecuadamente la función o las funciones asociadas a cada activo en su contexto operacional. Hay que tener presente que cada activo usualmente tiene más de una función

Estándares de ejecución

Según la filosofía del MCF, el mantenimiento debe asegurar que los activos cumplan eficientemente las funciones para las cuales fueron diseñados dentro de un contexto operacional específico, a partir de actividades de prevención (actuar antes de que ocurra el fallo). Por otra parte, cuando las actividades de mantenimiento se realizan por consecuencia de un fallo no previsto, se les denomina actividades correctivas de mantenimiento, en estos casos, los activos no podrán cumplir con sus funciones (en otras palabras, son situaciones donde los activos han fallado). Para poder identificar cuando un activo no está cumpliendo sus funciones, se debe llevar a cabo la implantación del MCF, se deberá tener claramente definido cuando un activo está cumpliendo su misión de manera eficiente.

Se define un estándar de ejecución como *“el parámetro que permite especificar, cuantificar y evaluar de forma clara la misión de un activo con respecto a la función que según la fiabilidad de diseño o la capacidad de diseño es capaz el activo de cumplir, o con respecto a la función que se espera (desea) que el activo cumpla dentro de un contexto operacional específico”*.

Definir los fallos funcionales asociadas a cada función del activo

“Fallo funcional es definido como una ocurrencia no previsible, que no permite que el activo alcance el estándar de ejecución esperado en el contexto operacional en el cual se desempeña, trayendo como consecuencia que el activo no pueda cumplir con su función o la cumpla de forma ineficiente” (Parra, 1998). Parra, Carlos, “Course of Reliability – Centered Maintenance”, Universidad de los Andes, Mérida – Venezuela, 1998, pág 45.

Para poder identificar de forma clara cuando un activo está cumpliendo su función de forma eficiente, es necesario que se defina de forma precisa el estándar de ejecución que se espera obtener del activo, dentro del contexto operacional donde el mismo se va a desempeñar.

Definir los modos de fallos asociados a cada fallo funcional

Los fallos funcionales tienen causas físicas que originan la aparición de los mismos, estas causas son denominadas modos de fallo.

Las actividades de prevención, anticipación o corrección de los fallos funcionales según el MCF deben estar orientadas a atacar modos de fallos específicos. Esta afirmación, constituye una de las mayores diferencias entre el MCF y la forma tradicional de gestionar el mantenimiento, es decir que, para el MCF, las actividades de mantenimiento generadas a partir del análisis realizado se atacarán específicamente a cada uno de los modos de fallo asociados a cada fallo funcional.

3.3.6. Proceso de selección de las actividades de mantenimiento bajo el enfoque del MCF

Una vez realizado el AMEF, se deberá seleccionar el tipo de actividad de mantenimiento que ayude a prevenir la aparición de cada modo de fallo previamente identificado, a partir del árbol lógico de decisión (herramienta diseñada por el MCF; que permite seleccionar el tipo de actividad de mantenimiento más adecuada para evitar la ocurrencia de cada modo de fallo o disminuir sus posibles efectos). Luego de seleccionar el tipo de actividad

de mantenimiento a partir del árbol lógico de decisión, se tiene que especificar la acción de mantenimiento a ejecutar asociada al tipo de actividad de mantenimiento seleccionada, con su respectiva frecuencia de ejecución, teniendo en cuenta que uno de los objetivos principales del MCF; es evitar o al menos reducir las posibles consecuencias a la seguridad humana, al ambiente y a las operaciones, que traerán consigo la aparición de los distintos modos de fallo (Figura 19).

El MCF clasifica las actividades de mantenimiento a ejecutar en dos grandes grupos, las actividades preventivas y las actividades correctivas, estas últimas, se ejecutarán solo en el caso de no encontrar una actividad efectiva de mantenimiento preventivo. Cada grupo de actividades de mantenimiento tiene sus respectivos tipos de tareas de mantenimiento, los cuales se mencionan a continuación

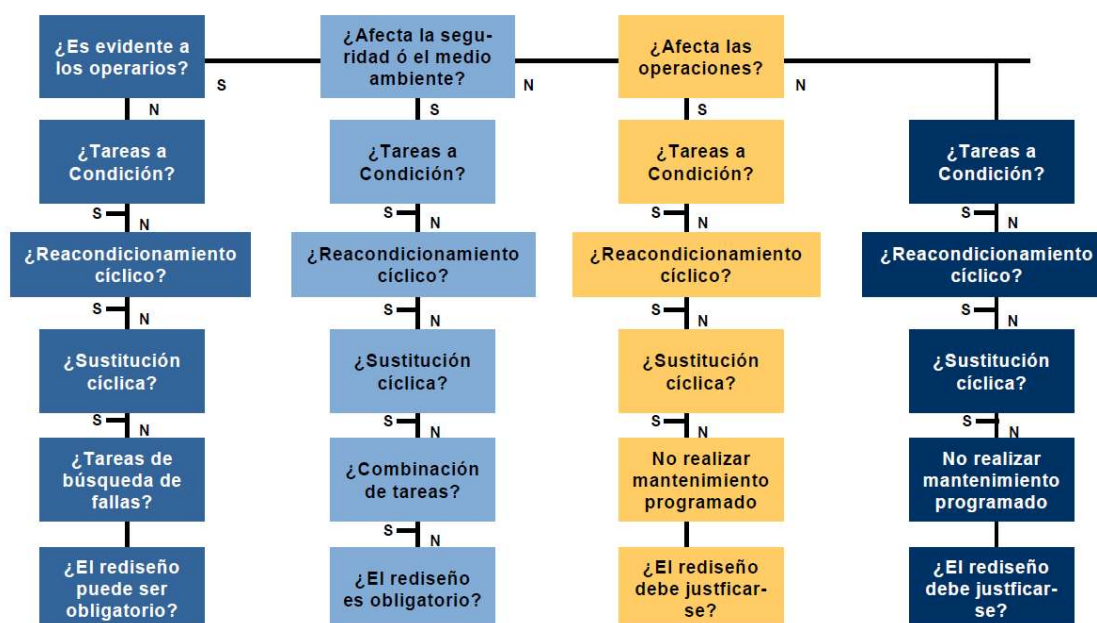


Figura 23. Flujograma de decisión de las actividades de mantenimiento

Actividades preventivas

Tareas programadas en base a condición

Las actividades programadas en base a condición (predictivas), se basan en el hecho de que la mayoría de los modos de fallo no ocurren instantáneamente, sino que se desarrollan progresivamente en un periodo de tiempo. Si la evidencia de este tipo de modos de fallo puede ser detectada bajo condiciones normales de operación, es posible que se puedan tomar acciones programadas en base a la condición del activo, que ayuden a prevenir estos modos de fallo y/o eliminar sus consecuencias.

El momento en el proceso en el cual es posible detectar que el fallo funcional está ocurriendo o está a punto de ocurrir es conocido como fallo potencial, que se define como una condición física identificable la cual indica que el fallo funcional está a punto de ocurrir o que ya está ocurriendo dentro del proceso.

El comportamiento en el tiempo de gran parte de los distintos tipos de modos de fallo se ilustra en la siguiente figura. En esta figura se muestra como un fallo comienza a ocurrir (punto de inicio “I”, muchas veces este punto no puede ser detectado), incrementando su deterioro hasta el punto en el cual el fallo puede ser detectado (punto de fallo potencial “P”). Si en este punto el fallo no es detectado y corregido, continúa aumentando su deterioro (usualmente de forma acelerada) hasta que alcanza el punto donde se produce el fallo funcional (punto “F”, el activo ha dejado de cumplir su función). 0 = condición operativa; 1 = condición no operativa.

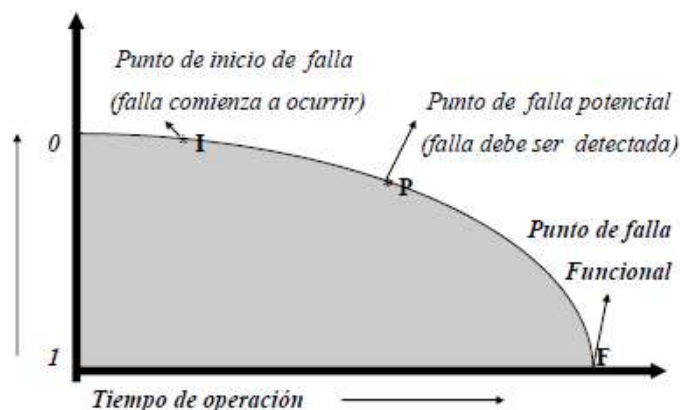


Figura 24. Curva de comportamiento de fallos potenciales

Tareas de reacondicionamiento

Como su nombre lo indica, las tareas de reacondicionamiento se refieren a las actividades periódicas que se llevan a cabo para restaurar un activo (sistema, equipo, parte) a su condición original. En otras palabras, las actividades de restauración programada son aquellas actividades de prevención realizadas a los activos (en la mayoría de los casos equipos mayores) a un intervalo frecuencial menor al límite de vida operativo del activo, en función del análisis de sus funciones en el tiempo. En este tipo de actividades de mantenimiento preventivo, los activos son puestos fuera de servicio, se desarman, se desmontan, se inspeccionan de forma general y se corrigen y se reemplazan de ser necesario, partes defectuosas, con el fin de prevenir la aparición de posibles modos de fallo. Las tareas de restauración programadas son conocidas como overhauls, y su aplicación más común es en equipos mayores.

Tareas de sustitución – reemplazo programado

Este tipo de actividad preventiva está orientada específicamente hacia el reemplazo de componentes o partes usadas de un activo, por unos nuevos, a un intervalo de tiempo menor al que su vida útil (antes de que fallen). Las actividades de descarte programado le devolverán la condición original al componente, ya que el componente viejo será reemplazado por uno nuevo. La diferencia entre las tareas de descarte programado y las tareas de restauración programada es que las primeras son aplicadas a componentes y/o partes de un activo y no a activos complejos (activos con varios componentes), y a su vez a la acción a ejecutar en las tareas de descarte programado de las tareas de restauración programada las acciones a ejecutar pueden ser: ajustar, inspeccionar, mejorar limpiar, restaurar y hasta cambiar partes viejas por nuevas.

Las tareas de Limpieza, Inspección, Lubricación y Ajuste se denominan CILT (Cleaning, Inspection, Lubrication and Tightening) en el lenguaje utilizado en la compañía, y son tareas llevadas a cabo por el personal de producción, en vista a cumplir con la filosofía de mantenimiento autónomo.

Tareas de búsqueda de fallos ocultos

Los modos de fallo ocultos no son evidentes bajo condiciones normales de operación, por lo cual este tipo de fallo no tienen consecuencias directas, pero las mismas propician la aparición de fallos múltiples en un determinado contexto operacional. Uno de los caminos que puede ayudar a minimizar los posibles efectos de un fallo múltiple es tratar de disminuir la probabilidad de ocurrencia de fallos ocultos, chequeando periódicamente si la función oculta está trabajando correctamente. Estos chequeos son conocidos como las tareas de pesquisa de fallos ocultos.

En conclusión, las tareas de pesquisa de fallos ocultos consisten en acciones de chequeo a los activos con

funciones ocultas, a intervalos regulares de tiempo, con el fin de detectar si dichas funciones ocultas se encuentran en estado normal de operación o en estado de fallo.

Actividades correctivas

Cuando las actividades de prevención para un determinado modo de fallo no son técnicamente factibles o no son efectivas, las actividades correctivas serán las que se apliquen. Las acciones correctivas para ejecutar en el caso de no conseguir ninguna actividad de prevención serán:

Rediseño

En el caso de que no se consigan actividades de prevención que ayuden a reducir los modos de fallo que afecten a la seguridad o al ambiente a un nivel aceptable, es necesario realizar un rediseño que minimice o elimine las consecuencias de los modos de fallo.

Actividades de mantenimiento no programado

En el caso de que no se consigan actividades de prevención económicamente más baratas que los posibles efectos que traerán consigo los modos de fallo con consecuencias operacionales o no operacionales, se podrá tomar la decisión de esperar que ocurra el fallo y actuar de forma correctiva.

Esta parte del estudio se ha realizado mediante grupos de trabajo con personal y responsables de mantenimiento. Lo primero que se realizó fue un desglose de la máquina a un nivel de profundidad acorde a un objetivo lógico, ya que no se considera relevante segregar los componentes del sistema al nivel más profundo (todos los tornillos o roscas entre otros). Se realiza el análisis a los elementos que se consideran mantenibles y que cuyo mantenimiento mejora los indicadores clave de rendimiento del sistema.

En vista a empezar a desarrollar el punto 4 del TPM “Gestión Autónoma” se procede a asignar las actividades de Limpieza, Inspección, Lubricación y Ajuste (denominadas CILT, siglas en inglés, por estandarización de la empresa) a labores que deben realizar los operarios de producción.

Para las periodicidades de los CILT se ha utilizado de guía las recomendaciones de los fabricantes, ya que dichas tareas vienen especificadas en los mismos y se ha considerado lo óptimo en consenso con el departamento de mantenimiento responsable de la línea en la que se encuentra el sistema.

Se presenta un ejemplo de algunos elementos que se han estudiado, adjuntando en el *Anexo AMEF* un desarrollo completo de dicha tarea.

#	Estándar de ejecución	#	Falla Funcional	#	Modo de falla	Evidente
1	Introducir los envases en el carrusel central y provocar el movimiento del mismo (50.000 envases a la hora).	A	La alimentación y el movimiento del carrusel se produce a una velocidad inferior	1A1	Catadióptrico (fotocélula alimentación) está sucia	de Sí
				1A2	Catadióptrico (fotocélula alimentación) está desenfocada	de Sí

Evidente	Descripción del evento	Actividad de mantenimiento utilizando el árbol lógico de decisión del MCC	Acción de mantenimiento a ejecutar	Frecuencia de aplicación
Sí	Se observa suciedad en la fotocélula Afecta a producción	CILT	Limpieza fotocélula	Diario
Sí	La fotocélula no está enfocando al receptor Afecta a producción	CILT	Orientación fotocélula	Diario

Tabla 7. Parte de el Análisis de Modo y Efecto de los Fallos

4 MODELOS PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL MANTENIMIENTO

En este capítulo se presenta la fase 6 del ciclo en el que se programa el mantenimiento de algunos activos y la optimización en la asignación de recursos.

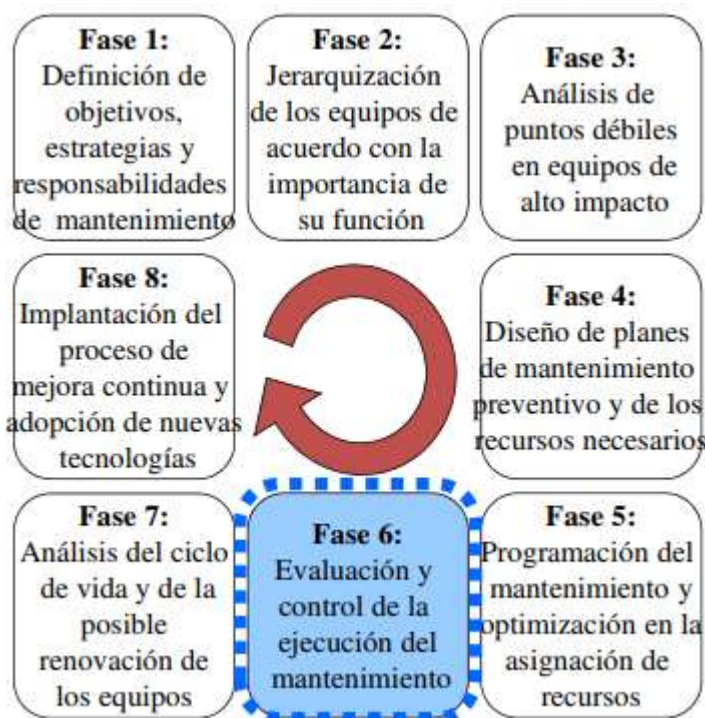


Figura 25. Fase 5

El problema del modelado del mantenimiento de un sistema ha sido tradicionalmente abordado bajo dos principales perspectivas (Gertsbakh, 1977):

- *A priori*: determinación de medidas técnicas y organizativas, a llevar a cabo durante la fase de diseño, desarrollo, construcción, montaje y puesta en servicio, para que un sistema cumpla su objetivo una vez se ponga en funcionamiento.
- *A posteriori*: una vez que el sistema está completamente terminado y en un determinado entorno de uso (o almacenamiento), la determinación de la política de mantenimiento a aplicarle. Es decir, el análisis de alternativas con objeto de decidir el momento y el tipo de mantenimiento a efectuar sobre el sistema, con objeto de asegurar un determinado nivel en sus condiciones de operación, en un entorno particular.

El primer enfoque (*a priori*) es en el que más ha contribuido la teoría de la fiabilidad, ayudando a la resolución de problemas relacionados con el diseño, asegurando el cumplimiento de unos requerimientos de fiabilidad y de mantenibilidad, definiendo las tolerancias en especificaciones de un elemento y las exigencias mínimas en sus condiciones de operación, o el análisis de fiabilidad de un sistema bajo diferentes escenarios, etc.

El segundo enfoque (*a posteriori*) se centra en los problemas relacionados con el diseño de programas de inspección y monitorización, la rigurosa determinación de punto críticos del sistema, el diseño y la optimización de los procedimientos de aprovisionamiento de repuestos, la evaluación de inversiones en herramientas y útiles

para el mantenimiento, etc.

Este capítulo se centra en el segundo enfoque, en aquellos factores clave a considerar cuando se modela el problema de mantenimiento de equipos desde la perspectiva de su fase operativa. Con tal fin, se introducen dos factores clave a tener en cuenta:

- El criterio de optimalidad elegido para la valoración de las políticas de mantenimiento.
- El horizonte temporal de estudio.

Además de estos factores, se deben tener en cuenta, por lo general, en la mayoría de los sistemas industriales, criterios que reflejen aspectos económicos de la gestión. Así, es común cuantificar características que puedan evaluar el rendimiento del sistema. Incluso, en algunas ocasiones, la eficacia del sistema es proporcional a la cantidad de tiempo sin fallos, en este caso se tendrá en cuenta la ratio de **disponibilidad (D)**.

Ambos factores se combinan junto a los dos anteriores enfoques para definir que política de mantenimiento conviene más.

Si aumenta el tiempo de análisis, es común considerar como criterios de optimalidad los valores medios por periodo de tiempo de los costes de mantenimiento. Esto es factible en aquellos casos en los que se supone que la estimación de estos costes es proporcional al tiempo. Esto viene a referirse a la existencia de un estado estacionario o régimen permanente de las condiciones de las instalaciones. El modelado matemático de este estado estacionario, para un particular modo de fallo, ofrecerá la posibilidad de evaluar el coste total de la actual política de mantenimiento implantada. Se podrá calcular evaluando el número medio de intervenciones de mantenimiento correctivo, así como de aquellas programadas de mantenimiento preventivo, que fuesen realizadas, durante un periodo de tiempo de duración determinada y para un modo de fallo dado.

Cuando el horizonte temporal al que se va a realizar el análisis es finito, el problema debe ser abordado de una manera distinta. La anterior descripción correspondiente al estado estacionario, para una particular política de mantenimiento y su evaluación económica, ya no es admisible. La modelación de la evaluación de un sistema durante un número finito de periodos de tiempo requiere un procedimiento mucho más preciso.

Para estos casos, la clave está en analizar el comportamiento del sistema conforme avanza el tiempo, para una causa de fallo particular y a partir de unas características estocásticas conocidas. Cuanto más preciso sea el modelo, mejor será el análisis de las políticas de mantenimiento y se reducirá el número de suposiciones establecidas en la construcción del modelo.

4.1 Clasificación de los modelos de optimización

Con la modernización de los sistemas, los modelos de mantenimiento preventivo se han vuelto más complejos. En este trabajo, se destacan las siguientes revisiones bibliográficas: Pierskalla y Voelker, 1976; Osaki y Nakagawa, 1976; Sherif y Smith, 1981; Valdez-Flores y Feldman 1989; y la de Cho y Parlar, 1991. Cada una realiza un modelo de optimización en función a diversos criterios.

El criterio que se sigue en este trabajo es el de clasificar los modelos en base a los problemas de mantenimiento típicos que se resuelven. De este modo se facilita la tarea de reconocer el modelo que mejor se adapta a un problema real particular de acuerdo con la disponibilidad y fiabilidad de los datos obtenidos del sistema en consideración o de sus componentes. En las siguientes secciones se detallan los modelos básicos, a partir de los cuales se ven desarrollados diferentes formatos para modelos, dentro de tres grandes grupos:

- Modelos de sustitución (total, parcial, con preventivo imperfecto, y basado en la condición).
- Modelos de impacto o de acumulación de deterioro.
- Modelos de inspección.

4.4.1 Modelos de sustitución total

Los modelos de sustitución total son aplicados a sistemas completos donde la sustitución se realiza bien tras producirse un fallo (sustitución correctiva, SC) o bien después de funcionar durante un periodo de tiempo determinado (sustitución preventiva, SP). Los modelos de sustitución preventiva siguen dos políticas básicas (Barlow y Hunter, 1960):

- Sustitución a intervalos constantes.
- Sustitución basada en la edad.

Tanto la sustitución preventiva como la correctiva, consisten en la sustitución del sistema completo. Estos modelos de sustitución parte de las siguientes hipótesis, que el fallo se detecta en el momento de producirse, y que la sustitución se realiza instantáneamente.

4.4.1.1 Política de sustitución a intervalos constantes

En este caso, la sustitución de un activo tiene lugar o bien cuando se produce el fallo (SC) o al cumplirse un intervalo de tiempo de longitud constante (SP). En estos modelos, el problema a resolver es determinar el intervalo de tiempo óptimo entre sustituciones preventivas, de manera que el coste total esperado por unidad de tiempo sea mínimo.

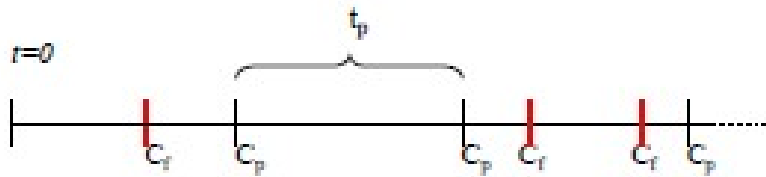


Figura 26. Evolución del sistema con SP a intervalos constantes

Donde:

- C_p : coste de la SP
- C_c : coste de la SC
- T_p : tiempo al que realizar la SP
- $F(t)$: función de distribución de la probabilidad de tiempo hasta el fallo
- $f(t)$: función de densidad de la probabilidad de tiempo hasta el fallo
- $N(t_p)$: número de fallos esperados en el intervalo $(0, t_p)$
- $CTE(t_p)$: coste total esperado por unidad de tiempo.

Si se produce el fallo en algún punto del intervalo $(0, t_p)$, el coste total esperado por unidad de tiempo $CTE(t_p)$, para el intervalo t_p , será entonces:

$$CTE(t_p) = \frac{\text{Coste total esperado en } (0, t_p)}{\text{Longitud del intervalo } (0, t_p)} = \frac{C_p + C_c N(t_p)}{t_p}$$

Se puede dar el caso que haya sustituciones correctivas a intervalos de tiempo inferiores a t_p , al producirse fallos intermedios, que podría dar lugar a un consumo de recursos excesivo.

4.4.1.2 Política de sustitución basada en la edad

Esta política la SP tiene lugar cuando el equipo alcanza una determinada edad, t_p . Si el sistema falla, se realiza una SC y la próxima SP se ubica a t_p unidades de tiempo posterior. El principal problema es calcular el t_p que minimice el CTE(t_p).

$$M(t_p) = \int_0^{t_p} \frac{tf(t)dt}{F(t_p)}$$

$$CTE(t_p) = \frac{C_p R(t_p) + C_c F(t_p)}{t_p R(t_p) + M(t_p) F(t_p)}$$

Para obtener el CTE (t_p) óptimo se minimizará esta expresión respecto al tiempo t_p .

4.4.2 Modelos de sustitución parcial

Los modelos de esta sección son una extensión de los ya presentados anteriormente, cuya formulación (Nguyen y Murthy, 1981) tiene como objetivo explicar que la mayoría de las ocasiones que se produce un fallo en un sistema no es necesario una sustitución completa del mismo, si no que con una sustitución preventiva parcial de alguno de sus componentes es necesario para que vuelva a condiciones adecuadas de funcionamiento.

Las intervenciones SPPs se realizan cuando el sistema llega a una determinada edad (T_i) y que devuelven la tasa de fallos del sistema completo a su valor inicial. Para realizar estas intervenciones, hay que tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- A partir de un cierto número de sustituciones preventivas parciales, éstas resultarán más costosas que realizar una sustitución total del sistema.
- El coste de reparación de un sistema que ha fallado es a menudo más alto que la sustitución preventiva antes del fallo.

Estos modelos, al igual que los de sustitución total, se pueden clasificar en dos grupos:

- Modelos con sustituciones preventivas parciales y reparaciones mínimas.
- Modelos con sustituciones preventivas parciales e intervenciones correctivas.

4.4.2.1 Modelos con sustituciones preventivas parciales y reparaciones mínimas

En este modelo debemos tener en cuenta que el reemplazo o la sustitución total del sistema (ST) se realiza después de $(k-1)$ sustituciones preventivas parciales SPP. Para un sistema sujeto a $(i-1)$ SPP con $(i < k)$, se procederá a la SPP cuando se alcance la edad T_i , desde la última SPP (o sustitución total en el caso $i=1$). En caso de fallo se realiza una reparación mínima, reparación que es más económica pero que no afecta a la tasa de fallo del sistema, es decir, no restaura a su valor original (esto si sucede para SPP y ST).

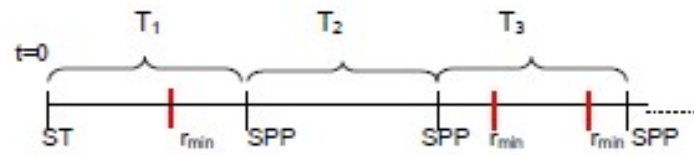


Figura 27. Evolución del sistema con reparaciones mínimas

El problema a resolver en este modelo consiste en encontrar el número óptimo de intervenciones parciales k y las edades de estas intervenciones T_i , con $i=1, \dots, k$, que minimiza el coste total esperado.

4.4.2.2 Modelos con sustituciones preventivas parciales e intervenciones correctivas

La principal consideración de este modelo es que la sustitución parcial del sistema se realiza después de $(k-1)$ sustituciones preventivas parciales (SPP). Para un sistema sujeto a $(i-1)$ SPP, con $i < k$, se procederá a la intervención correctiva cuando llegue el próximo fallo, o se hará la SPP si el sistema alcanza la edad T_i (que ahora es el tiempo desde la última intervención que restauró la tasa de fallos del equipo) lo que ocurra primero.



Figura 28. Evolución del sistema con sustituciones preventivas parciales e intervenciones correctivas

El problema a resolver en este modelo consiste en determinar el número óptimo de intervenciones parciales k y las edades de estas intervenciones que minimizan el coste total esperado.

4.4.3 Modelos de sustitución con mantenimiento preventivo imperfecto

En los modelos anteriores es asumido que el sistema se queda con las mismas características que cuando es nuevo después de realizarse una actividad de mantenimiento preventivo. Sin embargo, existen casos en los que no se cumple dicha condición, y el patrón de fallos se ve afectado, y por tanto, cambia tras un mantenimiento preventivo (MP).

Para modelar el sistema, se debe asumir que después del MP la tasa del sistema no es ni “tan bueno como nuevo” ni “tan malo como viejo”. Este concepto es denominado mantenimiento preventivo imperfecto (MPI).

En este modelo, los MPIs se realizan a intervalos fijos h_k ($k=1, 2, \dots, N-1$) y el sistema es sustituido en el MP número N . Si el sistema falla entre los MPIs, se realiza una reparación mínima. Al tratarse de MPI, la edad después del k -ésimo MPI se reduce a bkt , cuando t era antes si el MP no fuera imperfecto.

En el modelo se dan las siguientes suposiciones:

- Sobre el sistema se realizan intervenciones de MPI en los tiempos $h_1, h_1 + h_2, \dots$, donde h_i es la longitud del i -ésimo intervalo ($i = 1, 2, \dots, N-1$) y la sustitución total (ST) del sistema se realiza en el N -ésimo intervalo.
- Los fallos del sistema entre intervenciones de MPI son resueltas mediante reparaciones mínimas. La edad del sistema después del k -ésimo MPI son resueltas mediante reparaciones mínimas. La edad del

sistema después del k -ésimo MPI se sitúa en $b_k t$, siendo $0 = b_0 < b_1 < b_2 < \dots < b_{N-1} < 1$, consiguiendo el sistema un rejuvenecimiento de $t(1-b_k)$ unidades de tiempo después del k -ésimo MPI. La reducción tras la sustitución es de t unidades.

- Tras la ST el sistema llega a ser tan bueno como nuevo.
- La tasa de fallo del sistema $\lambda(t)$ es continua y estrictamente creciente.
- Los tiempos de utilizados para los MPI, reparación mínima o sustitución son despreciables.
- El ciclo comienza con un sistema nuevo y termina después de N intervalos con la sustitución.

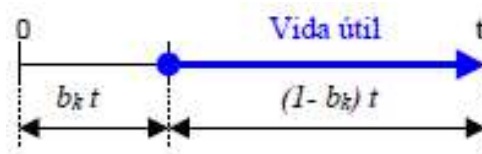


Figura 29. El sistema con mantenimiento imperfecto

El problema por resolver consiste en encontrar los tamaños de los intervalos entre MPIs (h_k), y el número de MPIs ($N-1$) antes de la sustitución de manera que minimice el coste total esperado por unidad de tiempo.

4.4.4 Modelos de sustitución basados en la condición

Si se implanta una política de mantenimiento preventivo basado en la condición del equipo se deberán tomar las siguientes decisiones:

- Seleccionar los parámetros a monitorizar.
- Determinar la frecuencia de inspección.
- Establecer los límites que al ser alcanzados determinen la realización de la intervención de mantenimiento correspondiente.

Debido al auge de las tecnologías para la monitorización de los equipos en la última década, se han desarrollado distintos modelos matemáticos de optimización que tienen en cuenta esa circunstancia (Chilcot y Christer, 1991; Christer y Wang, 1992; o Barbera et al, 1996). En general, en estos modelos la tasa de fallo no sólo depende de la edad del sistema, sino que está afectada por otros factores cuya información se obtiene mediante técnicas de monitorización de la condición (análisis de vibraciones, análisis de aceite, termografía, etc.).

El procedimiento matemático para modelar esta circunstancia consiste por lo general en la modificación de la tasa de fallos $\lambda(t)$ multiplicándola por la función $g(z(t))$, donde $z(t)$ es la variable convariante.

4.4.5 Modelos de acumulación del deterioro o de impacto

Los modelos de impacto son modelos de sustitución donde se produce una acumulación del deterioro a causa de los llamados “impactos”. El deterioro del sistema se acumula hasta su sustitución por un sistema nuevo, con idénticas propiedades estocásticas, y cuyo comportamiento en cuanto a deterioro se repite de nuevo. Por lo general, los modelos de impacto tienen en cuenta las siguientes características:

- El sistema está sujeto a unos impactos que ocurren de manera aleatoria.
- Cada impacto causa una cantidad aleatoria de daño.

- El daño se acumula aditivamente hasta la sustitución o fallo del sistema.
- El tiempo entre impactos y el daño causado por el impacto son variables aleatorias cuyas funciones de distribución $FX(t)$ y $GX(t)$, respectivamente, dependen del daño acumulado en el tiempo t , $X(t)$.
- Tras el fallo, el sistema es reemplazado por un sistema idéntico y nuevo, con un coste $c(\Delta)$, donde Δ implica el estado de fallo.
- Además, el sistema puede ser reemplazado antes del fallo, con un coste $c(X) \leq c(\Delta)$, si el nivel de daño en el tiempo de sustitución es X .
- La función de coste de sustitución $c(X)$ se supone una función no decreciente del daño acumulado.
- Las sustituciones se supone que son realizadas en un tiempo despreciable.
- Si el daño acumulado en el tiempo t es X , y un impacto de magnitud Y ocurre en el tiempo t , la probabilidad de fallo es una función de $(X+Y)$.

Desde el momento en que los sistemas dañados son sustituidos por nuevos sistemas con idénticas propiedades estocásticas, el comportamiento en cuanto a deterioro se repite en ciclos.

En muchos modelos de impacto se dan condiciones por las cuales la política óptima puede ser tratada como una política con límite de control. Es decir, una regla en la que las sustituciones ocurren cuando el daño acumulado excede de un nivel crítico α , o se produce un fallo, cualquiera que ocurra primero.

4.4.6 Modelos de inspección

El problema de la inspección en el mantenimiento se enfoca hacia la determinación de la programación óptima de las inspecciones, o chequeos que valoran el estado del sistema. Lo que supone determinar cuando se producirá la próxima inspección, y acción de mantenimiento a realizar (mantenimiento correctivo o sustitución). Según que modelo se combinan inspección y sustitución, tratando de minimizar el coste esperado por unidad de tiempo.

El modelo básico presentado por Barlow et al. (1963) es un modelo de inspección pura por edad, donde no existe mantenimiento preventivo y el sistema es reemplazado sólo cuando falla. En general, el modelado del problema de inspección supone las siguiente hipótesis:

- El fallo del sistema es conocido sólo tras una inspección.
- Las inspecciones no degradan el sistema.
- El sistema no puede fallar durante la inspección.
- Cada inspección tiene un coste C_i .
- El coste asociado a un fallo no detectado, y por unidad de tiempo, es C_f .
- El coste de sustitución es C_s .

La política de inspección consiste en realizar una inspección en los momentos $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, hasta que se detecta un fallo, en tal caso el sistema es reemplazado por otro (o mantenido) restaurándose las condiciones iniciales respecto a la tasa de fallo, comenzando entonces otro ciclo.

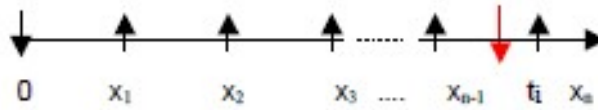


Figura 29. El sistema sujeto a inspecciones

5 RESULTADOS

En función del AMEF y del análisis de criticidad del sistema, que son presentados en los anexos 1 y 2, se pueden definir una serie de medidas para ejecutar un plan de mantenimiento del sistema.

En primer, según la criticidad, el modo de fallo y la tasa de fallo se presentan a continuación los repuestos más importantes a tener en cuenta:

#	Estándar de ejecución		Modo de fallo	# óptimo de repuestos / utilizando APT Spares
2	Los envases deben salir correctamente etiquetados de la máquina	2A6	La tulipa que sujeta los envases está rota	60 tulipas tiene la máquina
		2A8	Servomotor roto no se acciona porque está roto	60 servomotores tiene la máquina
		2A12	Los cepillos que alisan las etiquetas están desgastados o rotos	4 juegos de cepillos tiene la máquina
3	Adherir las etiquetas a los envases	3A1	Una o varias paletas de la estación de transferencia están dañadas, desgastadas o rotas	Juego de 8 paletas por cada agregat 2 Agregats
		3A2	El desarrollo del movimiento del eje de las paletas encoladoras no es el correcto	Juego de 8 paletas por cada agregat 2 Agregats
		3A7	La rasqueta de cola está desgastada o rota	1 Rasqueta por cada estación de etiquetado (2)
		3A8	El raspador de cola de la parte superior está roto	1 Raspador sup por cada estación de etiquetado (2)
		3A9	El raspador de cola de la parte inferior está roto	1 Raspador inf por cada estación de etiquetado (2)
		3B2	La esponja del cilindro de transferencia está rota	8 Esponjas por cada cilindro 2 Cilindros de transferencia
		3B6	Las pinzas de transferencia están deterioradas o rotas	16 pinzas por cada cilindro 2 Cilindros de transferencia
5	Evacuar los envases desde el carrusel central a la salida de la máquina	5A18	La zapata de freno de la estrella de salida está desgastada	60 zapatas de freno

Tabla 8. Repuestos más importantes del sistema

Las actividades denominadas como CILT (*Cleaning, Inspection, Lubrication and Tighten*) son actividades de limpieza, inspección, lubricación y ajuste que serán llevadas a cabo por el personal de producción como medida para implantar el paso 4 de la filosofía de trabajo TPM (*Total Productive Maintenance*). Dicho paso consisten en el Mantenimiento Autónomo de los equipos.

Los CILT de limpieza e inspección se realizarán, o bien, diariamente, o bien, semanalmente en función del tipo de modo de fallo que sea. Se puede consultar todas las actividades del plan de mantenimiento en el anexo 3.

La periodicidad de las actividades de lubricación viene marcada por la recomendación del fabricante, es decir, el propio fabricante informa de la periodicidad con la que se debe lubricar un equipo. Por tanto, en este caso las actividades se realizarán según el fabricante.

Los ajustes serán llevados a cabo en función de las actividades de inspección, éstas últimas también comprueban las holguras de algunos equipos y, por tanto, pueden dar lugar a actividades de ajuste.

Para determinar la periodicidad con la que cambiar algunos repuestos y la política que se va a seguir en el tipo de sustitución, se han considerado los modelos de sustitución total. Tanto el de sustitución a intervalos constantes como el de sustitución basada en la edad.

Los repuestos que se van a estudiar son de los que se tiene un histórico de fallos suficiente para poder realizar dicho estudio, que son, los servomotores, las zapatas de freno y las esponjas del cilindro de transferencia. A continuación, se van a presentar los valores del estudio tanto en tablas como gráficamente. Se han utilizado las fórmulas y nomenclatura utilizadas en el punto 4.1.1.

Servomotores

Cuyo coste de sustitución preventiva se estima en 2.000€

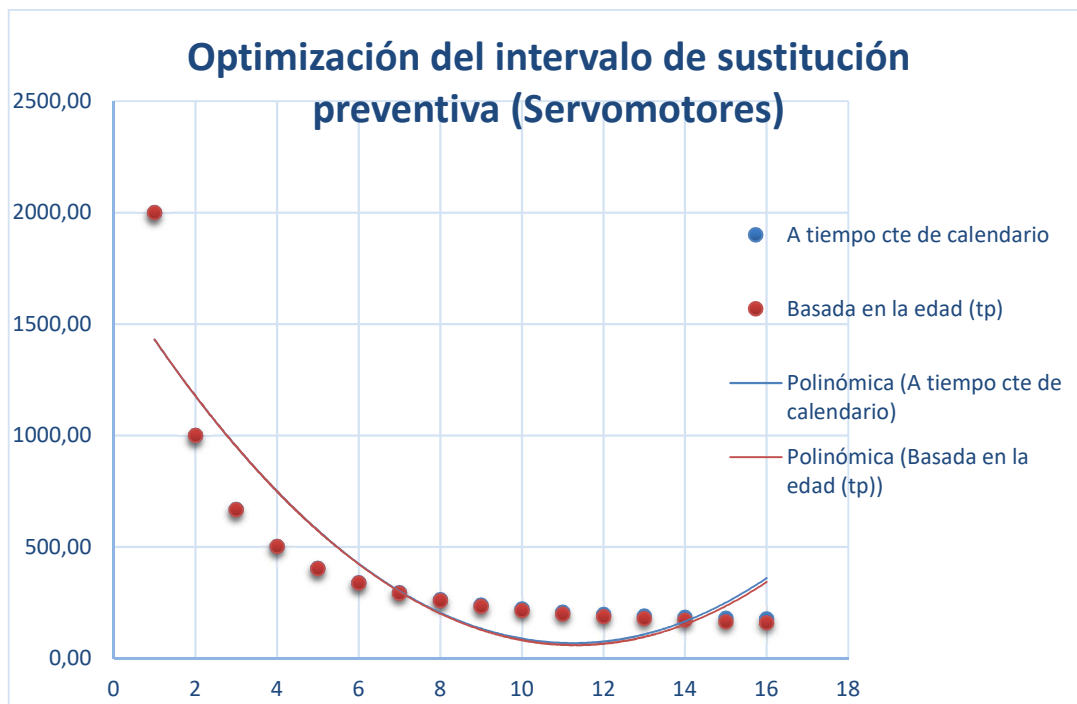
Mientras que el coste de sustitución correctiva se ha estimado en 5.000€

tp	F(t)	R(t)	$\lambda(t)$	N(t)	CTE(t)
1	0,00	0,99999287	0,00	7,1264E-06	2000,04
2	0,00	0,99988431	0,00	0,00011569	1000,29
3	0,00	0,99943553	0,00	0,00056452	667,61
4	0,00	0,99831576	0,00	0,00168492	502,11
5	0,00	0,99616091	0,00	0,00384341	403,84
6	0,01	0,99261793	0,00	0,00740004	339,50
7	0,01262478	0,98737522	0,01	0,01268174	294,77
8	0,01981894	0,98018106	0,01	0,01996789	262,48
9	0,02914716	0,97085284	0,01	0,02948472	238,60
10	0,04072061	0,95927939	0,01	0,04140563	220,70
11	0,05458162	0,94541838	0,01	0,05585503	207,21
12	0,07070952	0,92929048	0,02	0,07291404	197,05
13	0,08902846	0,91097154	0,02	0,09262687	189,47
14	0,10941626	0,89058374	0,02	0,11500714	183,93
15	0,13171349	0,86828651	0,03	0,14004379	180,01
16	0,15573243	0,84426757	0,03	0,16770626	177,41

Tabla 9. Datos de los servomotores en el modelo de sustitución total a tiempo constante

tp	F(t)	R(t)	$\lambda(t)$	M(t)	CTE(t)	f(t)
1	0,00	0,99999287	0,00	1,00	2000,02	7,1264E-06
2	0,00	0,99988431	0,00	1,94	1000,18	0,00010856
3	0,00	0,99943553	0,00	2,78	667,26	0,00044879
4	0,00	0,99831576	0,00	3,59	501,35	0,00111977
5	0,00	0,99616091	0,00	4,38	402,49	0,00215485
6	0,01	0,99261793	0,00	5,16	337,37	0,00354297
7	0,01262478	0,98737522	0,01	5,92	291,69	0,00524271
8	0,01981894	0,98018106	0,01	6,68	258,28	0,00719416
9	0,02914716	0,97085284	0,01	7,42	233,13	0,00932822
10	0,04072061	0,95927939	0,01	8,15	213,82	0,01157345
11	0,05458162	0,94541838	0,01	8,88	198,80	0,01386101
12	0,07070952	0,92929048	0,02	9,59	187,00	0,0161279
13	0,08902846	0,91097154	0,02	10,29	177,69	0,01831894
14	0,10941626	0,89058374	0,02	10,98	170,32	0,0203878
15	0,13171349	0,86828651	0,03	11,66	164,50	0,02229724
16	0,15573243	0,84426757	0,03	12,33	159,91	0,02401894

Tabla 10. Datos de los servomotores en el modelo de sustitución total basada en la edad



Gráfica 1. Comparación de políticas de sustitución para los servomotores

Con estos resultados, se podría definir cualquiera de las dos políticas viendo la similitud de los resultados. Aunque el problema de los servomotores es que los de última generación se consideran dispositivos con una vida útil infinita. Por tanto, consultando a técnicos y a otras compañías con maquinaria similar, nos recomiendan que una vez al año cambiemos las juntas de los servomotores, ya que el principal motivo de fallo son factores externos como la humedad y que se mojen.

Zapatas de freno

Coste de sustitución preventiva, 600€

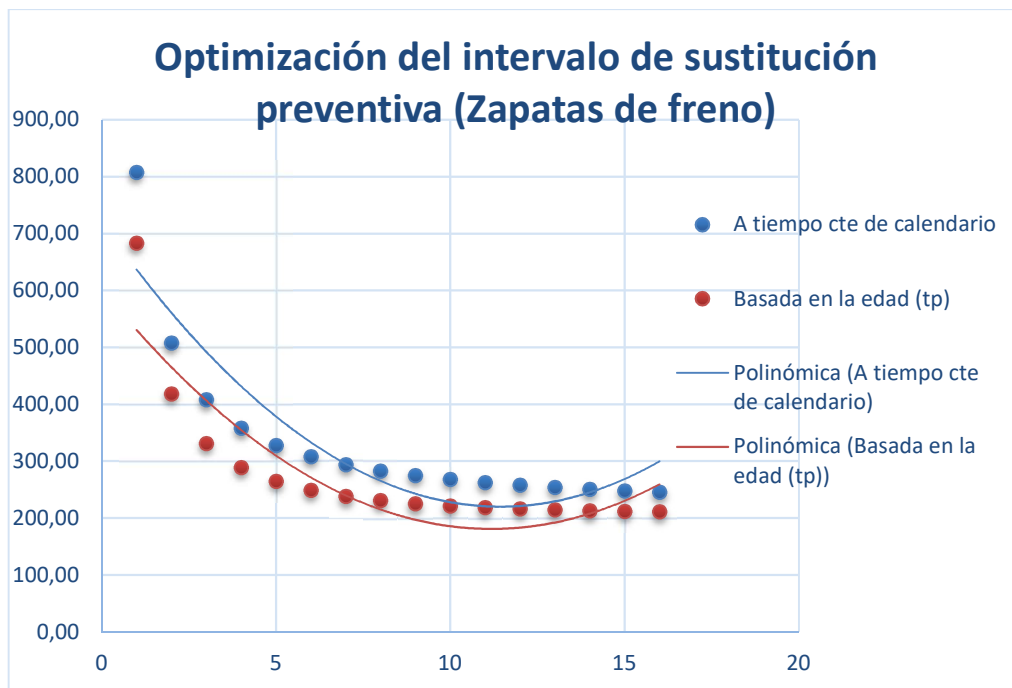
Coste de sustitución correctiva, 1.000€

tp	F(t)	R(t)	$\lambda(t)$	N(t)	CTE(t)
1	0,21	0,79250378	0,21	0,20749622	807,50
2	0,37	0,62806225	0,21	0,41499243	507,50
3	0,50	0,49774171	0,21	0,62248865	407,50
4	0,61	0,39446218	0,21	0,82998487	357,50
5	0,69	0,31261277	0,21	1,03748109	327,50
6	0,75	0,24774681	0,21	1,2449773	307,50
7	0,80365972	0,19634028	0,21	1,45247352	293,21
8	0,84439958	0,15560042	0,21	1,65996974	282,50
9	0,87668608	0,12331392	0,21	1,86746595	274,16
10	0,90227325	0,09772675	0,21	2,07496217	267,50
11	0,92255118	0,07744882	0,21	2,28245839	262,04
12	0,93862152	0,06137848	0,21	2,48995461	257,50
13	0,95135732	0,04864268	0,21	2,69745082	253,65
14	0,96145049	0,03854951	0,21	2,90494704	250,35
15	0,96944937	0,03055063	0,21	3,11244326	247,50
16	0,97578851	0,02421149	0,21	3,31993948	245,00

Tabla 11. Datos de las zapatas en el modelo de sustitución total a tiempo constante

tp	F(t)	R(t)	$\lambda(t)$	M(t)	CTE(t)	f(t)
1	0,21	0,79250378	0,21	1,00	683,00	0,20749622
2	0,37	0,62806225	0,21	1,44	417,73	0,16444154
3	0,50	0,49774171	0,21	1,85	330,87	0,13032054
4	0,61	0,39446218	0,21	2,21	288,60	0,10327952
5	0,69	0,31261277	0,21	2,55	264,12	0,08184941
6	0,75	0,24774681	0,21	2,84	248,50	0,06486597
7	0,80365972	0,19634028	0,21	3,11	237,91	0,05140652
8	0,84439958	0,15560042	0,21	3,35	230,44	0,04073987
9	0,87668608	0,12331392	0,21	3,55	225,01	0,0322865
10	0,90227325	0,09772675	0,21	3,74	220,98	0,02558717
11	0,92255118	0,07744882	0,21	3,90	217,95	0,02027793
12	0,93862152	0,06137848	0,21	4,03	215,64	0,01607034
13	0,95135732	0,04864268	0,21	4,15	213,86	0,0127358
14	0,96145049	0,03854951	0,21	4,26	212,49	0,01009317
15	0,96944937	0,03055063	0,21	4,35	211,42	0,00799888
16	0,97578851	0,02421149	0,21	4,42	210,59	0,00633914

Tabla 12. Datos de las zapatas en el modelo de sustitución total basada en la edad



Gráfica 2. Comparación de políticas de sustitución de las zapatas de freno

En este caso, aunque se aprecie una primera impresión de que es conveniente realizar una sustitución total basada en la edad, se ha estudiado junto a los técnicos de mantenimiento que debido a la diminuta diferencia de coste que existe entre las dos políticas, se va a elegir una política de sustitución a tiempo constante. Por tanto, se van a cambiar una vez al año las zapatas de freno.

Esponjas

Coste de sustitución preventiva, 1.000€

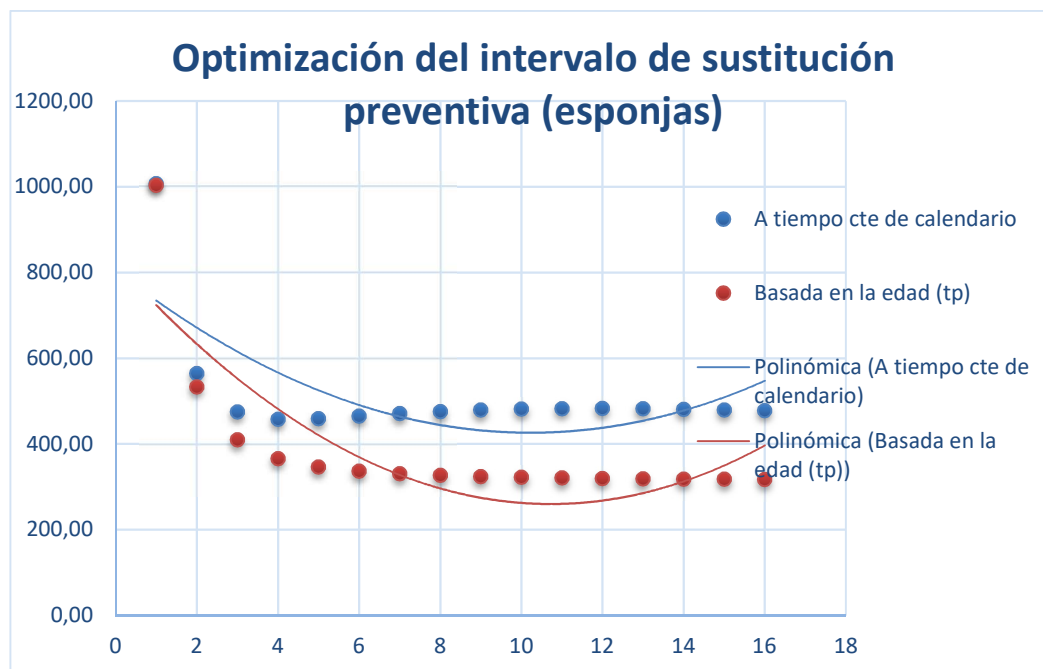
Coste de sustitución correctiva, 2.000€

tp	F(t)	R(t)	$\lambda(t)$	N(t)	CTE(t)
1	0,00	0,99641251	0,00	0,00358749	1007,17
2	0,06	0,93532729	0,06	0,06489264	564,89
3	0,20	0,79705745	0,15	0,21272308	475,15
4	0,37	0,63486423	0,20	0,41621307	458,11
5	0,51	0,48703232	0,23	0,64906902	459,63
6	0,63	0,36663943	0,25	0,89626594	465,42
7	0,72621126	0,27378874	0,25	1,14951391	471,29
8	0,79592668	0,20407332	0,25	1,40414608	476,04
9	0,8476246	0,1523754	0,25	1,65747619	479,44
10	0,88578921	0,11421079	0,25	1,90794058	481,59
11	0,91396434	0,08603566	0,25	2,15463471	482,66
12	0,93482093	0,06517907	0,24	2,39705263	482,84
13	0,95032588	0,04967412	0,24	2,634935	482,30
14	0,96191199	0,03808801	0,23	2,86817743	481,17
15	0,97061877	0,02938123	0,23	3,09677366	479,57
16	0,97720034	0,02279966	0,22	3,32077957	477,60

Tabla 13. Datos de las esponjas en el modelo de sustitución total a tiempo constante

tp	F(t)	R(t)	$\lambda(t)$	M(t)	CTE(t)	f(t)
1	0,00	0,99641251	0,00	1,00	1003,59	0,00358749
2	0,06	0,93532729	0,06	1,94	533,29	0,06108522
3	0,20	0,79705745	0,15	2,66	410,32	0,13826985
4	0,37	0,63486423	0,20	3,26	366,11	0,16219322
5	0,51	0,48703232	0,23	3,76	346,72	0,14783191
6	0,63	0,36663943	0,25	4,19	336,73	0,12039289
7	0,72621126	0,27378874	0,25	4,55	330,86	0,09285069
8	0,79592668	0,20407332	0,25	4,85	327,06	0,06971542
9	0,8476246	0,1523754	0,25	5,10	324,42	0,05169792
10	0,88578921	0,11421079	0,25	5,31	322,49	0,03816461
11	0,91396434	0,08603566	0,25	5,49	321,04	0,02817513
12	0,93482093	0,06517907	0,24	5,63	319,92	0,02085659
13	0,95032588	0,04967412	0,24	5,75	319,05	0,01550495
14	0,96191199	0,03808801	0,23	5,85	318,35	0,01158611
15	0,97061877	0,02938123	0,23	5,93	317,80	0,00870677
16	0,97720034	0,02279966	0,22	6,00	317,36	0,00658157

Tabla 14. Datos de las esponjas en el modelo de sustitución total basada en la edad



Gráfica 3. Comparación de las políticas de sustitución de las esponjas

Como se puede observar tanto en las tablas como en la gráfica, una política de sustitución basada en la edad es más conveniente que a tiempo constante. Los técnicos también están a favor de esta política para las esponjas ya que, aunque el cambio de este repuesto no esté sincronizado con los repuestos estudiados anteriormente, se trata de una tarea sencilla y que no conlleva mucho tiempo.

Los siguientes repuestos no presentan un histórico de datos concluyente, se consulta con los técnicos y se decide

que serán cambiados una vez al año periódicamente junto a los empaques de los servomotores y a las zapatas de freno. Es lo que se viene haciendo hasta ahora y no se han producido fallos mayores. Estos repuestos son:

- Tulipas centradoras
- Cepillos alisadores de etiquetas
- Rodillos de leva
- Tornillo de tope
- Conjunto de paletas encoladoras
- Rodillo encolador
- Rasqueta de cola
- Raspadores superiores e inferiores
- Barra de yunque

Para el cambio de estos repuestos se fijará una fecha anualmente en la que se realicen dichas actividades de mantenimiento preventivo de cara a mejorar las prestaciones del sistema y que pueda funcionar a máximo rendimiento.

Si todas las medidas programadas y optimizadas redujesen los modos de fallo al 80%, entonces la fiabilidad y la disponibilidad del sistema mejoraría en torno al 15%. Esto conlleva a que la línea de producción de la que forma parte el sistema verá aumentado su rendimiento en 5 puntos de OPI (*Operational Performance Indicator*), en términos económicos, se ahorrarían 100.000 € al año solo en esa línea y teniendo en cuenta solo el aspecto productivo.

Este estudio se considera un trabajo vivo sobre el que se debe seguir trabajando en primer lugar para cerrar las fases restantes del ciclo y en segundo lugar porque debe servir de guía para realizar el marco semejante para los demás elementos de la línea y para las demás máquinas etiquetadoras de la planta. Por dicho motivo, las fases 5, 7 y 8 no se han incluido en este trabajo y quedan como las siguientes tareas a abordar.

Futuras líneas de actuación

Como ya se ha explicado, quedan pendientes como futuras líneas de actuación:

- Fase 5: Programación del mantenimiento y optimización en la asignación de recursos
- Fase 7: Análisis del ciclo de vida y de la posible renovación de los equipos
- Fase 8: Implantación del proceso de mejora continua y adopción de nuevas tecnologías

Además de dichos puntos mencionados, este trabajo proporciona una base a seguir para el resto de la planta. Ya que por un lado sirve de guía cuando se vaya a realizar el ciclo de gestión y por otro, es de gran utilidad debido a que existen más etiquetadoras de botellas en la planta y tanto el funcionamiento como las partes de la máquina son similares a la presentada en este trabajo.

6 CONCLUSIONES

Las principales ventajas que se van a producir gracias a la implantación de este plan de mantenimiento serán las siguientes:

- Como ya se ha presentado al final del punto anterior, se ahorrarían en torno a 100.000 € al año solo en esa línea.
- También existe la posibilidad de realizar una expansión horizontal de dicho plan de mantenimiento, ya que, en total, hay 6 máquinas similares en la planta. Lo que supondría un mayor ahorro, ya que dichas líneas también producirían de manera más económica.
- Gracias a la implementación del paso 4 del TPM “Gestión Autónoma” será posible detectar anomalías antes del fallo, el personal de mantenimiento será liberado para que puedan realizar más actividades de mantenimiento preventivo, es decir, se reducirán los costes de mantenimiento asociados y la calidad de la función a cumplir del sistema será aumentada.
- El plan de mantenimiento provocará una mayor duración del equipo y de sus componentes, lo que provoca directamente que se reduzcan los costos de las reparaciones. Así como una reducción de las paradas imprevistas en torno al 30-35%.
- Además, reduce unos costos no tan directos, que son los del inventario. La gestión del mismo se verá mejorada porque se verá reducido el número de repuestos, y si, se expande horizontalmente el plan, se reducirá drásticamente el mismo, ya que se pueden solicitar los repuestos cuando se vaya a realizar las actividades de mantenimiento preventivo.
- Otro factor clave que se ve afectado es la reducción de mermas, ya que actualmente presenta un valor muy alto. Supone una pérdida de producción considerable teniendo en cuenta que se pierde el producto y el envase.

REFERENCIAS

- Barbera, F., Schneider, H. & Kelle, P., 1996. A condition Based Maintenance Model with Exponential Failures and Fixed Inspection Intervals. *Journal of the Operations Research Society*, Issue 47, pp. 1037-1045.
- Barlow, R. & Hunter, L., 1960. Optimum Preventive Maintenance Policies. *Operations Research*, Issue 8, pp. 90-100.
- Campbell, J. D. & Jardine, A. K. S., 2001. *Maintenance Excellence*. New York: Marcel Dekker.
- Chiclott, J. B. & Christer, A. H., 1991. Modeling of Condition Based Maintenance at the Coal Face. *International Journal of Production Economics*, Issue 22, pp. 1-11.
- Cho, D. & Parlar, M., 1991. A Survey of Maintenance Models for Multi-Units System. *European Journal of Operational Research*, Issue 51, pp. 1-23.
- Christer, A. H. & Wang, W., 1992. A Model of Condition Monitoring of a Production Plan. *International Journal of Production Research*, Issue 30, pp. 2199-2211.
- Crespo Márquez, A., 2007. *The Maintenance Management Framework. Models and methods for complex systems maintenance*. London: Springer Verlag.
- Gerstbakh, I. B., 1977. *Models of Preventive Maintenance*. New York: North-Holland.
- Jones, R., 1995. *Risk - Based Management: A Reliability - Centered Approach*. Houston: Gulf Publishing Company.
- Kaplan, R. S. & Norton, D. P., 1992. The Balanced Scorecard - Measures that drive performance. *Harvard Business Review*, Issue 70, pp. 71-90.
- Lee, J., 2003. E-manufacturing: fundamental, tools and transformation. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Issue 19, pp. 501-507.
- Moubray, J., 1997. *Mantenimiento Centrado en la Fiabilidad (RCM II)*. New York: Industrial Press Inc..
- Nguyen, D. G. & Muthy, D. N. P., 1981. Optimal Preventive Maintenance Policies for Repairable Systems. *Operations Research*, Issue 29, pp. 1181-1194.
- Osaki, S. & Nakagawa, T., 1976. Bibliography for Reliability and Availability of Stochastic Systems. *IEEE Transactions on Reliability*, Issue 25, pp. 284-287.
- Palmer, R. D., 1999. *Maintenance Planning and Scheduling*. New York: McGraw-Hill.
- Parra, C., 1998. *Course of Reliability - Centered Maintenance*. Mérida (Venezuela): Universidad de los Andes.
- Parra, C. & Crespo, A., 2006. *On the consideration of reliability in the Life Cycle Cost Analysis (LCCA). A review of basic models*. London: Guedes Soares & Zio.
- Pierskalla, W. P. & Voelker, J. A., 1976. A Survey of Maintenance Models: The Control and Surveillance of Deteriorating Systems. *Naval Research Logistics Quarterly*, Issue 23, pp. 353-388.
- Pintelon, L. M. & Gelders, L. F., 1992. Maintenance management decision making. *European Journal of Operational Research*, Issue 58, pp. 301-317.
- Sherif, Y. S. & Smith, M. L., 1981. Optimal Maintenance Models for System Subject to Failure. A review. *Naval Research Logistics Quarterly*, Issue 28, pp. 47-74.
- Tsang, A., Jardine, A. & Kolodny, H., 1999. Measuring maintenance performance: a holistic approach. *International Journal of Operations and Production Management*, Issue 19, pp. 691-715.
- Valdez-Flores, C. & Feldman, R. M., 1989. A Survey of Preventive Maintenance Models for Stochastically Deteriorating Single-Unit Systems. *Naval Research Logistics*, Issue 36, pp. 419-446.

Vanneste, S. G. & Van Wassenhove, L. N., 1995. An integrated and structured approach to improve maintenance. *European Journal of Operational Research*, Issue 82, pp. 241-257.

Vigliasindi, F., 1989. *Gestire la manutenzione*. Milano: Franco Angeli.

Wireman, T., 1998. *Developing performance indicators for managing maintenance*. New York: Industrial Press.

GLOSARIO

A continuación, se van a exponer algunos términos genéricos y definiciones para las áreas técnicas, administrativas y de gestión del mantenimiento, según la norma española UNE-EN 13306 “Mantenimiento, Terminología del mantenimiento” de Marzo 2011.

TÉRMINOS FUNDAMENTALES

Mantenimiento: combinación de todas las acciones técnicas, administrativas y de gestión realizadas durante el ciclo de vida de un elemento, destinadas a conservarlo o devolverlo a un estado en el que pueda desempeñar la función requerida.

Gestión del mantenimiento: todas las actividades de la gestión que determinan los objetivos, las estrategias y las responsabilidades del mantenimiento y la implantación de dichas actividades por medios tales como la planificación del mantenimiento, el control del mismo y la mejora de las actividades de mantenimiento y económicas.

Plan de mantenimiento: conjunto estructurado y documentado de tareas que incluyen las actividades, los procedimientos, los recursos y la duración necesaria para realizar el mantenimiento.

Función requerida: función, combinación de funciones, o una combinación total de funciones de un elemento que se consideran necesarias para proporcionar un servicio dado.

TÉRMINOS RELATIVOS AL ELEMENTO

Elemento: parte, componente, dispositivo, subsistema, unidad funcional, equipo o sistema que puede describirse y considerarse de forma individual.

Activo (físico): elemento contabilizable formalmente.

Elemento reparable: elemento que, después de un fallo y bajo condiciones dadas, se puede devolver a su estado en el que pueda realizar una función requerida.

Elemento consumible: elemento o material que es fungible, que puede ser sustituido de forma regular y que generalmente no es un elemento específico.

Repuesto: elemento destinado a sustituir a un elemento análogo, con objeto de conservar o mantener la función original requerida del elemento.

PROPIEDADES DE LOS ELEMENTOS

Disponibilidad: aptitud de un elemento para encontrarse en un estado en que pueda realizar su función, cuándo y cómo se requiera, bajo condiciones dadas, asumiendo que se dispone de los recursos externos necesarios.

Fiabilidad: aptitud de un elemento de realizar una función requerida bajo unas condiciones determinadas durante un intervalo de tiempo dado.

Mantenibilidad: capacidad de un elemento bajo condiciones de utilización dadas, de ser preservado, o ser devuelto a un estado en el que pueda realizar una función requerida, cuando el mantenimiento se ejecuta bajo las condiciones dadas y utilizando procedimiento y recursos establecidos.

Conformidad: cumplimiento de un requisito.

Vida útil: intervalo de tiempo que comienza en un instante dado y termina en el instante en que se alcanza el estado límite.

Tasa media de fallos: número de fallos de un elemento durante un intervalo de tiempo dado dividido por el intervalo de tiempo.

Ciclo de vida: Serie de estados por los que pasa un elemento desde su concepto hasta su eliminación.

FALLOS Y EVENTOS

Fallo: cese de la aptitud de un elemento para realizar la función requerida.

Modo de fallo: manera en que se produce la inaptitud de un elemento para realizar una función requerida.

Causa de fallo: circunstancias habidas durante la especificación, el diseño, la fabricación, la instalación, la utilización o el mantenimiento que provocan el fallo.

Fallo primario: fallo de un elemento no causado directa ni indirectamente por el fallo o la avería de otro elemento.

Fallo secundario: fallo de un elemento causado directa o indirectamente por el fallo o avería de otro elemento.

Fallo repentino: fallo que no podría anticiparse mediante examen o monitorización previos.

Fallo oculto: fallo que no se detecta durante el funcionamiento normal.

Mecanismo de fallo: procesos físicos, químicos o de otros tipos que pueden conducir o han conducido al fallo.

Severidad: consecuencias perjudiciales potenciales o reales de un fallo o de una avería.

Criticidad: índice numérico de la severidad de un fallo o de una avería combinado con la probabilidad o frecuencia de su ocurrencia.

AVERÍAS Y ESTADOS

Avería: estado de un elemento caracterizado por la inaptitud para realizar una función requerida, excluyendo la incapacidad durante el mantenimiento preventivo o por otras acciones planificadas, o debido a la falta de recursos externos.

Avería latente: avería existente que aún no se ha hecho manifiesta.

Avería parcial: avería caracterizada por el hecho de que un elemento puede realizar únicamente algunas, pero no todas las funciones requeridas.

Estado de disponibilidad: estado de un elemento caracterizado por el hecho de que se puede realizar una función requerida, asumiéndose que se proporcionan los recursos externos como si fuesen necesarios.

Estado degradado: estado de un elemento en el que la aptitud para realizar la función requerida está reducida, pero dentro de límites de aceptabilidad definidos.

Estado de indisponibilidad: Estado de un elemento caracterizado por una avería o por una posible incapacidad para realizar una función requerida durante el mantenimiento preventivo.

Estado de incapacidad; parada: estado de un elemento caracterizado por su inaptitud para realizar una función requerida, por cualquier causa.

Estado de incapacidad externa: subconjunto del estado de incapacidad en la que el elemento se encuentra en un estado de disponibilidad, pero faltan los recursos externos requeridos o la incapacidad es debida a acciones planificadas distintas de las de mantenimiento.

Estado operativo: estado en que un elemento está funcionando según lo requerido.

Estado de reposo: estado de un elemento que está en estado de disponibilidad y sin funcionar durante el tiempo no requerido.

Estado de espera: estado de un elemento que está en estado de disponibilidad y sin funcionar durante el tiempo requerido.

Parada: cese del funcionamiento programado con antelación, para actividades de mantenimiento u otros fines.

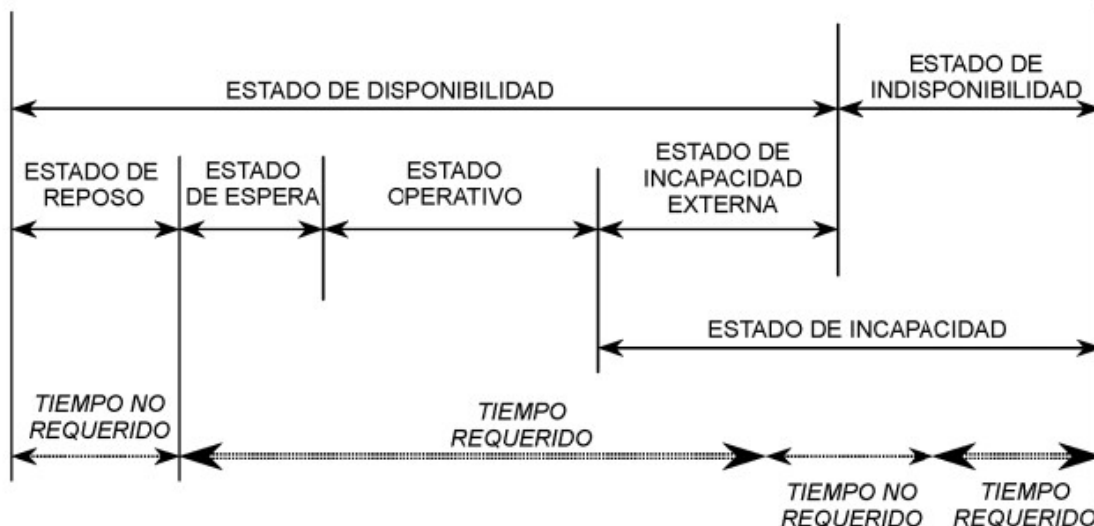


Figura 30. Estados de un elemento

TIPOS DE MANTENIMIENTO

Mantenimiento preventivo: mantenimiento que se realiza a intervalos predeterminados o de acuerdo con criterios establecidos, y que está destinado a reducir la probabilidad de fallo o la degradación del funcionamiento de un elemento.

Mantenimiento predeterminado: mantenimiento preventivo que se realiza de acuerdo con intervalos de tiempo establecidos o con un número definido de unidades de funcionamiento, pero sin investigación previa de la condición.

Mantenimiento basado en la condición: mantenimiento preventivo que incluye una combinación de monitorización de la condición y/o la inspección y/o los ensayos, análisis y las consiguientes acciones de mantenimiento.

Mantenimiento predictivo: mantenimiento basado en la condición que se realiza siguiendo la predicción obtenida del análisis repetido o de características conocidas y de la evaluación de los parámetros significativos de la degradación del elemento.

Mantenimiento correctivo: 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.

Mantenimiento programado: mantenimiento que se realiza de acuerdo con un programa de calendario establecido o un número establecido de unidades de utilización.

Mantenimiento autónomo: acciones de mantenimiento que son realizadas por un operador de producción.

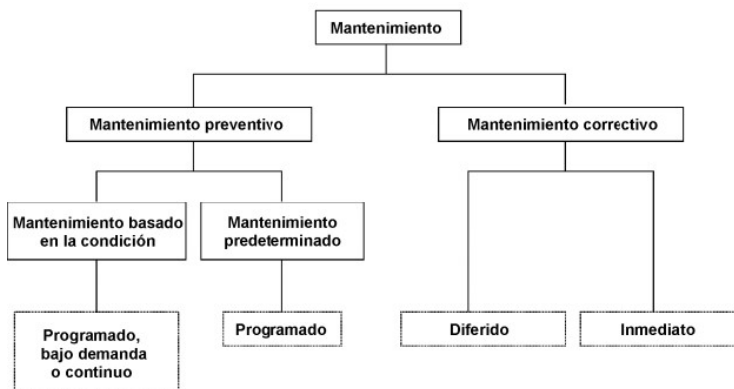


Figura 31. Resumen General Tipos de Mantenimiento

TÉRMINOS RELATIVOS AL TIEMPO

Tiempo de disponibilidad: intervalo de tiempo durante el cual un elemento se encuentra en estado de disponibilidad.

Tiempo de indisponibilidad: intervalo de tiempo durante el cual un elemento se encuentra en estado de indisponibilidad.

Tiempo operativo: intervalo de tiempo durante el cual un elemento se encuentra en estado de funcionamiento.

Tiempo requerido: intervalo de tiempo durante el cual se requiere que un elemento se encuentre en estado de disponibilidad.

Tiempo de espera: intervalo de tiempo durante el cual un elemento se encuentra en estado de espera.

Tiempo de reposo: intervalo de tiempo durante el cual un elemento se encuentra en estado de reposo.

Tiempo de mantenimiento: intervalo de tiempo durante el cual se realiza el mantenimiento de un elemento, incluidos los retrasos técnicos y logísticos

Tiempo de mantenimiento preventivo: parte del tiempo de mantenimiento durante el cual se realiza mantenimiento preventivo sobre un elemento, incluidos los retrasos logísticos.

Tiempo de mantenimiento correctivo: parte del tiempo de mantenimiento durante el cual se realiza mantenimiento correctivo activo sobre un elemento, incluidos los retrasos logísticos.

Tiempo de reparación: parte del mantenimiento correctivo activo durante el cual se realiza la reparación de un elemento.

Retraso logístico: tiempo acumulado durante el cual no se puede realizar el mantenimiento debido a la necesidad de adquirir recursos para el mantenimiento, excluido cualquier retraso administrativo.

Retraso técnico: tiempo acumulado necesario para realizar acciones técnicas auxiliares asociadas con una acción de mantenimiento, pero sin formar parte de ella.

Tiempo operativo hasta el fallo: tiempos de funcionamiento acumulado de un elemento desde el instante en que comienza a estar por primera vez en estado de operación hasta el primer fallo, o desde el instante de su recuperación hasta el siguiente fallo.

Tiempo entre fallos: duración del tiempo transcurrido entre dos fallos consecutivos de un elemento.

Tiempo operativo entre fallos: duración total del tiempo de funcionamiento entre dos fallos consecutivos de un elemento.

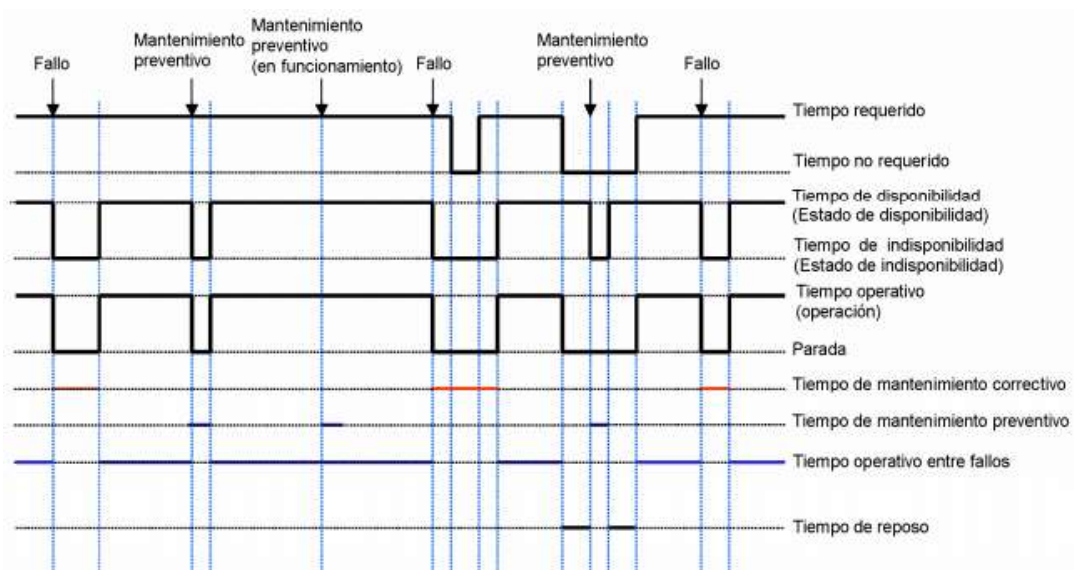


Figura 32. Tiempos relativos al mantenimiento

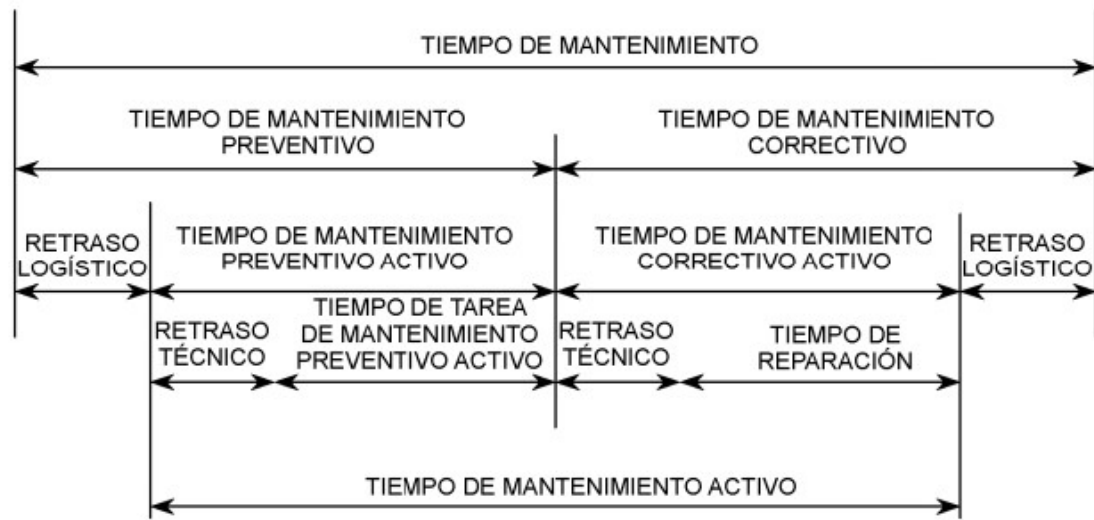


Figura 33. Distintos tipos de tiempos de mantenimiento

ANEXO 1 – ANÁLISIS DE CRITICIDAD

ANEXO 2- AMEF

ANEXO 3 – PLAN DE MANTENIMIENTO