



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERIA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**METODOLOGÍA PARA LA DETECCIÓN Y PREVENCIÓN DE
FALLAS EN EQUIPOS INDUSTRIALES DE PRODUCCIÓN**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA EN SISTEMAS – INGENIERÍA INDUSTRIAL

P R E S E N T A:

Joel Esquivel Villar

Directora:

M. I. Ann Wellens Purnal



Ciudad Universitaria, 2009



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dra. Idalia Flores De La Mota

Secretario: Dra. Hérica Sánchez Larios

Vocal: M. I. Ann Wellens Purnal

1 ° Suplente: M. A. José Gonzalo Guerrero Zepeda

2 Suplente: M. I. Octavio Estrada Castillo

Lugar donde se realizó la tesis:

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Directora de Tesis

M. I. Ann Wellens Purnal

FIRMA

Agradecimientos

A mi directora de tesis, Ann Wellens, por todos sus consejos, tiempo y dedicación que siempre tuvo para mis dudas; por su necesidad de que las cosas tienen que salir bien, pero sobre todo, por el espíritu humano, bondadoso y solidario que siempre mostró para conmigo.

A mis compañeros del equipo de Mejora de Procesos, Zeli, Miguel, Azaura, David y Armando, por compartir conmigo la maravillosa experiencia del trabajo colaborativo. Sin lugar a dudas los mejores amigos que pude encontrar y con quienes compartí grandes momentos y experiencias entre otras muchas cosas.

A mis compañeros del taller de desarrollo de Avon Cosmetic's, Francisco Montero, Julián Sánchez, René Jimarez y Hugo Ferrer, de quienes aprendí mucho de lo poco que ahora sé sobre mantenimiento y quienes pacientemente resolvieron mis dudas, soportaron mi carácter y se olvidaron de ser mis compañeros de trabajo para convertirse en mis amigos.

JEV.

Abstract	5
Capítulo 1 Antecedentes	6
1.1 El papel del mantenimiento en la industria	6
1.2 Descripción de la problemática	6
1.3 Objetivos	7
1.3.1 Objetivo general	7
1.3.2 Objetivos específicos	8
1.4 Alcances y limitaciones	8
Capítulo 2 Filosofías y tipos de mantenimiento	9
2.1 Tipos de mantenimiento	9
2.1.1 Mantenimiento correctivo	9
2.1.2 Mantenimiento preventivo	10
2.1.3 Mantenimiento predictivo	12
2.1.4 Mantenimiento proactivo	13
2.2 Filosofías del mantenimiento	14
2.2.1 Mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM)	14
2.2.2 Mantenimiento productivo total (TPM)	16
2.3 Estrategias del mantenimiento	18
Capítulo 3 Herramientas y metodología de la calidad	20
3.1 El ciclo de Deming	20
3.2 Las siete herramientas básicas de la calidad	22
3.2.1 Diagrama de flujo del proceso	22
3.2.2 Hoja de verificación	24
3.2.3 Histograma	24
3.2.4 Diagrama de Pareto	26
3.2.5 Diagrama causa – efecto	28
3.2.6 Diagrama de dispersión	30
3.2.7 Gráficas de control	32
3.3 Otras herramientas	34
3.3.1 Análisis de modo y efecto de falla (FMEA)	34
3.3.2 Pruebas de hipótesis	35
3.3.3 Árbol de fallas (FTA)	36
3.3.4 Capacidad de proceso	38
Capítulo 4 Metodología propuesta	41
4.1 Las grandes pérdidas en los equipos industriales	41
4.2 Tipos de fallas	43
4.2.1 Fallas crónicas	44
4.2.2 Fallas esporádicas	45
4.3 Detección de fallas crónicas	45
4.3.1 Mantenimiento básico	47
4.3.2 Operación normal	48
4.3.3 Identificación de los problemas a resolver	48
4.3.4 Identificación de la causa raíz	48
4.3.5 Aplicación de la solución	49
4.3.6 Comparación con el desempeño anterior	49
4.3.7 Estandarización de la solución	50
4.4 Prevención de fallas esporádicas	50
4.4.1 Mantenimiento básico	52

4.4.2	Identificación de los modos potenciales de falla	53
4.4.3	Determinar la causa raíz y monitorear su evolución	53
4.4.4	Prevención de la falla y estandarización	54
Capítulo 5	Estudio de caso	55
5.1	Descripción de la empresa	55
5.1.1	Ventas	55
5.1.2	División operativa	56
5.2	Detección de fallas crónicas en línea de llenado de tubos	57
5.2.1	Descripción de la línea	58
5.2.2	Actividades de mantenimiento básico en la línea de producción	58
5.2.3	Identificación de las fallas crónicas a resolver	59
5.2.4	Identificación de la causa raíz del quemado del sello	61
5.2.5	Comparación con el desempeño anterior	68
5.2.6	Estandarización y conclusiones	69
5.3	Variación en el peso del producto	70
5.3.1	Identificación del problema	71
5.3.2	Identificación de la causa raíz de la variación en el peso	73
5.3.3	Comparación con el desempeño anterior	79
5.3.4	Estandarización y conclusiones	81
5.4	Prevención de fallas esporádicas en línea de llenado de tubos	83
5.4.1	Identificación de modos potenciales de falla	84
5.4.2	Identificación de la causa raíz de la falla en el árbol de levas	86
5.4.3	Monitoreo de la condición de riesgo y prevención	87
5.4.4	Estandarización y conclusiones	89
5.5	Análisis costo/beneficio	90
5.5.1	Costos	90
5.5.2	Beneficios	93
	Conclusiones	95
	Referencias	97
	Anexos	
A.1	Fórmulas para el cálculo de la línea central y límites de las gráficas de control	99
A.2	Tablas de severidad, ocurrencia y detección del FMEA	101
A.3	Fórmulas para pruebas de hipótesis	102
A.4	Tablas para la nueva condición del sellado de tubos	104
A.5	Tablas para la nueva condición del peso en los tubos	107

Resumen

El trabajo de tesis que a continuación se presenta constituye una propuesta metodológica en el área del mantenimiento industrial. Combina las filosofías y técnicas del mantenimiento con el control estadístico del proceso, así como el análisis estadístico de los datos, para la obtención de dos productos: El primero es una metodología para la detección de fallas crónicas en equipos de producción y el segundo es una metodología para la prevención de fallas esporádicas en los mismos equipos.

La aplicación de ambas metodologías está pensada para procesos productivos, donde la adquisición de datos es relativamente más sencilla que en el área de servicios. Su objetivo es incrementar la disponibilidad de los equipos de producción, a fin de mejorar la calidad de los productos que las máquinas entregan, con lo que se aumenta la competitividad de la empresa en el mercado.

Las dos metodologías fueron aplicadas en una empresa productora de cosméticos con resultados favorables.

Abstract

The following thesis statement constitutes a methodological proposal in industrial maintenance area. It combines maintenance philosophies and techniques, statistical control processes and statistical data analysis to obtain two products: The first one is a chronic failures detection methodology, and the second one is a methodology to prevent sporadic failures in the same equipment.

The application of both methodologies is intended for productive processes where acquisition of data is relatively easier than in the services area. Its goal is to increase production equipment availability in order to improve the quality of products delivered by machines so that the competitiveness of the company in the market is increased.

The two methodologies were applied in a cosmetics production facility with favorable results.

1.1 El papel del mantenimiento en la industria

El mantenimiento industrial día a día está rompiendo con las barreras del pasado. Actualmente en la práctica en muchas empresas, los directivos del mantenimiento tienen que pensar que es un negocio invertir en el mantenimiento de activos y no ver al mantenimiento como un gasto.

En los últimos años, las estrictas normas de calidad que se deben cumplir, así como la intensa presión competitiva entre industrias del mismo rubro para mantenerse en el mercado nacional e internacional, ha estado forzando a los responsables del mantenimiento en las plantas industriales a implementar los cambios requeridos para pasar de ser un departamento que realiza reparaciones y cambia piezas, a una unidad estratégica de alto nivel que contribuye en gran medida a asegurar los niveles de producción. Es, por tanto, necesario hacer notar que la actividad del mantenimiento si es llevada a cabo de la mejor manera, puede generar un mejor producto, generando con esto producción de mejor calidad, en mayor cantidad y a costos más bajos.

Ninguna filosofía o política de calidad como Manufactura Esbelta, Kaizen, Cero Defectos, etcétera, tendría sentido de ser en una empresa donde la maquinaria presenta un funcionamiento deficiente, es por eso que estas filosofías y técnicas no deben olvidar en ningún momento el desempeño y mantenimiento de sus equipos de producción.

1.2 Descripción de la problemática

Los tiempos de paro debidos a fallas de las máquinas o mal funcionamiento de éstas en las empresas siempre han afectado la capacidad productiva de los activos físicos, limitando los volúmenes de producción, aumentando los costos operativos e interfiriendo con el servicio a clientes. Sin embargo, rara vez se considera el costo completo de una falla.

Muchos costos se ignoran porque no se relacionan directamente con la falla inmediata. Cuando se suman los costos de mantenimiento en las empresas de hoy, se tienen que sumar más que repuestos, aceites, herramientas y mano de obra. El costo más importante para la mayoría de las empresas es la pérdida de producción durante el tiempo que el equipo o la planta están parados para la reparación. Los tiempos de paro también afectan de forma negativa el programa de entregas lo cual deteriora las relaciones con los clientes y amenaza negativamente ventas futuras.

Cuando se estudian los programas de mantenimiento, se observa que la mayoría de las empresas pasan más del 55% de su tiempo en mantenimiento correctivo (arreglando equipos después de una falla) y otro 35% cambiando piezas que creen que están por romperse porque ya pasaron por las horas que consideran “normales”. Este es el mantenimiento más costoso que se conoce. Requiere de un inventario de piezas en almacén, personal técnico disponible y personal de producción desocupado mientras se corrige el problema.

Es por estos costos altos que las empresas exitosas están tratando de ser proactivas en su mantenimiento, tratando de romper el hábito de reparar las cosas cuando se rompen y diseñar un programa de mantenimiento para eliminar o minimizar las fallas. Esto requiere de un diseño de programas de mantenimiento que extiendan el intervalo entre reparaciones o paros para cambios de aceites o piezas.

El departamento de mantenimiento de hoy, como muchos otros, está bajo una presión continua para recortar costos, mostrar resultados, y apoyar la misión de la organización. Después de todo, son expectativas lógicas desde el punto de vista del negocio.

En manufactura, los efectos de tiempos de paro se agravan con el advenimiento mundial de los sistemas Justo a Tiempo (JIT por sus siglas en inglés), implicando que aún fallas menores conlleven la posibilidad de parar toda una línea de producción. En tiempos recientes, la mayor mecanización y automatización ha traído consigo que la confiabilidad y disponibilidad se han transformado en cuestiones clave en sectores tan diversos como la atención a la salud, el procesamiento de datos, las telecomunicaciones y la administración de edificios.

De acuerdo con lo anterior es necesario redefinir el objetivo del departamento de mantenimiento tanto en las empresas manufactureras como en las de servicios; cambiar la perspectiva de un departamento “apaga-fuegos” para convertirlo en un elemento estratégico de competitividad de la industria, a través de incrementar la confiabilidad y disponibilidad de los activos a costo mínimo. Es necesario darse cuenta que el mantenimiento produce un producto y este producto es capacidad de producción.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Desarrollar una metodología basada en las herramientas de la calidad que permita al personal de mantenimiento aumentar la confiabilidad y disponibilidad de la maquinaria y equipo de producción al detectar y eliminar las fallas crónicas y detectar de manera oportuna las fallas potenciales, tendencias y patrones de comportamiento negativos para eliminarlos o controlarlos antes de que afecten el proceso productivo.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Identificar las fallas crónicas de los equipos a través de un análisis sistemático utilizando las herramientas de la calidad, según el caso de que se trate.
2. Identificar los equipos críticos para la producción y sus modos potenciales de falla para prevenir su ocurrencia o minimizar sus efectos.
3. Proponer la integración del análisis estadístico como parte de las rutinas de mantenimiento y la toma de decisiones en el departamento.

1.4 Alcances y limitaciones

Se presentan dos metodologías aplicables y aplicadas en el área de mantenimiento: Una es para la detección y corrección de fallas crónicas y la otra es para la prevención de fallas esporádicas.

La metodología de detección y corrección de fallas crónicas hace especial énfasis en la detección, debido a que es el principal problema cuando se quieren solucionar este tipo de fallas. Una vez que la causa raíz es detectada, la solución es inmediata y no requiere de un análisis especial.

Esta metodología está pensada para aplicarse en los equipos de producción industrial, pues se aprovecha la gran cantidad de datos que de manera relativamente sencilla se pueden obtener en los procesos industriales. No se considera que pueda ser aplicada en el área de servicios.

La metodología de prevención de fallas esporádicas es una propuesta alternativa de mantenimiento proactivo, pues intenta identificar la falla antes de que ésta aparezca e interfiera con el proceso productivo. En este caso, se puede dificultar hacer una evaluación de los resultados debido a que en la mayoría de las empresas se carece de estadísticas de fallas por lo que algunos indicadores como el tiempo medio entre fallas (MTBF, por sus siglas en inglés) tienen que empezar a medirse a partir de la aplicación de la metodología, misma que puede ir siendo mejorada con la experiencia.

Filosofías y tipos de mantenimiento

Mantenimiento se puede definir como un conjunto de técnicas y sistemas que, actuando sobre los medios de producción permiten:

- Reparar las fallas que se presenten.
- Prever estas fallas mediante revisiones y otras técnicas más complejas como técnicas estadísticas, seguimiento y monitoreo del estado de la maquinaria.
- Especificar las normas de operación, seguridad e higiene para el personal operativo.
- Perfeccionar o acondicionar los medios de producción de acuerdo con las necesidades específicas del proceso.

2.1 Tipos de mantenimiento

Aunque diversos autores manejan diferentes nombres o diferentes tipos, en esencia se puede decir que existen cuatro tipos de mantenimiento, que son¹:

- Mantenimiento correctivo o a la rotura.
- Mantenimiento preventivo o basado en el tiempo.
- Mantenimiento predictivo o basado en la condición.
- Mantenimiento proactivo o basado en la detección.

2.1.1 Mantenimiento correctivo

También conocido como mantenimiento a la rotura o mantenimiento por fallas. En este tipo de mantenimiento se permite al activo funcionar hasta la falla; en ese instante se realiza la reparación o reemplazo de todas las piezas dañadas. Generalmente la reparación de la falla se lleva a cabo de manera urgente y el equipo no puede usarse antes de ser reparado.

Esta estrategia de mantenimiento impide el diagnóstico fiable de las causas que provocaron la falla, pues se ignora si falló por mal trato, por abandono, por desconocimiento del manejo, por desgaste natural, etc.

Aunque generalmente es un tipo de mantenimiento que no se planifica, en ocasiones, dependiendo del activo o del tipo de falla, la reparación se lleva a cabo cuando se dispone del personal necesario, las refacciones y los documentos técnicos para

¹ Definiciones de mantenimiento. Página web: mantenimientomundial.com. Consultada en Junio de 2007.

efectuarlo. Esto ocurre con poca frecuencia, debido a que, cuando el quipo puede funcionar, se prefiere que produzca o que realice su función aunque sea con deficiencias a que esté detenido.

El mantenimiento correctivo es el más fácil de implementar, sin embargo, posee tres desventajas básicas:

- Permitir la rotura o falla de un componente de una máquina puede ser muy costoso.
- La falla puede ocurrir a una hora inconveniente, o si el equipo es móvil, en un lugar inconveniente, de manera que no estará disponible ni el personal ni las refacciones necesarias para su reparación.
- Hay plantas que no pueden ser paradas de un momento a otro, ya sea porque proveen un servicio esencial o porque manejan productos tales como alimentos o materiales fundidos los cuales se deteriorarán si la planta se detiene repentinamente.

2.1.2 Mantenimiento preventivo

El mantenimiento preventivo o basado en el tiempo consiste en reacondicionar un equipo o sustituir a intervalos regulares sus componentes, independientemente de su estado en ese momento, incluso aún cuando la máquina esté operando satisfactoriamente. Su propósito es prever las fallas manteniendo los sistemas de infraestructura, equipos e instalaciones productivas en completa operación a los niveles de eficiencia óptimos.

El mantenimiento preventivo realizado a intervalos de tiempo regulares es un avance comparado con el mantenimiento correctivo respecto a la prevención de fallas inesperadas. Sin embargo, no es el método más eficiente para obtener la máxima seguridad y confiabilidad de la planta a menor costo, fundamentalmente porque las fallas no se producen a intervalos regulares de tiempo, sino que se producen a intervalos de tiempo que dependen de cierta una distribución probabilística. De aquí, el intervalo de tiempo entre intervenciones se elige como un valor de compromiso entre un intervalo corto (sobre-mantenimiento) que resulta seguro pero muy caro, y un intervalo largo (sub-mantenimiento) que es barato, pero existe el riesgo de que ocurran muchas fallas durante dicho intervalo. El intervalo de tiempo entre intervenciones se determina a menudo estadísticamente como el periodo de tiempo durante el cual el fabricante espera que menos del 2% de máquinas nuevas o totalmente revisadas fallen, es decir, una confiabilidad del 98%. Este intervalo de intervención debe ser revisado continuamente, ya que estudios demuestran que dicho valor cambia a lo largo de la vida de la máquina.

Las fallas ocurren con diferentes tasas durante la vida de un producto. Una tasa de falla inicial alta, conocida como mortalidad infantil, puede existir para muchos productos, por esta razón es que muchas empresas de electrónica “queman” sus productos antes de sacarlos al mercado; es decir, ejecutan una serie de pruebas para determinar

problemas de arranque antes de su entrega. Una vez que el equipo o maquina se “asienta”, es posible realizar un estudio de la distribución probabilística del tiempo medio entre fallas (MTBF, por sus siglas en inglés). Estos tiempos suelen seguir una curva normal.

Entre las ventajas del mantenimiento preventivo, se encuentran las siguientes:

1. Confianza de que los equipos operan en mejores condiciones de seguridad ya que se conoce su estado de funcionamiento.
2. Disminución del tiempo de paro de equipos conocido como tiempo muerto.
3. Mayor duración de los equipos e instalaciones.
4. Uniformidad de la carga de trabajo para el personal de mantenimiento debido a la programación de las actividades.
5. Con un buen mantenimiento preventivo se obtiene experiencia en la determinación de las causas de las fallas repetitivas o del tiempo de operación seguro de un equipo, así como la capacidad de definir puntos débiles de instalaciones, maquinaria, etc.

Por otro lado, el mantenimiento preventivo presenta tres desventajas básicas:

1. Algunas fallas de todas formas ocurrirán entre los intervalos de reparación, y esto puede ser inesperado e inconveniente.
2. Durante el tiempo de paro del equipo, muchos componentes en buenas condiciones se desmontarán, se inspeccionarán o se cambiarán innecesariamente y, si se comete algún error de re-ensamble, la condición final con que quede la máquina puede ser peor que antes de realizar la intervención.
3. Como en una reparación general se requiere examinar un gran número de elementos, ello puede tomar un tiempo considerable y puede resultar en una gran pérdida de producción.

La figura 2.1 muestra el panorama tradicional de la relación entre el mantenimiento preventivo y el mantenimiento correctivo. Con este punto de vista, el administrador del mantenimiento considera un balance entre ambos costos. Por un lado, la asignación de más recursos al mantenimiento preventivo reducirá el número de fallas. Sin embargo, en algún punto, la disminución del costo del mantenimiento correctivo puede ser menor que el aumento en el costo del mantenimiento preventivo. En este punto, la curva del costo total comienza a elevarse. Más allá de este punto, la empresa estará mejor si espera a que ocurran las fallas y las repara.

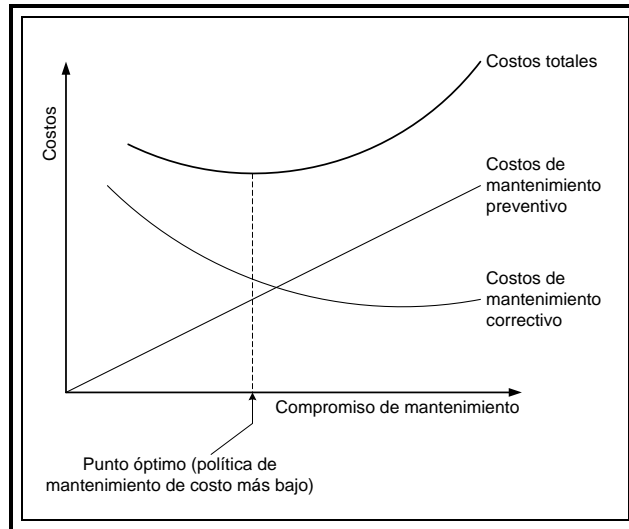


Figura 2.1 Panorama tradicional del mantenimiento.
Fuente: Heizer & Render. *Principios de Administración de operaciones*.

2.1.3 Mantenimiento predictivo

En el mantenimiento predictivo o basado en la condición se evalúa la condición mecánica y eléctrica de la máquina y su evolución mientras ésta se encuentra funcionando. Con base en los diversos síntomas que el equipo emite al exterior, se programan las necesidades de mantenimiento que se deben llevar a cabo para que la máquina siga funcionando de manera óptima. Para ello se usan instrumentos de diagnóstico, aparatos y pruebas no destructivas como análisis de lubricantes, análisis de vibraciones, diagnósticos de temperaturas y análisis de las corrientes de equipos eléctricos, etc.

La hipótesis base del mantenimiento predictivo supone que hay características medibles u observables, las cuales definen exactamente la condición de la máquina. Estas características son monitoreadas y medidas durante la operación del equipo y se conocen como Parámetros de Indicación de Falla debido a que su monitoreo continuo permite identificar cuando en un equipo se puede presentar una falla de manera incipiente.

En el mantenimiento predictivo es preciso efectuar mediciones periódicas a través de las cuales se vaya construyendo la propia historia de la máquina y se logre efectuar la detección del problema, antes de que afecte el funcionamiento del equipo; previa definición de las alertas y alarmas para el o los parámetros que están siendo monitoreados (parámetros de indicación de falla). Una vez detectada la presencia de un problema se tendrá que proceder a la identificación del defecto y su causa cuyo objetivo central será la corrección del defecto y la eliminación de su causa.

Entre las ventajas del mantenimiento predictivo se encuentran las siguientes:

1. Reduce los tiempos de paro al conocerse exactamente qué parte de la máquina es la que falló.
2. Permite seguir la evolución de un defecto en el tiempo.
3. Optimiza la gestión del personal de mantenimiento.
4. La verificación del estado de la maquinaria, tanto realizada de forma periódica como de forma esporádica, permite confeccionar un archivo histórico de su comportamiento mecánico y eléctrico.
5. Se conoce con exactitud el tiempo límite de actuación que no implique el desarrollo de un fallo imprevisto.
6. Permite la toma de decisiones sobre el paro de una línea de máquinas en momentos críticos.
7. Facilita el análisis de las fallas.
8. Permite el análisis estadístico del sistema.

2.1.4 Mantenimiento proactivo

Las técnicas de mantenimiento predictivo, indican el momento en el que la pieza o componente está próximo a la falla, pero no dice como evitarla. Afortunadamente, existe una nueva alternativa conocida como Mantenimiento Proactivo.

El mantenimiento proactivo es una filosofía de mantenimiento, dirigida fundamentalmente a la detección y corrección de las causas raíz que generan el desgaste y que conducen a la falla de la maquinaria intentando maximizar su vida útil operativa. Una vez que las causas que generan el desgaste han sido localizadas, no se debe permitir que éstas continúen presentes en la maquinaria, ya que de hacerlo, su vida y desempeño, se verán reducidos. La vida útil de los componentes del sistema depende de que los parámetros de indicación de falla sean mantenidos dentro de límites aceptables, utilizando una práctica de detección y corrección de las desviaciones según el programa de mantenimiento proactivo. Límites aceptables, significa que los parámetros de indicación de falla están dentro del rango de severidad operacional que conducirá a una vida aceptable del componente en servicio.

En sistemas mecánicos operados bajo la protección de lubricantes líquidos, controlar los cinco indicadores de falla plenamente reconocidos, puede llevar a la prolongación de la vida de los componentes, en muchas ocasiones hasta de diez veces, con respecto a las condiciones de operación actuales. Estos cinco indicadores críticos a controlar son:

- Partículas
- Agua
- Temperatura
- Aire
- Combustible o compuestos químicos

Cualquier desviación de los parámetros de indicación de falla anteriores, dará como resultado deterioro del material del componente, seguido de una baja en el desempeño

del equipo y finalizando con la pérdida total de los componentes o la funcionalidad del equipo.

Las condiciones de uso de los equipos que conducen a fallas (condicionales de falla), producen deterioro material (falla incipiente), que es la causa directa de la pérdida en el desempeño del equipo (falla operacional) y que finalmente resulta en la falta de funcionalidad del equipo (falla catastrófica).

Para poder detectar y corregir las causas de falla, se deben establecer métodos de control y seguimiento que permitan identificar su nivel y comportamiento. En la diaria actividad del mantenimiento, es común encontrarse con condiciones de "convivencia" con los problemas en vez de utilizar una técnica real de detección y solución de las causas de falla.

El mantenimiento proactivo utiliza técnicas especializadas para monitorear la condición de los equipos basándose fundamentalmente en el análisis de aceite para establecer el control de los parámetros de indicación de falla. Muchas de las empresas más importantes en México utilizan actualmente programas de análisis de aceites usados para establecer la condición de sus equipos y tomar decisiones de mantenimiento preventivo (cambiar el aceite) o de mantenimiento correctivo (cambiar la pieza que se encuentra dañada). El análisis de aceite está conceptualizado como una herramienta para "salvar" equipos y determinar cuando una pieza está por fallar para programar su reparación antes de una falla catastrófica.

El mantenimiento proactivo establece una técnica de detección temprana, monitoreando el cambio en la tendencia de los parámetros que indican la evolución de una falla, para tomar acciones que permitan al equipo regresar a las condiciones establecidas que le permitan desempeñarse adecuadamente por más tiempo.

Adicionalmente, se requiere de la estructura de un programa de mantenimiento proactivo, en el que se establezcan los equipos críticos a los que deberá enfocarse esta tecnología, efectuar un análisis de sus modos de falla, síntomas, efectos y consecuencias (conocido como FMEA por sus siglas en inglés) y determinar los objetivos de control para cada una de ellas, los tipos de análisis que se efectuarán en base rutinaria y por condición y las medidas que deberán ser tomadas para regresar los parámetros a la condición establecida.

2.2 Filosofías del mantenimiento

2.2.1 Mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM)

Confiabilidad se puede definir como la capacidad de un equipo, producto o proceso de realizar su función de la manera prevista. De otra forma, la confiabilidad se puede definir también como la probabilidad de que un producto realizará su función prevista sin incidentes por un período de tiempo especificado y bajo las condiciones indicadas.

El mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM, por sus siglas en inglés) fue desarrollado en un principio por la industria de la aviación comercial de los Estados Unidos, en cooperación con entidades gubernamentales como la NASA y privadas como la Boeing. Desde 1974, el Departamento de Defensa de los Estados Unidos, ha usado el mantenimiento centrado en la confiabilidad como la filosofía de mantenimiento de sus sistemas militares aéreos. El éxito del RCM en el sector de la aviación ha hecho que otros sectores como el de la generación de energía, petróleo, químicos, refinación, gas y la industria manufacturera se interesen en implantar esta filosofía de gestión del mantenimiento, adecuándola a sus necesidades operacionales.

El RCM consiste en analizar las funciones de los activos, ver cuáles son sus posibles fallas, luego preguntarse por los modos o causas de fallas, estudiar sus efectos y analizar sus consecuencias. A partir de la evaluación de las consecuencias es que se determinan las estrategias más adecuadas de mantenimiento, exigiendo que sean técnicamente factibles y económicamente viables.

Un aspecto clave de la metodología del RCM es reconocer que el mantenimiento asegura que un activo continúe cumpliendo su misión de forma eficiente. Desde este punto de vista, el RCM es una herramienta de gestión del mantenimiento, que permitirá maximizar la confiabilidad operacional de los activos a partir de los requerimientos reales de mantenimiento.

El mantenimiento centrado en la confiabilidad pone tanto énfasis en las consecuencias de las fallas como en las características técnicas de las mismas, mediante:

- La integración de una revisión de las fallas operacionales con la evaluación de aspectos de seguridad y amenazas al medio ambiente, esto hace que la seguridad y el medio ambiente sean tenidos en cuenta a la hora de tomar decisiones en materia de mantenimiento.
- Poniendo mucha atención en las tareas del mantenimiento que más incidencia tienen en el funcionamiento y desempeño de las instalaciones, garantizando que la inversión en mantenimiento se utiliza donde más beneficio va a reportar.

Las consecuencias de las fallas en el mantenimiento centrado en la confiabilidad son clasificadas en cuatro categorías:

- Fallas ocultas
- Seguridad y medio ambiente
- Operacionales
- No operacionales

El objetivo principal de RCM está en reducir el costo de mantenimiento para enfocarse en las funciones más importantes de los sistemas, y evitando o quitando acciones de mantenimiento que no son estrictamente necesarias.

Entre las ventajas del mantenimiento centrado en la confiabilidad, se pueden citar las siguientes:²

- Si el RCM se aplicara a un sistema de mantenimiento preventivo ya existente en la empresa, puede reducir la cantidad de mantenimiento rutinario en un porcentaje que va desde el 40% hasta el 70%.
- Si el RCM se aplicara para desarrollar un nuevo sistema de mantenimiento preventivo en la empresa, el resultado sería que la carga de trabajo programada sería mucho menor que si el sistema se hubiera desarrollado por métodos convencionales.
- Su lenguaje técnico es común, sencillo y fácil de entender para todos los empleados vinculados al proceso RCM, permitiendo al personal involucrado en las tareas saber qué pueden y qué no pueden esperar de esta aplicación y quién debe hacer qué para conseguirlo.

2.2.2 Mantenimiento productivo total (TPM)

El mantenimiento productivo total (TPM, por sus siglas en inglés) surgió en Japón gracias a los esfuerzos del Japan Institute of Plant Maintenance (JIPM) como un sistema destinado a lograr la eliminación de lo que actualmente se conoce como “las seis grandes pérdidas de los equipos”, con objeto de poder hacer factible la producción Justo a Tiempo (JIT, por sus siglas en inglés), la cual tiene como objetivos primordiales la eliminación sistemática de desperdicios (Cuatrecasas, 2000).

Estas seis grandes pérdidas se hallan directa o indirectamente relacionadas con los equipos dando lugar a reducciones en la eficiencia del sistema productivo en tres aspectos fundamentales:

1. Tiempos muertos o paro del sistema productivo.
2. Funcionamiento a velocidad inferior a la capacidad de los equipos.
3. Productos defectuosos o malfuncionamiento de las operaciones en un equipo.

El resultado final que se persigue con la implementación del mantenimiento productivo total es lograr un conjunto de equipos e instalaciones productivas más eficientes, una reducción de las inversiones necesarias en ellos y un aumento de la flexibilidad del sistema productivo.

El objetivo del mantenimiento de máquinas y equipos se puede definir como conseguir un determinado nivel de disponibilidad de producción en condiciones de calidad exigible, a costo mínimo y con el máximo de seguridad para el personal que los utiliza y mantiene.

Por disponibilidad se entiende la proporción de tiempo en que la máquina está dispuesta para la producción respecto al tiempo total. Esta disponibilidad depende de dos factores críticos:

² Mantenimiento, reliability y confiabilidad – RCM. Página web: solomantenimiento.com. Consultada en Mayo de 2007.

1. La frecuencia de las fallas, y
2. El tiempo necesario para repararlas.

El primero de dichos factores recibe el nombre de *confiabilidad*. El segundo factor, denominado *mantenibilidad*, está representado por una parte de la bondad del diseño de las instalaciones y por otra parte de la eficacia del servicio de mantenimiento. Se calcula como el inverso del tiempo medio de reparación de una falla.

$$\text{Mantenibilidad} = \frac{1}{\text{Tiempo promedio de reparación}}$$

En consecuencia, un adecuado nivel de *disponibilidad* se alcanzará con unos óptimos niveles de *confiabilidad* y de *mantenibilidad*. Es decir, expresado en lenguaje corriente, que ocurran pocas fallas en los equipos y que cuando éstas ocurran, se reparen rápidamente.

El TPM incorpora una serie de nuevos conceptos a los desarrollados en los métodos de mantenimiento vistos previamente, entre los cuales cabe destacar el Mantenimiento Autónomo, el cual es ejecutado por los propios operadores de las máquinas.

El mantenimiento autónomo es básicamente la prevención del deterioro de los equipos y componentes de los mismos. Es llevado a cabo por los operadores y preparadores del equipo e incluye:

- Limpieza diaria de la maquinaria, que se tomará como un proceso de inspección.
- Inspección de los puntos claves del equipo, en busca de fugas, fuentes de contaminación, exceso o defecto de lubricación, etc.
- Lubricación básica periódica de los puntos claves del equipo.
- Pequeños ajustes.
- Formación y capacitación técnica.
- Reportar todas las fallas que no puedan repararse en el momento de su detección y que requieren una programación para solucionarse.

El TPM constituye un nuevo concepto en materia de mantenimiento, basado en los siguientes cinco principios fundamentales:

1. Participación de todo el personal, desde la alta dirección hasta los operarios de planta.
2. Creación de una cultura corporativa orientada a la obtención de la máxima eficiencia en el sistema de producción y gestión de maquinaria y equipos.
3. Implantación de un sistema de gestión de las plantas productivas tal que se facilite la eliminación de las pérdidas antes de que éstas se produzcan.
4. Implantación del mantenimiento preventivo como medio básico para alcanzar el objetivo de cero pérdidas mediante actividades integradas en pequeños grupos de trabajo, apoyados en el soporte que proporciona el mantenimiento autónomo.
5. Aplicación de los sistemas de gestión de todos los aspectos de la producción, incluyendo diseño y desarrollo, ventas y dirección.

La aplicación del TPM garantiza a las empresas resultados en cuanto a la mejora de la productividad de los equipos, mejoras corporativas, mayor capacitación del personal y transformación del puesto de trabajo.

Entre los objetivos fundamentales del TPM se tienen:

- Reducción de averías en los equipos.
- Reducción del tiempo de espera y de preparación de los equipos.
- Utilización eficaz de los equipos existentes.
- Control de la precisión de las herramientas y equipos.
- Promoción y conservación de los recursos naturales y economía de energéticos.
- Formación y entrenamiento del personal.

2.3 Estrategias del mantenimiento

Un aspecto básico en la selección del tipo de mantenimiento que se debe utilizar en una empresa determinada está relacionado con el tipo de fallas que se espera ocurran en los equipos. A este respecto, se pueden clasificar la ocurrencia de las fallas en tres categorías:

1. Fallas repentinas que ocurren en un lapso de tiempo extremadamente corto.
2. Fallas de desarrollo progresivo en un intervalo de tiempo predecible.
3. Fallas de desarrollo progresivo en un intervalo de tiempo aleatorio.

Los principios de mantenimiento preventivo y predictivo asumen que la falla se va a desarrollar progresivamente. El mantenimiento preventivo asume, además, que la falla se desarrollará de manera uniforme para justificar los intervalos regulares de intervención. El mantenimiento predictivo, a su vez, asume que la falla se desarrollará progresivamente para justificar el concepto de tendencia. Aunque lo anterior es lo que sucede generalmente, hay ocasiones en las que fallas repentinas tienden a ocurrir con mayor frecuencia que las fallas progresivas. Por ejemplo, en los molinos de carbón que producen combustible pulverizado para centrales de energía, la ocasional ingesta de piezas de metal o rocas muy duras, puede causar repentinas roturas de los elementos internos del molino. Esto puede ocurrir con más frecuencia que las fallas progresivas que ocurren en la transmisión. Cuando sucede, la única solución es utilizar una estrategia de mantenimiento correctivo. Cualquier programa basado en intervalos regulares de tiempo sería ilógico.

Hay, en cambio, situaciones en las que el mantenimiento preventivo regular es la mejor estrategia, tal como cuando el deterioro de elementos en la máquina tiene un desarrollo progresivo regularmente constante. Un ejemplo típico es el cambio de filtro de aceite en los autos.

A pesar de los casos excepcionales citados anteriormente, la tendencia general actual del mantenimiento es hacia una estrategia basada en la condición de la máquina. Sin embargo, debe tenerse presente que la estrategia de mantenimiento más eficaz será un

programa combinado y ponderado de los diferentes tipos de mantenimiento existentes basado en un análisis de criticidad de los equipos de cada planta industrial o empresa.

Otro aspecto básico a considerar en la selección de una estrategia de mantenimiento es el aspecto económico. Para establecer si es económicamente ventajosa utilizar una estrategia de mantenimiento predictivo para una o más máquinas o elementos de ella o de ellas, deberá llevarse a cabo un análisis beneficio/costo. Sin embargo, evaluar los posibles ahorros o beneficios que se obtendrían en la implementación de una estrategia de mantenimiento predictivo es difícil. Por ejemplo, si no se ha producido una falla catastrófica en una máquina, es difícil evaluar lo que se ahorraría si se evita que aquella se produzca.

Una forma en la que se podría evaluar los ahorros que se obtendrían al implementar una estrategia de mantenimiento predictivo es elaborando una lista de las fallas producidas en los últimos años, así como sus consecuencias. Con esto se podría determinar:

- Cuáles intervenciones podrían haber resultado más económicas si se hubieran detectado las fallas en una etapa temprana, evitando que la máquina funcionara hasta la rotura.
- Qué fallas podrían haber sido reparadas más rápidamente si se hubiese sabido bien antes de abrir la máquina. Cuál era el elemento defectuoso.
- Cuáles serían los ahorros si después de efectuado un mantenimiento, se controla la calidad del mantenimiento realizado. Para esto se evalúa la condición en que quedó la máquina a través de mediciones realizadas inmediatamente después de la reparación.

Es importante considerar que la productividad de una empresa, ya sea de bienes o servicios, aumentará en la medida que las fallas en las máquinas disminuyan de una forma sustentable en el tiempo. Para lograr lo anterior, resulta indispensable contar con la estrategia de mantenimiento más apropiada y con personal capacitado tanto en el uso de las técnicas de análisis y diagnóstico de fallas como también con conocimiento suficiente sobre las características de diseño y funcionamiento de las máquinas.

La calidad se ha convertido en uno de los factores de decisión más importantes de los consumidores para elegir entre productos y servicios que compiten. El fenómeno es generalizado, sin importar si el consumidor es un individuo, una organización industrial o una tienda minorista. Por consiguiente, entender y mejorar la calidad es un factor clave que lleva al éxito de los negocios, al crecimiento y a una posición competitiva fortalecida. Es precisamente en este renglón donde el mantenimiento se erige como pieza clave para el logro de los objetivos de la empresa.

Herramientas y metodología de la calidad

Hay muchas formas de definir la calidad. El concepto de calidad que se forma la mayoría de las personas se relaciona con una o más características deseables que debería poseer un producto o servicio. Octavio Estrada, en su cátedra, ofrece una definición muy atinada del concepto de calidad: “Enfoque holístico, estratégico, sistemático y participativo para identificar, anticipar y satisfacer las necesidades de los clientes internos y externos en forma continua y sujeto a los recursos limitados con los que se cuenta”.

Para entender, definir y mejorar la calidad de los productos y/o servicios que produce una empresa, existen muchas herramientas administrativas y de control, algunas de las cuales se enuncian a continuación.

3.1 El ciclo de Deming

En un principio, se llamó ciclo Shewhart por su fundador original, Walter Shewhart, pero en 1950 los japoneses cambiaron su nombre por el de Ciclo Deming. El ciclo Deming está integrado por cuatro etapas: Planear, hacer, estudiar y actuar, como se ilustra en la figura 3.1. La tercera etapa, *estudiar*, antes se llamaba *revisar*, pero Deming hizo el cambio en 1990 (Evans, 2005). Estudiar es más apropiado, porque con una revisión solamente se podría pasar por alto una parte importante del problema. Sin embargo, muchas personas siguen utilizando el término “revisar”.

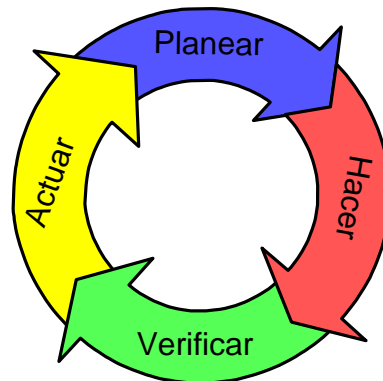


Figura 3.1 Ciclo de Deming.

La etapa de *planeación* consiste en estudiar la situación actual y describir el proceso: sus insumos, resultados, clientes y proveedores; expectativas del cliente; identificación de problemas; prueba de teorías sobre las causas y desarrollo de soluciones, forma de

recopilación de datos y planes de acción. En la etapa de *hacer*, se implementa el plan a manera de prueba, para evaluar una solución propuesta y proporcionar datos objetivos. Los datos del experimento se recopilan y registran.

La etapa de *estudio* determina si el plan tentativo funciona en forma correcta mediante la evaluación de los resultados, estableciendo si es necesario tomar en cuenta otros aspectos u oportunidades e identificando qué se ha aprendido. En la última etapa, *actuar*, las mejoras se estandarizan y el plan final se implementa como una “mejor práctica actual”. Posteriormente, este proceso lleva otra vez a la etapa de planeación para la identificación de otras oportunidades de mejora.

Las etapas anteriores se pueden, a su vez, dividir en ocho pasos (Gutiérrez Pulido, 2004):

Planear

1. Seleccionar y caracterizar el problema, delimitarlo y describirlo, estudiar sus antecedentes e importancia y cuantificar su magnitud actual.
2. Buscar todas sus causas posibles.
3. Investigar cuáles de las causas son más importantes.
4. Elaborar un plan de medidas enfocado a remediar las causas más importantes. Para cada acción, detallar en qué consiste, su objetivo y cómo implementarla, responsable, fechas de entrega y costos.

Hacer

5. Implementar las medidas de remedio siguiendo el plan y en pequeña escala.

Estudiar

6. Revisar los resultados obtenidos y comparar el problema antes y después.

Actuar

7. Prevenir la recurrencia. Si las acciones dieron resultado, éstas deben generalizarse y estandarizar su aplicación.
8. Conclusión y evaluación de lo hecho y su correspondiente documentación.

Esta metodología puede aplicarse en cualquier área de las empresas. La importancia de que se siga una metodología de solución bien estructurada radica en que de esa forma los esfuerzos de mejora pueden lograr mejores resultados debido a que,

- En lugar de atacar efectos y síntomas, se trata de llegar a las causas de fondo de los problemas.
- Se sigue un plan de solución soportado en métodos y herramientas de análisis.
- Permite enfocarse en lo importante.
- Exige que cuando se logren soluciones, se estandarice su aplicación y se decidan medidas preventivas para que el problema no se vuelva a presentar.
- Se verifica que las soluciones realmente hayan dado resultado.

3.2 Las siete herramientas básicas de la calidad

3.2.1 Diagrama de flujo del proceso

El diagrama de flujo o mapa de proceso es una representación gráfica que identifica la secuencia de actividades o flujo de materiales e información en un proceso para generar un producto o servicio para un cliente, ya sea interno o externo. Los diagramas de flujo ayudan a entender mejor el proceso y con mayor objetividad, al ofrecer un panorama de los pasos necesarios para realizar una tarea.

Existen estándares acerca de las figuras a utilizar en un mapa y el significado de las mismas; sin embargo, es complejo definir niveles de detalle y principalmente, lograr de forma rápida y sencilla la aceptación del mapa en las diferentes jerarquías de la organización.

Esto se debe a que cuando se representan los procesos, existe el riesgo de obtener tres versiones totalmente diferentes del mismo proceso:

- La versión “como se cree” que es el proceso.
- La versión “como debe ser” el proceso.
- La versión “como es” el proceso realmente.

Las opciones mencionadas pueden generar polémica al momento de verificar los mapas con el resto del equipo, generando re-trabajos innecesarios además de verificaciones continuas.

Para construir un diagrama de flujo de proceso, se puede utilizar la simbología que se muestra en la figura 3.2.

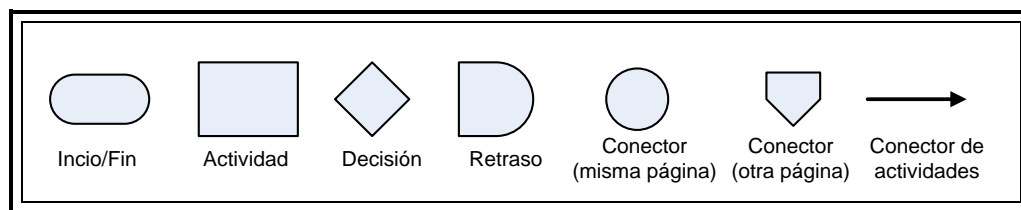


Figura 3.2. Bloques básicos para la construcción de un diagrama de flujo de proceso.

El procedimiento de construcción del diagrama se enumera a continuación:

1. Definir el proceso a ser mapeado. Escribir su título en la parte superior de la superficie de trabajo.
2. Discutir y definir los límites del proceso. Dónde empieza y dónde termina. Determinar el nivel de detalle con que se elaborará.

3. A través de un proceso de lluvia de ideas, escribir las actividades del proceso en un “post-it”. La secuencia no es importante en este punto, aunque pensar en ella puede ayudar a recordar todos los pasos.
4. Arreglar las actividades en la secuencia apropiada.
5. Cuando todas las actividades están incluidas y los participantes están de acuerdo en que ésta es la secuencia correcta, dibujar flechas para mostrar el flujo del proceso.
6. Revisar el mapa del proceso con otras personas involucradas en el mismo (operadores, supervisores, clientes, proveedores, etc.) para ver si ellos consideran que el proceso está dibujado correctamente.

Con la finalidad de que el diagrama sea lo más útil posible, es importante incluir la mayor cantidad de información con relación al proceso: Actividades críticas para la calidad (CTQ), tiempo de ciclo, costos, personal involucrado, responsables, insumos, etc.

Los mapas de proceso pueden ser tan complejos que sólo el creador sea capaz de descifrar su representación, sin embargo, el objetivo debe ser que cualquier persona conozca las actividades realizadas para obtener el bien o servicio; bajo este concepto, se busca hacer una representación sencilla de seguir y leer en todo momento. Así pues, si se arreglan las actividades por niveles de detalle en vez de una línea continua, se obtiene legibilidad y comprensión para cualquier persona aún no relacionada con el proceso. Bajo este concepto, se puede entonces visualizar a cada proceso como una serie de subprocesos o actividades más detalladas y éstos subprocesos o actividades a su vez, se pueden observar como otros subprocesos o actividades. Lo anterior se muestra en la figura 3.3.

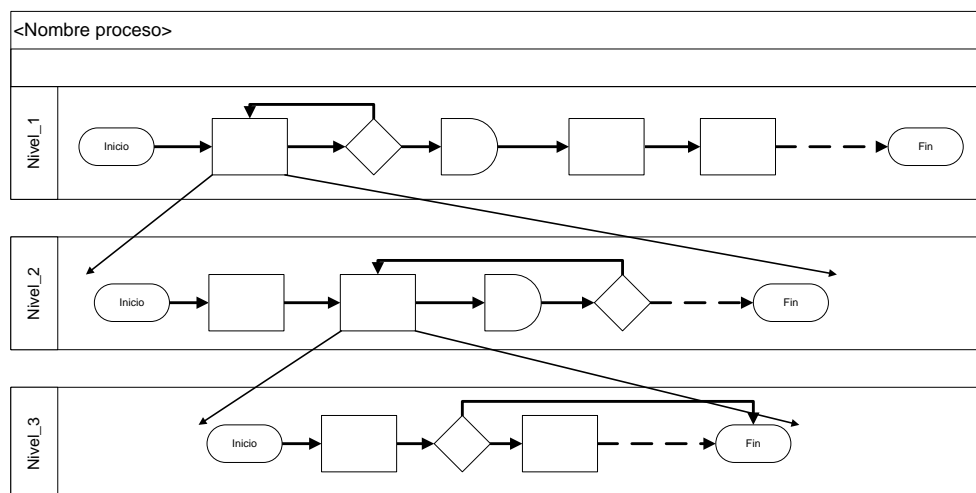


Figura 3.3. Estructura de niveles en los mapas de proceso.

Rodrigo Carrillo, en su *Manual para Mapeo de Procesos*, afirma que “para determinar la cantidad adecuada de niveles es necesario definir el objetivo del mapeo, esto es, si se requiere documentar un proceso a nivel manual de usuario, se recomienda llegar hasta

el nivel operativo que muestre las aplicaciones (sistemas, plataformas, etc.) y actividades detalladas de cada subproceso, esto usualmente se visualiza en mapas de nivel 3 o 4 (procesos hijo); si el objetivo es entender de forma general el proceso, se recomienda solamente abrir las actividades representadas en el nivel 1 (proceso padre o principal), dado que así evitamos entrar en tecnicismos propios de la operación. De igual manera, recomienda que para que un proceso sea legible debería tener un mínimo de tres actividades y un máximo de siete”.

3.2.2 Hoja de verificación

La hoja de verificación es un formato construido para coleccionar datos de forma que su registro sea sencillo, sistemático y de fácil análisis. Una característica que debe reunir una buena hoja de verificación es que visualmente se pueda hacer un primer análisis que permita apreciar las principales características de la información buscada.

La recolección de datos debe efectuarse de manera cuidadosa y exacta. Lo esencial en materia de datos es tener claro el objetivo y que los datos reflejen la realidad. Por más esmero que se ponga en el análisis de datos incorrectos, el resultado carecerá de todo sentido (Ishikawa, 1976).

Para construir una hoja de verificación, se pueden seguir las siguientes recomendaciones (Gutiérrez Pulido, 2004):

1. Determinar qué situación es necesario evaluar, sus objetivos y el propósito que se persigue. A partir de lo anterior, definir qué tipo de datos o información se requiere.
2. Establecer el periodo durante el cual se obtendrán los datos.
3. Diseñar el formato apropiado. Cada hoja de verificación debe llevar la información completa del origen de los datos: fecha, turno, máquina, proceso, quién toma los datos. Se debe buscar mejorar continuamente los formatos de registro de datos, para que cada día sean más claros y útiles.

3.2.3 Histograma

El histograma es una gráfica de barras que muestran la frecuencia o número de observaciones de un valor en particular o de un grupo específico. Su objetivo es visualizar el centrado, la dispersión y la forma de un grupo de datos.

Para construir un histograma de frecuencias, se pueden seguir los siguientes pasos:

1. Contar el total de datos (n).
2. Obtener la amplitud o rango al restar el valor más pequeño (x_S) del más grande (x_L). Es decir $R = x_L - x_S$.
3. Se puede dividir la amplitud de los datos (R) en clases e investigar, por conteo directo, cuántos datos pertenecen a cada clase. La cantidad de clases (la

cantidad de barras del histograma) puede determinarse tomando como base la tabla 3.1. Una buena aproximación también se logra si se obtiene la raíz cuadrada del número total de datos (número de clases $K = \sqrt{n}$), cuando éstos son menores de 500.

Cantidad de datos (N)	Cantidad de clases (K)
Menos de 50	5 – 7
50 – 100	6 – 10
100 – 250	7 – 12
Más de 250	10 - 20

Tabla 3.1 Estimación del número de clases del histograma.
Fuente: Ishikawa, K. *Guía de control de calidad* (1976)

4. El intervalo de clase (h) se obtiene al dividir la amplitud (R) entre la cantidad de clases (K): $h = R/K$.
5. Se recomienda, por facilidad, que el intervalo de clase, h, sea múltiplo o submúltiplo de un número redondeado. Por ejemplo, si como resultado de la división R entre K se obtuvo un resultado de 0.356, se puede considerar que h es igual a 0.04 o 0.05, según sea más sencillo.
6. Los valores que limitan las clases, se fijan comenzando en el extremo inferior x_S , o un poco antes. El problema que se plantea cuando los valores reales caen sobre el límite de la clase puede evitarse, si se dejan los intervalos cerrados por un extremo y abiertos por el otro ($x_S \leq x < x_L$).
7. En el eje de las abscisas se grafican las marcas de clase y en el eje de las ordenadas, los valores de frecuencia para cada intervalo de clase.

Una vez construido el histograma, por pura inspección es posible contestar preguntas como las siguientes:

- ¿Cuál es la forma de la distribución?
- ¿Cuál es el dato o conjunto de datos que más se repite?
- ¿Qué tan grande es la dispersión?
- ¿La distribución es simétrica?
- ¿La distribución es sesgada?
- ¿Hay barras aisladas?
- ¿Hay sólo un pico o, tiene varios?

En la figura 3.4 se muestra un ejemplo de la forma que puede tener un histograma.

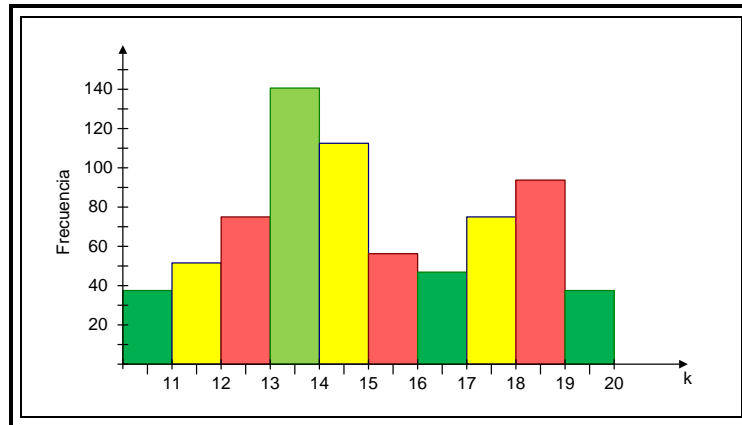


Figura 3.4 Ejemplo de histograma.

Si se leen y utilizan los histogramas en forma adecuada, contestando las preguntas anteriores, los problemas se pondrán rápidamente en evidencia y los datos tendrán mucho mayor sentido que el de una simple hilera de cifras. Sin embargo, el histograma no permite que se identifiquen datos individuales, debido a que es imposible distinguir todas las observaciones que conforman los datos de una clase.

3.2.4 Diagrama de Pareto

El diagrama de Pareto es una variación del histograma para datos categóricos. Separa con claridad los pocos elementos vitales de los muchos triviales y ofrece una dirección para seleccionar los proyectos a fin de mejorar. Es un método para organizar errores, problemas o defectos con el propósito de ayudar a enfocar los esfuerzos para la solución de problemas.

La viabilidad y utilidad general del diagrama está respaldada por el llamado “Principio de Pareto”, conocido como Ley 80-20 o “Pocos vitales y muchos triviales”, el cual reconoce que unos pocos elementos (20%) generan la mayor parte del efecto (80%), y el resto de los elementos generan muy poco del efecto total. El nombre del principio es en honor al economista Wilfredo Pareto (1843–1923), quien concluyó que pocas personas (20%) poseían gran parte de los bienes (80%). Fue Joseph Juran, quien identificó que el principio de Pareto se aplicaba a la mejora de la calidad (Wadsworth , 2005).

Para construir un diagrama de Pareto, se pueden seguir los siguientes pasos:

Paso 1.

Decidir y delimitar el problema o área de mejora que se va a atender.

Paso 2.

Con base en lo anterior, definir el tipo de datos que se van a necesitar y la manera de obtenerlos, así como el periodo de tiempo que se pretende ilustrar en el gráfico.

Paso 3.

Sumar la frecuencia de cada rubro en el periodo fijado. El total de cada rubro queda especificado por la longitud de la barra.

Paso 4.

En el eje de las abscisas, se grafican los rubros en estudio, colocando en primer lugar aquel que tenga la mayor frecuencia, luego el siguiente y así sucesivamente, de forma que el apartado más frecuente aparezca en el extremo izquierdo. Cuando hay muchos rubros de baja frecuencia, se pueden agrupar en un apartado llamado "Otros".

Paso 5.

Trazar una línea quebrada para indicar sobre el gráfico el total acumulado de cada rubro.

Paso 6.

Agregar los datos suficientes para dejar perfectamente claro el origen y objetivo del diagrama: Nombre, método de inspección, piezas inspeccionadas, total de defectos, productos defectuosos, etc. El origen de los datos debe ser claro. En la figura 3.5, se muestra un diagrama de Pareto terminado.

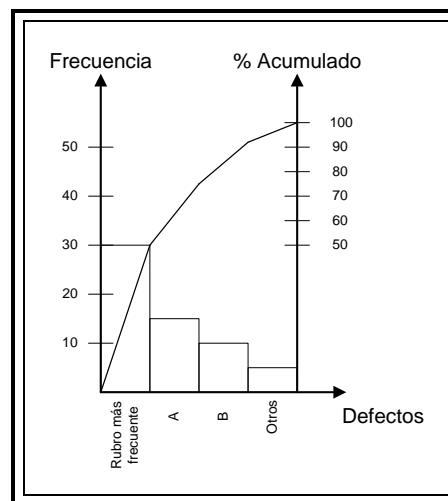


Figura 3.5. Diagrama de Pareto.

Lo que sigue es no precipitarse en sacar conclusiones del primer diagrama de Pareto, ya que al actuar reactivamente y precipitarse, podrían obtenerse conclusiones erróneas. En general, la técnica sugiere que después de hacer un primer Pareto, en el que se detecte el problema principal, se debe hacer un análisis de Pareto para causas o de segundo nivel, en el que se estratifica el defecto más importante o fuente de variación que de indicios de dónde, cuándo o bajo qué circunstancias se manifiesta más el defecto principal.

La gran ventaja de los diagramas de Pareto es que muestran cuáles son los factores más importantes en los cuales corresponde, por tanto, concentrar la atención.

La experiencia ha demostrado que es más fácil reducir a la mitad una barra alta que reducir a cero una barra corta. Dicho diagrama constituye un instrumento indispensable para saber exactamente qué objetivo seleccionar a fin de concentrar en él los esfuerzos de mejora. Por esa razón, el diagrama de Pareto constituye el primer paso para efectuar mejoras.

El diagrama de Pareto elimina la vaguedad en la magnitud de los problemas y proporciona una medición objetiva expresable en términos gráficos, por lo que sirve para evaluar objetivamente las mejoras logradas comparando la situación antes y después del proyecto de mejora.

3.2.5 Diagrama causa – efecto

El diagrama causa-efecto, diagrama de Ishikawa o diagrama de espina de pescado, es un método gráfico que relaciona un problema o efecto con los factores o causas que posiblemente lo generan. La importancia de este diagrama radica en que obliga a contemplar todas las causas que pueden afectar el problema bajo análisis y, de esta forma, se evita el error de buscar directamente las soluciones sin cuestionar a fondo cuáles son las verdaderas causas. De esta manera, el diagrama de Ishikawa, ayuda a no dar por obvias las causas, sino que obliga a que se vea el problema desde otras perspectivas.

Los pasos para elaborar un diagrama de causa-efecto se enumeran a continuación.

Paso 1.

Decidir el problema que se desea analizar. Éste se coloca como cabeza del pescado en el diagrama. Se debe incluir una medida numérica para el efecto, a fin de determinar el grado de mejora logrado después de tomar acciones (figura 3.6).

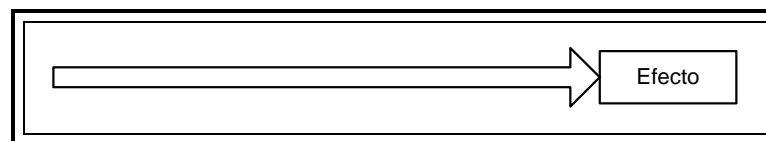


Figura 3.6 Colocación del problema a analizar en el diagrama causa-efecto.

Paso 2.

Reunir al personal relacionado con el problema para una sesión de lluvia de ideas con objeto de elegir las causas que influyen en el efecto. Indicar los factores más generales en grupos tales como Materiales, Maquinaria, Método de trabajo, Método de medición, Mano de obra y Medio ambiente. Cada grupo formará una rama en la figura 3.7. A este tipo de agrupación se le conoce como el método de las seis M's (6M) y actualmente es el más utilizado.

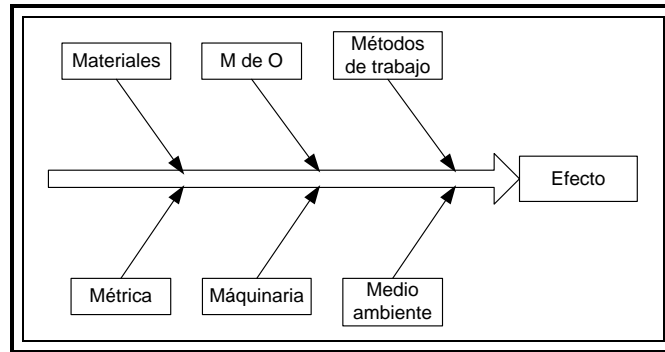


Figura 3.7 Método de las 6M en un diagrama causa-efecto.

Paso 3.

Incorporar en cada una de estas ramas los factores detallados que se pueden considerar causas, éstas formarán las ramificaciones menores. En cada una de ellas añadir factores aún más detallados. Se recomienda usar valores numéricos tanto como sea posible. En este paso es importante tomar cada rama como un efecto e ir agregando causas, mismas que se convertirán en efectos hasta que las causas no tengan sentido. Es recomendable llegar hasta un nivel tres. En el libro *Guía de control de calidad* de Kaoru Ishikawa (1976), se muestra un ejemplo en este sentido, mismo que se reproduce para una mejor comprensión.

1. ¿Por qué hay defectos en el proceso de producción? Debido a la oscilación de la máquina.
2. ¿Por qué hay oscilación en la máquina? Por la dispersión de los materiales.
3. ¿Por qué existe dispersión en los materiales? A causa de la vibración en el soporte del eje G.
4. ¿Por qué hay vibración en el soporte G? A raíz de la dispersión en el tamaño del soporte.
5. ¿Por qué hay dispersión en el tamaño del soporte del eje G? Debido a las variaciones en las mediciones.

De este modo, se va ampliando el diagrama de causa-efecto hasta que contenga todas las causas de dispersión. En la figura 3.8 se muestra el diagrama completo.

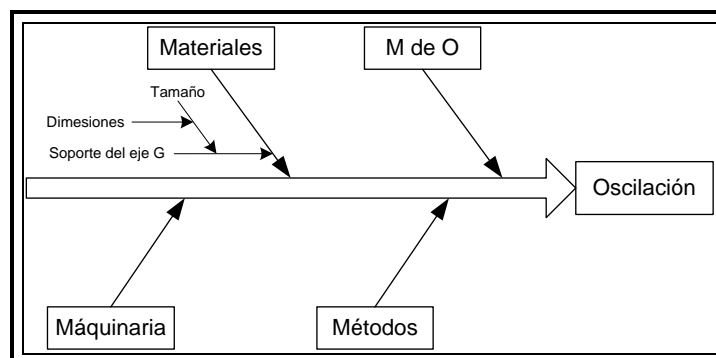


Figura 3.8 Diagrama causa-efecto.
Fuente: Ishikawa, K. *Guía de control de calidad*

Paso 4.

Por último, es preciso verificar que todos los factores que pueden causar dispersión estén incluidos en el diagrama. Si lo están, y si han quedado adecuadamente ilustradas las relaciones entre causas y efectos, el diagrama está completo.

En situaciones en que las causas no son obvias, el diagrama causa-efecto es una herramienta formal que con frecuencia es de utilidad para dilucidar las causas potenciales. Un diagrama bien hecho puede servir como ayuda efectiva para corregir problemas. Además, la construcción del diagrama, como una experiencia de equipo, tiende a comprometer a las personas para atacar el problema en vez de señalar culpables.

3.2.6 Diagrama de dispersión

Un diagrama de dispersión es una gráfica del tipo X - Y cuyo objetivo es analizar la forma en que dos variables numéricas están relacionadas. Sobre la posible relación causa-efecto, se debe tener en cuenta que el hecho de que las dos variables estén relacionadas no necesariamente implica que una sea causa de la otra, ambas pueden depender de una tercera causa o, incluso pudiera existir una relación aparente pero que no es causal. El usuario es quien deberá tomar esa pista para investigar a qué se debe tal relación. Quien interprete el diagrama de dispersión debe tomar en cuenta que algunas de las razones por las que las variables X y Y aparecen relacionadas de manera significativa son:

- X influye sobre Y.
- Y influye sobre X.
- X y Y interactúan entre sí.
- Una tercera variable Z influye sobre ambas, y es la causante de tal relación.
- X y Y actúan en forma similar debido al azar.
- X y Y aparecen relacionadas debido a que la muestra no es representativa.

Los datos se colectan por pares de las dos variables (x_i, y_i) , para $i = 1, 2, 3, \dots, n$. Después se grafica cada y_i contra la x_i correspondiente. La forma del diagrama de dispersión suele indicar el tipo de relación que puede existir entre las dos variables.

La página web de la American Society for Quality (www.asq.com), establece los pasos necesarios para construir un diagrama de dispersión:

1. Recolectar los pares de datos que se sospecha están relacionados.
2. Dibujar una gráfica con la variable independiente en el eje X y la variable dependiente en el eje Y. Para cada par de datos, colocar un símbolo donde el eje X interseque al eje Y. Si dos puntos caen juntos, dibujarlos uno al lado del otro tocándose, para que se puedan ver ambos.
3. Observar el patrón de puntos para ver si la relación es obvia. Si los datos forman claramente una recta o una curva definida, detenerse. Las variables están relacionadas. Se puede proceder a hacer un análisis de regresión o correlación.

4. Si la relación es poco clara o se sospecha, dividir los puntos en la gráfica en cuatro cuadrantes. Si hay n puntos en la gráfica,
 - Contar n/2 puntos de arriba hacia abajo y dibujar una línea horizontal.
 - Contar n/2 puntos de izquierda a derecha y dibujar una línea vertical.
 - Si el número de puntos es impar, dibujar la línea a través del punto medio.
5. Contar los puntos en cada cuadrante.
6. Sumar los cuadrantes en diagonales opuestas:
7. A = puntos en el superior izquierdo + puntos en el inferior izquierdo.
8. B = puntos en el superior derecho + puntos en el inferior derecho.
9. Obtener el valor de Q como:

$$Q = \min \{A, B\}$$

10. Observar el valor del límite para n en la tabla de prueba de tendencia (tabla 8).
 - Si Q es menor que el límite, las variables están relacionadas.
 - Si Q es mayor o igual que el límite, el patrón de puntos podría haber ocurrido por azar.

N	Limit	N	Limit
1-8	0	51-53	18
9-11	1	54-55	19
12-14	2	56-57	20
15-16	3	58-60	21
17-19	4	61-62	22
20-22	5	63-64	23
23-24	6	65-66	24
25-27	7	67-69	25
28-29	8	70-71	26
30-32	9	72-73	27
33-34	10	74-76	28
35-36	11	77-78	29
37-39	12	79-80	30
40-41	13	81-82	31
42-43	14	83-85	32
44-46	15	86-87	33
47-48	16	88-89	34
49-50	17	90	35

Tabla 3.2 Tabla de prueba de tendencia.
Fuente: www.asq.com

A continuación, en la figura 3.9, se muestra un ejemplo de un diagrama de dispersión.

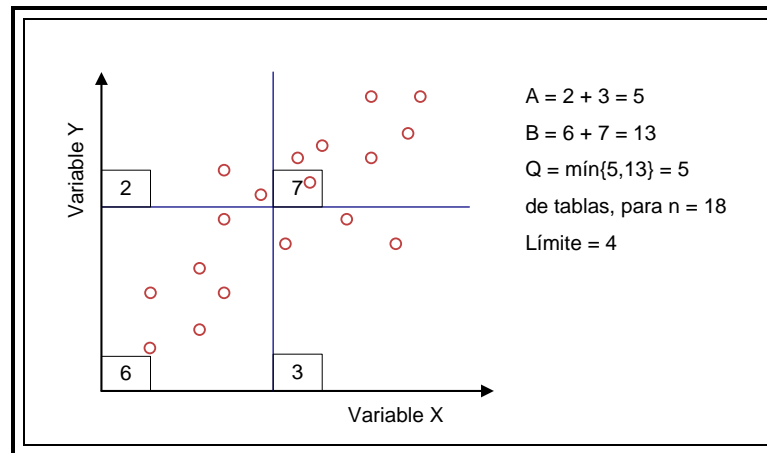


Figura 3.9. Diagrama de dispersión.
Fuente: www.asq.com

En la figura pareciera haber una tendencia, sin embargo, como se puede observar, Q ($Q = 5$) es mayor que el límite (límite = 4) por lo que el patrón de puntos se pudo deber al azar.

3.2.7 Gráficas de control

Las gráficas de control son herramientas estadísticas que muestran el comportamiento de cierta característica de calidad de un proceso con respecto al tiempo. Su objetivo es evaluar, controlar y mejorar los procesos.

El concepto fundamental de las gráficas de control es el de las causas de variación de un proceso. Éstas se clasifican en causas comunes y causas especiales. La variación por causas comunes es la que permanece cada día y en todos los lotes, es inherente a las actuales características del proceso. Es el efecto acumulado de muchas causas pequeñas y en esencia inevitables, se le conoce como “ruido de fondo” (Montgomery, 2006). La variación por causas especiales es causada por circunstancias especiales que no son permanentes en el proceso, por ejemplo la falla ocasionada por el mal funcionamiento de una pieza de la máquina, máquinas desajustadas, diferencias entre trabajadores, etcétera.

Un proceso que trabaja sólo con causas comunes de variación está bajo control estadístico, es decir, su variación a través del tiempo es estable y, por lo tanto, su comportamiento es predecible en el futuro inmediato. Un proceso en el que están presentes causas especiales de variación está fuera de control estadístico, es decir, su variación a través del tiempo es inestable y, por lo tanto, su comportamiento es impredecible en el futuro inmediato (Gutiérrez Pulido, 2004).

No distinguir entre estos dos tipos de variabilidad lleva a cometer dos errores en la actuación sobre los procesos. Error tipo I (α): reaccionar ante un cambio o variación como si proviniera de alguna causa especial cuando en realidad surge de las causas

comunes en el proceso. Error tipo II (β): tratar un efecto o cambio como si proviniera de causas comunes cuando en realidad se debe a una causa especial.

Cada uno de estos dos errores produce una pérdida en el proceso. Se puede evitar uno u otro, pero no los dos. Tampoco es posible reducir a cero ambos errores. Lo mejor que se puede hacer es tratar de cometer rara vez ambos, y para ello fueron ideadas las gráficas de control por Walter Shewhart en 1924. En la figura 3.10 se muestra una gráfica de control típica con los elementos que la conforman.

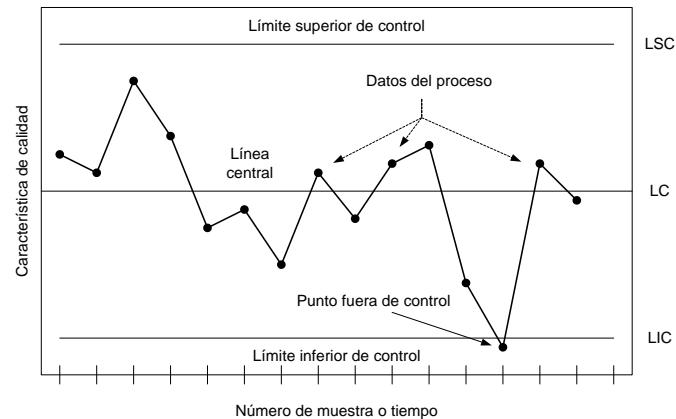


Figura 3.10 Gráfica de control típica.

Existen dos tipos generales de gráficas de control: para variables y para atributos. Las gráficas de control para variables se aplican a características de calidad de tipo continuo, que intuitivamente son aquellas que requieren un instrumento de medición (peso, volumen, voltaje, longitud, etcétera). Las gráficas de control para variables tipo Shewhart más comunes son:

- Gráficas de promedios y rangos.
- Gráficas de promedios y desviaciones estándar.
- Gráficas de lecturas individuales.

Existen muchas características de calidad que no son medidas con un instrumento de medición en una escala continua o numérica. En estos casos, el producto se juzga conforme o no conforme, dependiendo de si posee o no ciertos atributos; o también al producto se le podrá contar el número de defectos o no conformidades que tiene. Las gráficas de control para atributos son:

- Gráfica p: Proporción de artículos defectuosos.
- Gráfica np: Número de unidades defectuosas con n constante.
- Gráfica c: Número de defectos en una muestra con n constante.
- Gráfica u: Número de defectos por unidad.

Los parámetros típicos de una gráfica de control son: (1) el tamaño de la muestra, n, el cual se recomienda que sea de 4 o 5 piezas y (2) el número de muestras, de los que se

prefieren veinte subgrupos con $n=5$ o 25 subgrupos con $n=4$. Es decir, cien observaciones individuales (Escalante, 2007).

Las muestras se seleccionan de tal forma que las piezas sean lo más uniforme entre sí. Esto se logra, en general, tomando piezas consecutivas fabricadas en el mismo periodo. La razón para hacerlo así es para que cada muestra refleje la variación natural del proceso (causas comunes), y para que entre muestras se enfatizen sus diferencias, por ejemplo, diferentes lotes, trabajadores, ajustes, etcétera.

La variación natural determina el ancho de los límites de control. La variación entre las muestras será debida a las fluctuaciones naturales además de las causas especiales, en caso de existir. Si existen causas especiales de variación dentro de cada muestra, esto inflará artificialmente la variación del proceso y los límites de control estarán más separados entre sí, con la posible consecuencia de permitir mayores cambios en el proceso sin considerarlos como fluctuaciones fuera de control. En el anexo A.1 de este trabajo se muestran las fórmulas para calcular la línea central y los límites de control para los diferentes gráficos de control antes mencionados.

3.3 Otras herramientas

3.3.1 Análisis de modo y efecto de falla (AMEF)

El análisis de modo y efecto de falla es una herramienta para identificar los modos potenciales de falla dentro de un proceso y priorizarlos con base en su severidad, frecuencia de ocurrencia y probabilidad de detección cuando la falla se presenta.

La frecuencia con que ocurren las fallas, junto con su severidad, son una medida de la confiabilidad de un sistema. Mientras más grandes sean éstas, menor será tal confiabilidad. Por lo tanto, una tarea fundamental cuando se busca caracterizar y mejorar un proceso es aplicar la metodología del AMEF con la idea de conocer mejor las debilidades (modos potenciales de falla) del producto o proceso y a partir de ahí generar soluciones a nivel de proceso o rediseño del producto (Gutiérrez Pulido, 2004).

El AMEF puede ser de diseño (DAMEF) o de proceso (AMEF). Este trabajo sólo hace referencia al análisis de modo y efecto de falla de procesos debido a que se analizan las fallas potenciales de equipos que ya fueron diseñados y están en operación.

Los pasos para realizar un AMEF pueden ser (Escalante, 2007);

1. Seleccionar el equipo.
2. Elaborar un diagrama de bloques o diagrama de flujo del proceso.
3. Obtener datos de fallas (modos potenciales de falla).
4. Analizar la información.
5. Recomendar acciones de mejora.
6. Evaluar las acciones de mejora (re-calcular el RPN).
7. Continuar con las mejoras (Documento dinámico).

El nivel de prioridad de riesgo (RPN, por sus siglas en inglés) resulta de multiplicar la severidad (qué tan significativo es el impacto del efecto para el cliente) por la ocurrencia (qué tan probable es que un causa suceda) por la detección (qué tan probable será para el sistema detectar el efecto o el modo). El RPN cae en un rango de 1 a 1000 y proporciona un indicador relativo de todas las causas de falla. A los números de RPN más altos se les deben dar prioridad para acciones correctivas, ya sea para prevenir la causa o por lo menos para emplear mejores controles de detección. Especial atención se debe dar cuando se tengan RPN mayores a 80 con severidades altas. Las tablas de severidad, ocurrencia y detección se muestran en el anexo A.2 de este trabajo.

3.3.2 Pruebas de hipótesis

La prueba de hipótesis es un procedimiento estadístico para tomar una decisión, con base en una muestra, en cuanto al valor que puede tomar algún parámetro de la población (media, varianza, proporción) o sobre el tipo de distribución que pueden tener la población de donde vienen los datos (Escalante, 2007).

En general, la estrategia a seguir en las pruebas de hipótesis es suponer una afirmación (H_0), conocida como hipótesis nula, la cual se plantea como una igualdad y que, en caso de ser rechazada se aceptará su complemento: la hipótesis alternativa (H_1). Es decir, la hipótesis nula es verdadera en tanto no se demuestre lo contrario (Gutiérrez Pulido, 2004).

Para discernir si se acepta o rechaza una hipótesis se utiliza un estadístico de prueba el cual es un número calculado a partir de los datos de la muestra y cuya magnitud permite hacer tal discernimiento. Al conjunto de valores posibles del estadístico de prueba se le llama región de aceptación, por el contrario, al conjunto de valores que no pertenece a ese intervalo se le llama región de rechazo.

Las pruebas de hipótesis pueden ser de una cola, cuando son del tipo “mayor que” o “menor que” y de dos colas cuando son del tipo “diferente a”. En la figura 3.11 Se muestran las regiones de aceptación y rechazo y las formas que se pueden tener en las pruebas de hipótesis.

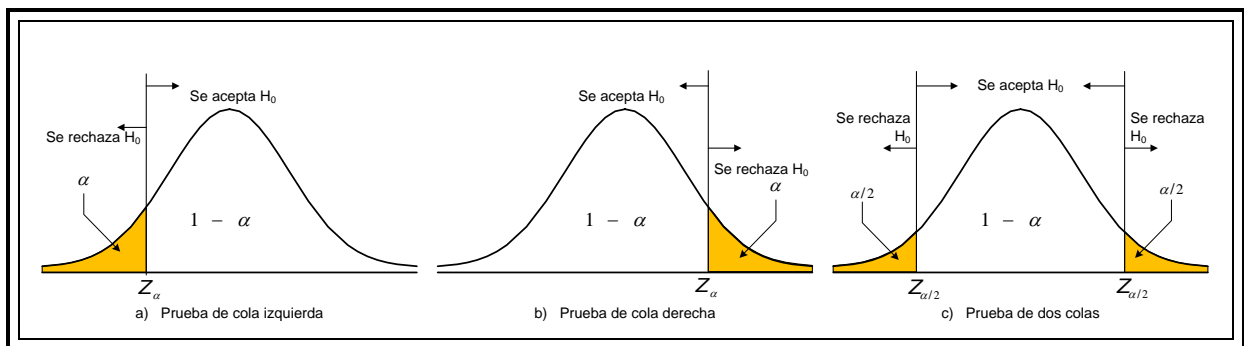


Figura 3.11 Tipos de pruebas de hipótesis y regiones de aceptación.

Al ser la prueba de hipótesis una decisión probabilística, existe el riesgo de cometer un algún tipo de error de los dos que existen en este tipo de pruebas. El primero ocurre cuando se rechaza H_0 siendo ésta verdadera (error tipo I o α) y el segundo ocurre cuando se acepta H_0 siendo ésta falsa (error tipo II o β).

Existen diferentes tipos de pruebas de hipótesis tanto para una muestra como para dos muestras. En este apartado sólo se mencionan cuáles son y en el anexo A.3 de este trabajo se da una tabla con las fórmulas de los estadísticos de prueba y las condiciones que los rigen.

Las pruebas de hipótesis para una muestra pueden ser:

- Prueba de hipótesis de medias.
- Prueba de hipótesis para la varianza.
- Prueba de hipótesis para una proporción.

Las pruebas de hipótesis para dos muestras pueden ser:

- Prueba de hipótesis para la diferencia de dos medias.
- Prueba de hipótesis para la igualdad de varianzas.
- Prueba de hipótesis para dos proporciones.

Para casos más generales donde se tienen varias poblaciones, se utiliza el diseño de experimentos.

3.3.3 Árbol de fallas (FTA)

Un árbol de fallas (FTA, por sus siglas en inglés) es la representación gráfica o desarrollo gráfico deductivo desde el evento principal o suceso no deseado, denominado “Top Event”, y pasando por todas las combinaciones de eventos o sucesos intermedios; hasta llegar a sus causas o eventos básicos, que representan el límite de resolución del árbol.

Se entiende por evento la adopción de uno de dos estados posibles de una variable. Por ejemplo, la falla en la corriente de alimentación de un controlador electrónico de temperatura conducirá a una señal de salida nula hacia la válvula de control, con lo que ésta quedara en la posición de reposo prevista en las especificaciones de compra. Si su posición en estas condiciones es de abierta, se dice que la válvula toma el evento de “abierta sin señal”, mientras que en condiciones de servicio normales, la válvula está “en operación” en cualquier posición dada por la señal de salida del controlador electrónico.

Para construir un árbol de fallas se utilizan los símbolos lógicos que pueden verse en la figura 3.12.

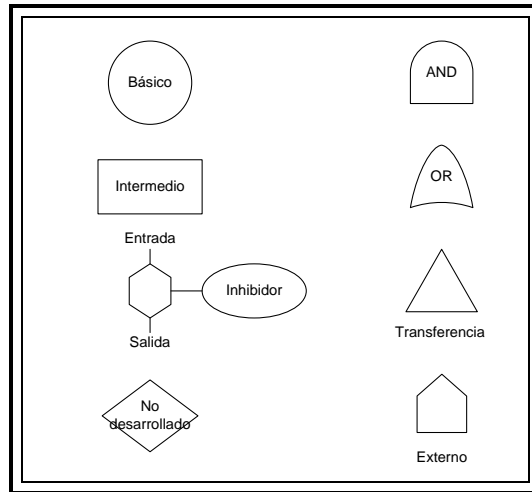


Figura 3.12. Símbolos del árbol de fallas.

La definición de los símbolos se describe a continuación:

Evento básico. Es un evento que no puede descomponerse en otros eventos sucesivos y que es la partida del árbol. Depende de la resolución que se tome en el análisis. Por ejemplo, la falla de una válvula neumática de control accionada por una señal eléctrica a través de un posicionador electro-neumático puede ser un evento básico o bien puede ser un evento intermedio si se adopta una mayor resolución en el análisis al subdividir la falla de la válvula en:

- Falla de la alimentación eléctrica.
- Falla de la alimentación neumática.
- Obturación por suciedad del aire del posicionador.
- Atascamiento del vástago del posicionador por torsión del mismo.
- ... etc.

Y cada uno de los sucesos podría subdividirse en otros, según la complejidad que quisiera abarcarse.

Evento intermedio. El que resulta de las interacciones de los otros elementos. El situado en la parte superior del árbol se denomina falla principal (Top Event).

Inhibidor. El evento de salida ocurre si se presenta el evento de entrada y se satisface la condición. Por ejemplo, válvula abierta (evento de salida) ante la falta de aire de accionamiento del servomotor en una válvula de control (evento de entrada) cuando la temperatura del reactor es alta (inhibidor).

Evento AND. La falla de salida se presenta si ocurren simultáneamente todas las fallas de entrada.

Evento OR. La falla de salida se presenta si ocurre cualquier falla de entrada.

Transferencia de entrada o salida. Indica que el árbol se desarrolla en una transferencia de salida o que se une a la correspondiente transferencia de entrada.

Para la construcción del árbol se analiza cada evento al hacer la pregunta: “¿Cómo es posible que esto suceda?”. Al contestar la pregunta, se identifican las causas principales y cómo interactúan entre sí para producir el evento no deseado. Este proceso de lógica se sigue hasta identificar todas las causas posibles. Las ramas del árbol terminan cuando están completos todos los eventos básicos que resultan del evento negativo.

Esta técnica está basada en las leyes del álgebra de Boole y permite estudiar la ocurrencia de un evento complejo en función de las fallas de los elementos básicos que intervienen en él. De esta manera, se puede apreciar de forma cualitativa, qué eventos son menos probables porque requieren la ocurrencia simultánea de numerosas causas.

3.3.4 Capacidad de proceso

Los procesos industriales tienen variables de salida o de respuesta, las cuales deben cumplir con ciertas especificaciones para así considerar que el proceso está funcionando de manera satisfactoria. Evaluar la habilidad o capacidad de un proceso es analizar qué tan bien cumplen sus variables de salida con las especificaciones (Gutiérrez Pulido, 2004).

Con frecuencia es conveniente contar con una forma cuantitativa simple para expresar la capacidad del proceso. Una manera de hacerlo es con el índice de capacidad del proceso (C_p), el cual es una comparación entre los límites de especificación (tolerancia) y los límites del proceso sin tomar en cuenta la ubicación del mismo, o sea, comparar el ancho de las especificaciones con el ancho del proceso.

En la figura 3.13 se muestra la representación gráfica de los límites de especificación y de un proceso por medio de una distribución simétrica (aunque ésta no sea la verdadera representación de todo proceso, se puede tratar de usar una transformación para lograr normalidad).

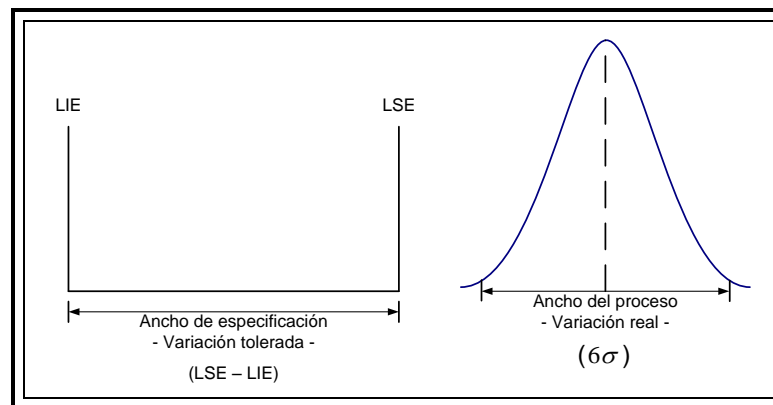


Figura 3.13 Representación de los anchos de especificación y del proceso.
Fuente; Escalante, 2007

El índice de capacidad potencial del proceso se calcula con;

$$C_p = \frac{\text{Variación tolerada}}{\text{Variación real}} = \frac{LSE - LIE}{6\sigma}$$

Un aspecto que es importante destacar es que el índice C_p se fundamenta en tres supuestos: que la característica de calidad se distribuye normalmente, que el proceso es estable y que se conoce la desviación estándar del proceso. En una aplicación práctica, la desviación estándar σ del proceso casi siempre es desconocida y debe sustituirse con una estimación. Para estimar σ se emplea de manera típica la desviación estándar muestral S . Esto resulta en una estimación del C_p :

$$\hat{C}_p = \frac{LSE - LIE}{6\hat{\sigma}} = \frac{LSE - LIE}{6S}$$

Se dice que 6σ es la variación real o ancho del proceso, debido a las propiedades de la distribución normal, que afirman que entre $\mu \pm 3\sigma$ se encuentra el 99.73% de los valores de una variable con distribución normal. Incluso si no hay normalidad, en ese intervalo se encuentra un gran porcentaje de la distribución debido a la desigualdad de Chevshev.

Para que un proceso pueda considerarse potencialmente capaz de cumplir con las especificaciones, se requiere que la variación real siempre sean menor que la variación tolerada. De aquí que lo deseable es que el índice C_p sea mayor que 1, y si el valor del índice C_p es menor que 1, es una evidencia de que no cumple con las especificaciones.

Una desventaja del índice C_p es que no toma en cuenta el centrado del proceso, debido a que en su definición no interviene la media (μ) del proceso. Para superar esta desventaja es necesario recurrir al llamado índice de capacidad real del proceso (C_{pk}). El índice C_{pk} está definido por:

$$C_{pk} = \min\left\{\frac{LES - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LIE}{3\sigma}\right\}$$

Es decir, el índice C_{pk} es igual al índice unilateral más malo, por lo que si el valor del C_{pk} es satisfactorio, indica que el proceso en realidad es capaz. La magnitud de C_{pk} respecto de C_p es una medida directa de qué tan apartado del centro está operando el proceso. Algunos elementos adicionales para la interpretación del índice C_{pk} con los siguientes:

- El índice C_{pk} siempre es menor o igual al índice C_p , Cuando ambos índices son muy próximos, eso indicará que la media del proceso está muy cerca del punto medio de las especificaciones.
- Si el valor del índice C_{pk} es mucho más pequeño el C_p , indicará que la media del proceso está alejada del centro de las especificaciones.

- Valores de C_{pk} iguales a cero o negativos, indican que la media del proceso está fuera de las especificaciones.

El desarrollo del índice de capacidad potencial del proceso (C_p) hecho anteriormente, considera que el proceso es de doble especificación. Cuando esto no sucede y la variable de salida sólo tiene una especificación, ya sea superior (como tiempo) o inferior (como dureza), la capacidad del proceso se calcula de manera unilateral como:

$$C_{pi} = \frac{\mu - LIE}{3\sigma}, \text{ sólo especificación inferior}$$

$$C_{ps} = \frac{LSE - \mu}{3\sigma}, \text{ sólo especificación superior}$$

Existen otras medidas de capacidad que no se estudian en este trabajo, para más información se puede consultar el texto Control estadístico de la calidad de Douglas Montgomery, 2006.

Metodología propuesta

La tecnología utilizada en la producción se ha convertido en un factor muy importante dentro de las empresas de cualquier tamaño y giro. Ésta lleva implícita un alto costo, el cual debe evitarse que alcance niveles aún mayores, y esto se logra cuando el costo de mantenimiento, como parte fundamental del valor agregado de una empresa, disminuye sin dejar de garantizar la disponibilidad de los activos productivos. Para ello es necesario un mantenimiento organizado, eficiente y desarrollado que garantice, a un costo competitivo, la disponibilidad de sus equipos. Toda empresa que desee mantenerse competitiva tiene, indispensablemente, que dirigir y prestarle una especial atención al mantenimiento de su equipamiento.

En la actualidad el mantenimiento está destinado a ser el pilar fundamental de toda empresa que considere ser competitiva. Es por ello que el mantenimiento debería desarrollar técnicas y métodos para la detección, control y ejecución de actividades que garanticen el buen desempeño de la maquinaria. Lo anterior resulta imposible sin una eficiente estrategia y organización de esta disciplina en cada empresa.

4.1 Las grandes pérdidas en los equipos industriales

El objetivo de un sistema productivo eficiente desde el punto de vista de los equipos es el de conseguir que estos operen de la forma más eficaz durante el mayor tiempo posible (Cuatrecasas, 2002). Para ello es necesario descubrir y eliminar los principales factores que merman las condiciones operativas ideales de los equipos.

Los principales factores que impiden lograr maximizar la eficiencia global de un equipo se han clasificado en seis grandes grupos y son conocidos como las Seis Grandes Pérdidas. Están agrupadas en tres categorías tomando en consideración el tipo de mermas y efectos que presentan en el rendimiento de los equipos de producción. Véase figura 4.1.

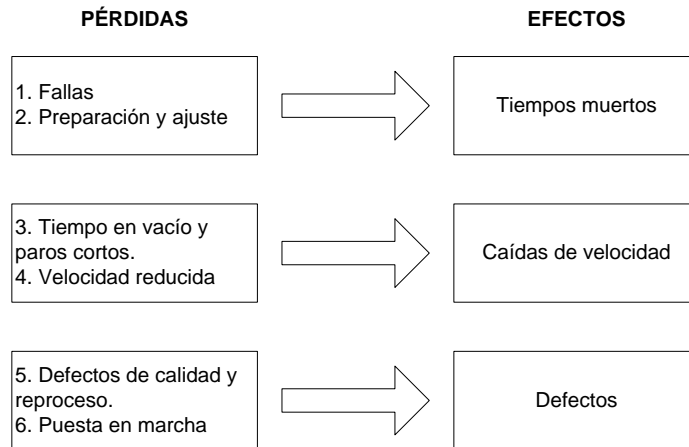


Figura 4.1 Agrupación de las pérdidas y los efectos que provocan en los equipos.
Fuente: Cautrecasas, L. *TPM*, (2000)

Los sistemas de producción más avanzados pretenden optimizar su eficiencia mediante la eliminación de los desperdicios, lo que implica utilizar la mínima cantidad de recursos de todo tipo y producir justamente lo necesario. El mantenimiento, en general, y en particular el TPM, intenta aplicar el mismo principio básico para optimizar el rendimiento de los procesos por medio, en este caso, de los equipos de producción y su mantenimiento. Es decir, el mantenimiento persigue la eficiencia a través de la eliminación de los desperdicios o pérdidas en los equipos productivos.

Estas pérdidas están muy relacionadas con el sistema de Manufactura Esbelta, el cual proporciona al cliente justo lo que quiere, cuando lo requiere y sin desperdicios, mediante la mejora continua. Cuando se habla de desperdicio en la producción, se hace referencia a cualquier proceso, actividad, material o producto que no agrega valor y en general todo aquello por lo que el cliente no está dispuesto a pagar. Los productos que se almacenan, inspeccionan o retrasan, los que esperan en filas y los defectuosos no agregan valor (Render, 2004).

Las seis grandes pérdidas de los equipos industriales se definen a continuación:

1. Fallas. Se refiere a los tiempos de paro del proceso por fallas, errores o averías en los equipos, ya sean esporádicas o crónicas. Asimismo, las fallas esporádicas pueden ser del tipo catastrófico, es decir, aquellas que sacan al equipo fuera de operación por tiempos prolongados (desde algunas horas a días), o de tipo menor, que son aquellas que pueden ser reparadas de manera inmediata y en muy corto tiempo (unos cuantos minutos) ya sea de manera definitiva o provisional.
2. Tiempos de preparación y ajuste de los equipos. Son aquéllos tiempos de paro del proceso en los que la maquinaria se prepara ya sea para cambio de producto o para el arranque al inicio de la corrida o del turno.
3. Tiempo en vacío y paros cortos. Intervalos de tiempo en los que el equipo está en espera de continuar, ya sea por falta de material o problemas de otra índole como desajustes varios o fallas menores.

4. Funcionamiento a velocidad reducida. Es la diferencia entre la velocidad de trabajo de la máquina y la de diseño.
5. Defectos de calidad y reproceso. Producción de defectos ocasionales o crónicos en el producto resultante.
6. Puesta en marcha. Pérdidas de rendimiento durante la fase de arranque del proceso que pueden derivar de exigencias técnicas.

De estas pérdidas, la que más interesa desde el punto de vista del mantenimiento son las fallas. No sólo porque es asunto particular de este departamento en las empresas, sino por la influencia que las fallas de la maquinaria pueden tener sobre las otras pérdidas. Esto se puede apreciar, si se piensa en lo difícil que puede ser para un equipo defectuoso entregar productos que no lo sean. De la misma manera, se puede intuir que un equipo en malas condiciones puede presentar problemas de velocidad y tiempos muertos debidos a paros tal como se ilustra en la figura 4.2.

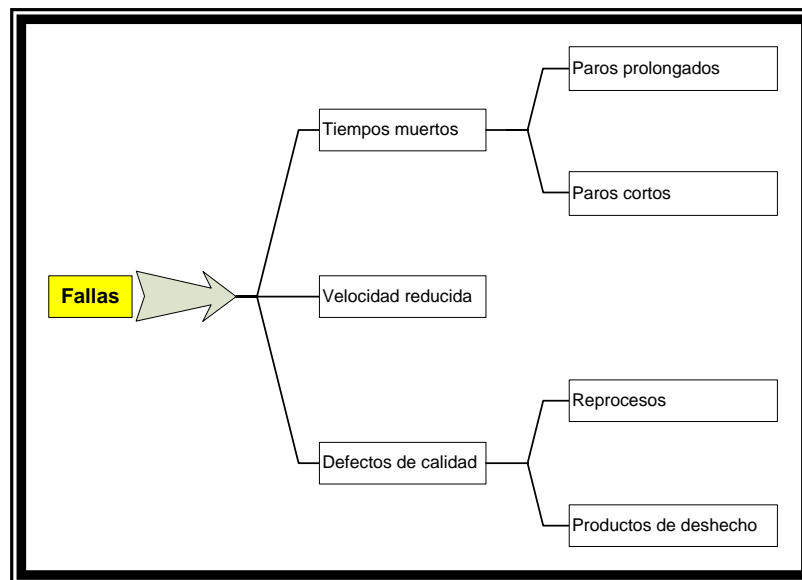


Figura 4.2 Influencia de las fallas en las pérdidas de los equipos.

Dadas las características tan importantes de las fallas en el desempeño de los equipos productivos, a continuación se presenta un análisis profundo de ellas.

4.2 Tipos de fallas

Las pérdidas por fallas, errores o descomposturas en los equipos provocan tiempos muertos del proceso por paro total del mismo debido a problemas que impiden su buen funcionamiento. Las fallas y sus consecuentes paros pueden ser de tipo crónico o esporádico.

4.2.1 Fallas crónicas

Las fallas crónicas son aquellas que se repiten periódicamente y, aunque causan alguna molestia tanto al personal de mantenimiento como al de producción, no detienen la operación del equipo. Es decir, se trata de fallas que no detienen el proceso productivo, sólo reducen el desempeño del equipo. Se reproducen con tal frecuencia, que se llegan a considerar normales. Dan lugar a pérdidas crónicas que en cada incidencia, pueden parecer insignificantes, pero la frecuencia con la que se repiten magnifica sus efectos en el rendimiento de los equipos y en los costos de operación de las empresas.

Dado que este tipo de fallas no detienen la operación, con frecuencia se les descuida o pasan desapercibidas, ya que no son fáciles de evaluar ni detectar. Normalmente son causadas por defectos ocultos ya sea en el equipo o en los métodos de trabajo utilizados. Se entiende por defectos ocultos aquellos que permanecen sin ser detectados y sin tratamiento.

Cada año, la industria estadounidense gasta más de 300 mil millones de dólares en mantenimiento de planta y operaciones. Un estimado del 80% de esos dólares se gasta en corregir fallas crónicas en las máquinas y sistemas así como errores humanos (Latino, Charles J. 2003). Según la experiencia, se cree que eliminando sólo las fallas crónicas, se puede reducir el costo del mantenimiento entre un 40% y un 60%.

Las fallas crónicas se pueden reducir, e incluso eliminar, pero no es una tarea sencilla, hay que llevar a cabo un riguroso seguimiento y análisis de sus características para determinar la causa o causas que provocan este modo de fallo. Para resolver este tipo de problemas se deben aplicar soluciones innovadoras, ya que si persisten es porque las soluciones habituales no resultan efectivas.

La dificultad para su completa eliminación reside en la combinación de causas que intervienen, con el agravante de que esta combinación puede ser diferente en cada momento de incidencia. Habrá situaciones en las que un solo defecto sea la causa de una falla, mientras que en otros la combinación de pequeños defectos ocultos como suciedad, partículas, polvo, abrasión, tornillos flojos, vibraciones, etcétera, que no parecen tener relación directa con la falla y a los que no se está acostumbrado a prestar atención son, en realidad, la causa principal del problema. Este último caso hace mucho más complicada la solución de las fallas, dada la dificultad para identificar todos los agentes y condiciones que las provocan.

Dado que las fallas crónicas no detienen el proceso productivo, muchas veces sus efectos son desdeñados, sin embargo, las pérdidas que producen, en general son mayores que las producidas por las fallas esporádicas; esto se debe no tanto al tiempo de paro sino a la frecuencia con la que se interrumpe el proceso o por la disminución del desempeño de la maquinaria durante tiempos prolongados.

4.2.2 Fallas esporádicas

Este tipo de fallas se caracteriza porque el equipo pierde súbitamente alguna de sus funciones fundamentales y se para por completo. Suele ocurrir de manera inesperada dando lugar a pérdidas claras y urgentes de solucionar.

Las fallas esporádicas o con pérdida de la función dan lugar a pérdidas esporádicas con un costo económico inicial alto. Sin embargo, son visibles y tienen, generalmente, una causa clara y concreta, y por lo tanto es relativamente sencillo actuar cuando suceden, tomando en cuenta el sentido de urgencia de la reposición de la función del equipo.

Aún a pesar del costo tan alto de este tipo de fallas, dado por el costo mismo de la reparación (refacciones y personal involucrado), como por la pérdida de la función (producción detenida), no todas las compañías realmente están interesadas en la política de la prevención, pues evitar la ocurrencia de una falla no es sencillo. Es aquí donde se debe hacer un balance de los costos de mantenimiento y no mantenimiento dependiendo de qué tan crítico es cada equipo en el proceso productivo de la planta.

4.3 Detección de fallas crónicas

En el argot del mantenimiento se dice que un buen diagnóstico de la falla equivale al 80% de su solución y que la solución de una falla se halla en su correcta detección. El problema reside en que diagnosticar las fallas crónicas no siempre es tan sencillo como parece, además de que si una falla no está claramente identificada, no se podrá implementar la solución correcta.

En términos generales, se puede decir que las fallas corresponden al tipo esporádico, pero se asimilan con mucha frecuencia y facilidad a fallas crónicas debido a que, o no se les aplica la solución correcta o se trata de fallas menores que pueden ser resueltas con soluciones provisionales, mismas que serán corregidas una vez que el proceso productivo se detenga o cuando haya tiempo.

La transición de falla esporádica a crónica se da cuando las soluciones provisionales se eternizan o nunca hay tiempo para corregirlas, lo cual genera que, con el tiempo, todos se acostumbren al funcionamiento deficiente del equipo y lo vean como normal cuando no lo es. A este fenómeno muchas veces se le suele llamar “ceguera de taller”.

Debido a que el problema principal de las fallas crónicas se encuentra en su detección y hasta ahora no existe una metodología clara para hacer esto, en este trabajo se desarrolla y presenta una metodología sistemática para su detección. En forma de diagrama de flujo, los pasos a seguir se muestran en la figura 4.3.

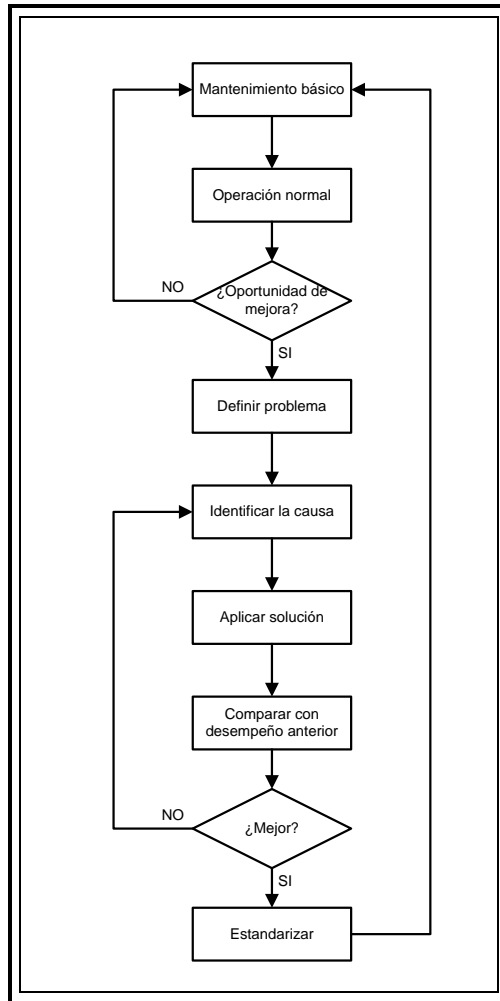


Figura 4.3 Metodología propuesta para la detección de fallas crónicas.
Fuente: El autor

El objetivo principal es identificar las fallas crónicas para que sean eliminadas o, si esto no fuera posible, minimizar sus efectos en el desempeño del equipo. En la tabla 4.1, se muestran las pérdidas sobre las que la detección de las fallas crónicas tendrá efecto, así como los objetivos que se persiguen.

Pérdida	Objetivo
Fallas	Eliminar
Paros cortos	Reducir al máximo
Velocidad reducida	Eliminar
Defectos de calidad	Eliminar

Tabla 4.1 Objetivos que se persiguen con la metodología propuesta de detección de fallas crónicas.

A manera de algoritmo se puede presentar la metodología para la detección de fallas crónicas. Su forma sería como a continuación se muestra.

- 1 *Dar mantenimiento básico a los activos*
- 2 *Dejar a los activos funcionar en operación normal*

Si se detecta una oportunidad de mejora (error en el producto), entonces

 - 2.1 *Definir el problema a resolver*
 - 2.2 *Identificar la causa raíz del problema*
 - 2.3 *Aplicar la solución correspondiente para eliminar la causa raíz del problema*
 - 2.4 *Comparar el nuevo desempeño con el anterior a la solución del problema*

Si el desempeño es mejor, entonces

 - 2.4.1 *Estandarizar la mejora como la mejor práctica hasta el momento*
 - 2.4.2 *Repetir el proceso desde el paso 1*

Si el desempeño no es mejor, entonces

 - 2.4.3 *Regresar al paso 2.2 ya que la causa identificada o no fue la raíz o no fue la única que provocaba el problema*

Si no se ha detectado una oportunidad de mejora, entonces

 - 2.5 *Repetir el proceso desde el paso 1*

A continuación se detalla cada uno de los bloques del diagrama para la metodología propuesta de detección de fallas crónicas.

4.3.1 Mantenimiento básico

El mantenimiento básico se refiere fundamentalmente a limpieza y lubricación de los equipo productivos. Algunas tareas adicionales pueden ser agregadas como reapriete de tornillería, tanto de dispositivos mecánicos como de dispositivos electromecánicos.

Esta actividades, a menudo menospreciadas entre el personal de mantenimiento, pueden dar lugar a la detección de elementos flojos, desgastados, holgados, fracturados, barridos, etc.

Se recomienda, como paso inicial de cualquier actividad de mantenimiento, proponer un plan de mantenimiento básico basado en el tiempo ya sea con las recomendaciones del fabricante del equipo o con base en las horas de trabajo y ambiente en el que el equipo está funcionando: Un ambiente con mucho polvo puede generar que la lubricación se vuelva corrosiva si ésta no es removida constantemente.

Una vez elaborado el plan y efectuada la primera labor de mantenimiento básico en un equipo de interés, es necesario elaborar un reporte con las observaciones realizadas y las sugerencias de cambio, reparación o programación para que éstas sean atendidas a la brevedad. Si estos cambios no se hacen, al realizar un análisis del funcionamiento del equipo, introducirán tanto ruido a las conclusiones que las verdaderas causas raíz del problema que se quiere atacar serán ignoradas.

4.3.2 Operación normal

La operación normal de los activos se refiere a dejar el equipo funcionando de manera normal en la fase productiva. Es en esta etapa donde se detectará la oportunidad de mejora.

Esta oportunidad de mejora se hace con base en el producto que la máquina entrega. El indicador del correcto funcionamiento del equipo es la función que realiza y no su apariencia. Si los productos que genera tienen defectos, esto es indicio de un desempeño deficiente del equipo, mismo que se debe resolver.

4.3.3 Identificación de los problemas a resolver

Existen dos formas de caracterizar la calidad de un producto: a través de sus atributos (del tipo “pasa-no pasa”) o de sus variables (como peso, longitud, volumen, etc.) Cuando se da el caso de que la característica de calidad sea un atributo, lo más recomendable es generar un diagrama de Pareto y llegar hasta un segundo nivel en el que se pueda ver, de todos los defectos presentes, cuál es el que más ocurre. Con esto será posible identificar o seleccionar el problema que se desea resolver.

Para el caso de que la característica de calidad sea del tipo continuo, lo mejor es tomar una muestra lo suficientemente grande (mayor a 30) y con los datos de las lecturas obtenidas generar un histograma para determinar la forma de la distribución de los datos y qué tan cercanos a un comportamiento normal se encuentran. De ser posible, hacer una gráfica de control para determinar si, aún con sus deficiencias, el proceso se encuentra bajo control estadístico. Un estudio de capacidad siempre es recomendable ya que indica si el proceso es capaz de entregar productos dentro de especificaciones y el nivel de defectos que se puede tener.

Para una correcta recolección de datos, se requiere generar una hoja de verificación (check list) de propósito específico, de forma tal que sea sencillo llenarla, pero que a la vez registre toda la información necesaria de una manera clara y precisa. No se debe olvidar incluir en la hoja la máquina que se está estudiando, la variable, o variables, en cuestión, las fechas de recolección de datos, así como el responsable del llenado por si se llegara a darle algún tipo de seguimiento posterior.

4.3.4 Identificación de la causa raíz

Para la identificación de la causa raíz se requieren de varios pasos:

Primero, identificar perfectamente cómo es el proceso en cuestión y el papel que desempeña el equipo dentro de dicho proceso. Esto se hace a través de un mapa de procesos hasta un tercer nivel con la finalidad de identificar las estaciones o mecanismos que pueden estar involucrados con la aparición del defecto.

En el primer nivel, se sugiere hacer el mapa de procesos de la línea. Para el segundo nivel, se desagrega la máquina en estaciones de trabajo o módulos funcionales y, en el tercer nivel, se desagregan las estaciones de trabajo en mecanismos o partes, de tal manera que se puedan identificar plenamente los elementos que componen a un equipo. En este punto se puede agregar una marca de alerta a los elementos donde se piensa que se puede encontrar la causa potencial de la falla crónica en estudio.

Segundo, se recomienda tomar del mapa de procesos del tercer nivel, los elementos que se consideren como aquellos causantes del defecto y colocarlos como ramas principales en un diagrama de causa-efecto. En la cabeza del diagrama, se debe colocar el defecto que se quiere corregir. Se recomienda que cada rama genere una causa potencial hasta un nivel tres. Además, se sugiere utilizar el método de las seis M's seleccionando aquellos factores que se consideren como causantes de la falla en cuestión e introducirlos también como ramas principales del diagrama de Ishikawa. A través de un proceso de lluvia de ideas, se debe llevar a consenso las causas potenciales para cada rama principal y generar las causas raíz (X's) de la falla en estudio.

Tercero, se sugiere generar una tabla AMEF y colocar cada X del diagrama causa-efecto como una prueba de hipótesis que debe ser aceptada o rechazada. En la columna relativa al efecto, se escribe el defecto que se quiere atacar. Es importante establecer una columna de acciones recomendadas junto con el responsable y fecha de entrega, para saber qué se tiene que hacer y quién lo tiene que hacer.

4.3.5 Aplicación de la solución

Las acciones recomendadas en el AMEF deben ser implementadas de manera provisional y realizar una corrida, cuidando realizar sólo una acción por vez. Es decir, se implementa una mejora y se hace una corrida. La mejora realizada se elimina y se procede a implementar otra mejora a fin de evitar que más de una mejora influya en una corrida. En cada corrida, se revisa el defecto que se trata de eliminar y con la muestra original y la nueva muestra, se aplica una prueba de hipótesis para verificar si la acción de mejora recomendada realmente influye o no en el defecto que se quiere corregir.

Cuando se tengan los resultados de todas las pruebas de hipótesis, se sabrá cuales causas potenciales (X en el diagrama causa-efecto) realmente influyen en el defecto a eliminar. Con esto se estandarizan las mejoras y se obtienen las conclusiones pertinentes.

4.3.6 Comparación con el desempeño anterior

Con las causas raíz definidas, se implementan todas las correcciones de manera provisional en un equipo y se lleva a cabo una corrida para ver cómo cambió el defecto y la mejora que se obtuvo después de la aplicación de la metodología.

Si se trata de atributos, una pirámide de Pareto (Wadsworth, 2005) puede indicar muy bien cómo se modificó el defecto a la salida del equipo. En el caso de variables, se recomienda nuevamente generar un histograma con datos de una muestra y evaluar la capacidad del proceso con todas las mejoras implementadas.

Si no hubo una mejora, o ésta fue mínima, se debe revisar que las causas potenciales definidas en el diagrama de causa-efecto sean todas las necesarias. Si esto no fue así, redefinirlas y repetir los procedimientos de AMEF y pruebas de hipótesis.

4.3.7 Estandarización de la solución

Si en la empresa hay más equipos iguales, cosa que sucede con mucha frecuencia, aplicar las acciones de mejora o correcciones a todas las máquinas que sean iguales y verificar que realmente hubo una mejora del defecto en estudio.

Para este caso y con la finalidad de evitar la reaparición del defecto que se acaba de solucionar, es recomendable establecer un tipo de control ya sea a partir de gráficas de control para atributos o para variables según el caso.

En la tabla 4.2 se pueden ver las herramientas útiles para cada paso de la metodología para la detección de fallas crónicas.

Paso de la metodología de detección de fallas	Herramienta a utilizar								
	Check list	Histograma	Diagrama de Pareto	Diagrama de Ishikawa	Mapa de proceso	Gráfica de control	AMEF	Prueba de hipótesis	Capacidad de proceso
Definir problema	✓	✓	✓			✓			✓
Identificar la causa	✓			✓	✓		✓	✓	
Comparar con desempeño anterior	✓	✓	✓						✓
Estandarizar	✓					✓			

Tabla 4.2 Herramientas a utilizar en la metodología de detección de fallas crónicas.
Fuente: El autor

4.4 Prevención de fallas esporádicas

La prevención de una falla implica la creación de un escenario pesimista con la finalidad de que éste no suceda. Es decir se trata de un escenario del tipo “qué pasa si...” considerando todas las posibles alteraciones que el proceso pueda tener e identificando sus consecuencias.

Tomando al producto como indicador principal del estado de salud de la máquina, es posible investigar cuáles son las características de calidad que debe cumplir y con base en eso definir, en un proceso deductivo, cómo es posible que aparezca el evento indeseable y dónde es posible que el equipo falle para que aparezca el defecto en cuestión.

Al igual que la metodología de las fallas crónicas, la detección de las posibles fallas en los equipos es la columna vertebral de la metodología para la prevención de las fallas esporádicas, es decir, dónde puede el equipo fallar y qué se debe hacer para que ese evento no ocurra.

En forma de diagrama de flujo, la metodología propuesta se muestra en la figura 4.4.

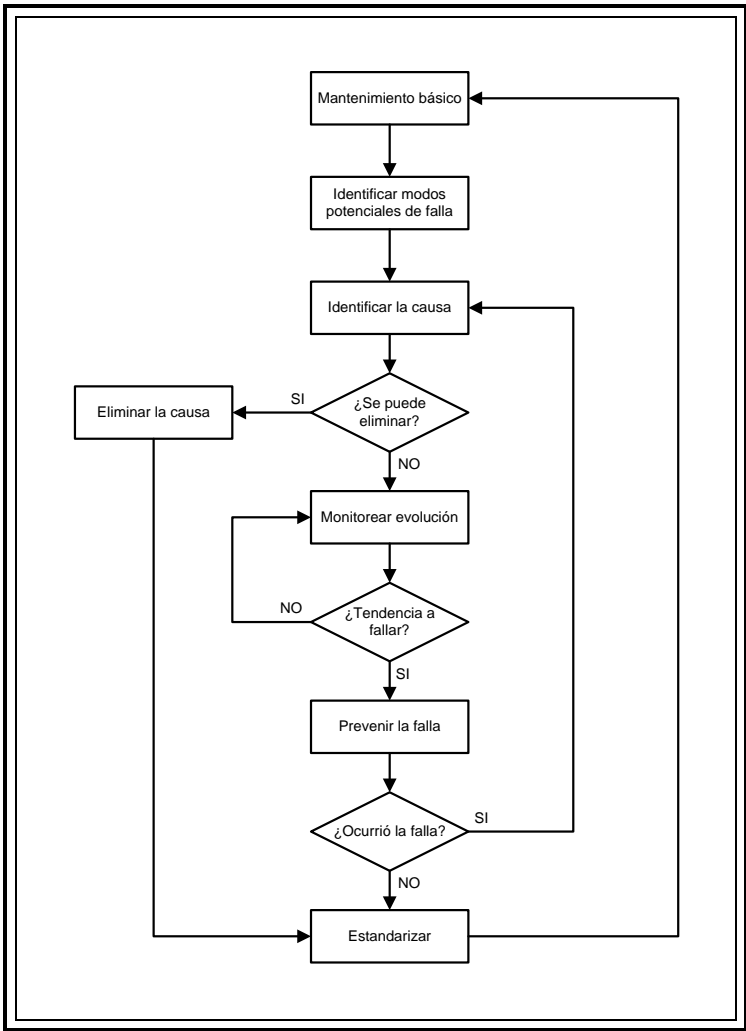


Figura 4. 4 Metodología propuesta para la prevención de fallas esporádicas.
Fuente: El autor

El objetivo principal, para este caso, es identificar los modos potenciales de falla para que sean monitoreadas o eliminadas las causas que los producen a fin de eliminar o minimizar sus efectos. En la tabla 4.3, se muestran las pérdidas sobre las que la detección de las fallas crónicas tendrá efecto, así como los objetivos que se persiguen.

Pérdida	Objetivo
Fallas	Eliminar
Paros prolongados	Reducir al máximo

Tabla 4.3 Objetivos que se persiguen con la metodología propuesta.

A manera de algoritmo se puede presentar la metodología para la prevención de fallas esporádicas. Su forma sería como a continuación se muestra.

- 1 *Dar mantenimiento básico a los activos*
 - 2 *Identificar los modos potenciales de falla*
 - 3 *Identificar la causa raíz de esos modos potenciales de falla*
Si se puede eliminar la causa raíz de la falla en potencia, entonces
 - 3.1 *Eliminar la causa raíz*
 - 3.2 *Estandarizar la solución como la mejor práctica hasta el momento*
 - 3.3 *Repetir el proceso desde el paso 1**Si no se puede eliminar la causa raíz de la falla en potencia, entonces*
 - 3.4 *Monitorear su evolución*
Si en el monitoreo se detecta una tendencia a que se presenta la falla, entonces
 - 3.4.1 *Prevenir la ocurrencia de la falla*
Si la falla no ocurre, entonces
 - 3.4.2 *Estandarizar la solución como la mejor práctica hasta el momento*
 - 3.4.3 *Repetir el proceso desde el paso 1*
 - 3.4.4 *Regresar al paso 3 ya que la causa identificada o no fue la raíz o no fue la única que provocaba el problema*
- 3.5 *Regresar al paso 3.4*

A continuación se detalla cada uno de los bloques del diagrama para la metodología propuesta de prevención de fallas esporádicas.

4.4.1 Mantenimiento básico

Al igual que en el caso de las fallas crónicas, se propone un plan de limpieza y lubricación como primer paso para el desarrollo de la metodología con la finalidad de detectar fallas menores, desgastes, holguras y fracturas de los mecanismos entre otros. Es recomendable que todas las fallas detectadas sean corregidas antes de dar inicio a la prevención de las fallas esporádicas.

4.4.2 Identificación de los modos potenciales de falla

Antes de identificar los modos potenciales de falla, es importante determinar cuáles serán los equipos sobre los que se hará el estudio. Un análisis de qué tan crítico es el equipo para el proceso productivo puede dilucidar este punto de tal manera que sean sólo aquellas máquinas o secciones de ellas, y cuya función es crítica, sobre las cuales se haga el estudio.

Cuando se han determinado los equipos o secciones de interés, se genera un mapa de proceso de la línea, de los equipos y del equipo en estudio hasta un tercer nivel a fin de seccionar el equipo en partes funcionales donde se pueda identificar sus modos potenciales de falla.

La identificación se puede hacer a través de un AMEF, tal como se hizo en el apartado de fallas crónicas, pero en este caso no es necesario determinar una hipótesis nula. Sólo se identifican los modos potenciales de falla y se calcula el PRN a fin de saber cuáles son los puntos débiles del sistema y los que se tienen que reforzar. La columna de acciones recomendadas también es muy importante, pero en este caso, estas acciones están relacionadas con la prevención de la ocurrencia del defecto y la capacidad de detección del mismo para eliminarlo antes de que genere algún daño en el equipo o minimizar su severidad.

Cuando se tiene suficiente información de un tipo específico de componente o sección del equipo, es más sencillo aplicar un árbol de fallas. Éste, de manera deductiva, indicará cuál o cuáles eventos sencillos se deben de dar para la aparición del efecto no deseado.

4.4.3 Determinar la causa raíz y monitorear su evolución

Una vez identificados los modos potenciales de falla a través de un AMEF o los eventos básicos que pueden dar origen al evento no deseado a través de un árbol de fallos, se intenta determinar la causa raíz que los originaría en caso de que sucedieran. Para ellos se utiliza un diagrama causa-efecto.

Si el estudio se hizo a través de un AMEF, los modos potenciales de falla ocuparán las ramas principales. Si se hizo a través de un árbol de falla, las ramas principales serán los eventos básicos del árbol. Al igual que en el caso de fallas esporádicas, se sugiere llegar a un nivel 3, como mínimo, en el diagrama causa-efecto.

Cuando las causas posibles han sido determinadas, es conveniente eliminarlas del equipo, si esto no fuera posible, entonces se recomienda monitorear su evolución de tal manera que se pueda predecir con certeza cuándo la pieza, sección o componente del equipo puede fallar. En este caso, determinar la forma en que se puede monitorear la evolución de la falla potencial no siempre es sencillo. Si esto sucede, lo que se puede hacer es monitorearla a través del producto que entrega y la característica de calidad relacionada con ella. Una forma que puede ayudar es intentar elaborar un diagrama de

dispersión para identificar alguna dependencia de una variable con respecto a otra que se pueda medir o que se haya identificado como causa.

Si se encontró una forma de monitorear la evolución de la falla se pueden tomar datos vía un check list y a partir de éste generar un diagrama de Pareto, para atributos, o un histograma y/o gráfica de control si se trata de variables.

4.4.4 Prevención de la falla y estandarización

Es importante tomar alguna medida precautoria como limpieza, lubricación, alineación, eliminación de vibraciones, análisis de lubricantes u otra, de tal manera que se pueda tener un panorama de antes y después para saber si lo que se está haciendo ataca la causa raíz de la falla. Tal vez se de el caso de que se esté previniendo una falla con una causa equivocada.

Si la solución aplicada demora la falla o ésta no aparece, se puede tomar como la mejor solución hasta ese momento, dado que el monitoreo debe seguir, y, de ser posible, aplicarla a otros equipos que tengan la misma configuración o que sean iguales. Una gráfica de control siempre es de mucha utilidad para detectar causas especiales de variación en la característica de calidad que se esté monitoreando.

En la tabla 4.4 se pueden ver las herramientas útiles para cada paso de la metodología de prevención de fallas esporádicas.

Paso de la metodología de prevención de fallas	Herramientas a utilizar								
	Check list	Histograma	Diagrama de Pareto	Diagrama de Ishikawa	Mapa de proceso	Diagrama de dispersión	Gráfica de control	AMEF	FTA
Identificar modos potenciales de falla					✓			✓	✓
Identificar la causa				✓					
Monitoreo	✓	✓	✓			✓			
Estandarizar							✓		

Tabla 4.4 Herramientas a utilizar en la metodología de prevención de fallas esporádicas.
Fuente: El autor

La metodología propuesta en el apartado anterior fue aplicada en el departamento de mantenimiento de una empresa productora de cosméticos. Se omite el nombre de la empresa, pero se describen a fondo tanto los procesos como la aplicación de la metodología y los resultados obtenidos.

5.1 Descripción de la empresa

La empresa de cosméticos en la cual se llevó a cabo la aplicación de la metodología tiene presencia a nivel mundial y se caracteriza por las ventas directas por catálogo. Pionera en este rubro, esta empresa lleva más de 50 años trabajando en México y parte de su producción es exportada tanto a Estados Unidos como a Latinoamérica.

5.1.1 Ventas

El sistema de ventas de la empresa se basa en la Representante, persona encargada de ofrecer entre sus conocidos, vecinos y familiares los productos disponibles en el catálogo de ventas, el cual se distribuye por campaña. La representante ofrece a sus clientes potenciales productos que, en caso de compra, serán entregados al final de la campaña. De esta forma, la Representante elabora una factura con lo que vendió en la campaña y la envía a la empresa para que ésta se encargue de fabricar los productos solicitados. Las representantes se encuentran distribuidas en toda la República Mexicana, por lo que diariamente se facturan productos, mismos que rondan el millón de piezas diarias.

Todas las facturaciones son procesadas por día de tal manera que al día siguiente el área de manufactura recibe las cantidades de productos a fabricar para ese día. Esta característica provoca que las máquinas envasadoras constantemente estén cambiando de formato y, lo más importante, los productos que se van a fabricar ya están vendidos, por lo que es imperativo que se produzcan a tiempo para que puedan ser enviados a la Representante, misma que será la encargada de entregarlos al cliente final.

La característica de que los productos que se están fabricando ya fueron vendidos y por lo tanto deben producirse es el principio que rige las acciones de la empresa y lo que propicia que las líneas productivas deban tener una alta disponibilidad so pena de no entregar los productos a la Representante, misma que tendrá que informar a su cliente que no llegó el producto deseado y, por lo tanto, se verá en la necesidad de regresar el dinero pagado, además de la mala imagen de la empresa y la posible pérdida del cliente.

Aún cuando se manejan pronósticos con respecto a la misma campaña en años pasados, siempre hay diferencias por lo que es crítico para esta empresa que sus equipos estén disponibles y operando eficientemente cuando sean requeridos.

5.1.2 División operativa

A nivel operacional, esta empresa se divide en dos áreas: Operaciones, encargada de la distribución de los productos, y Manufactura que es donde se hizo la aplicación y se encarga de la elaboración de los productos cosméticos.

El área de manufactura se compone de cuatro unidades de negocios, que son, Lociones-Cremas, Tubos compresibles, Hidro-alcoholes y Lápiz Labial y Esmaltes. Como apoyo y complemento a las mismas, se encuentran los almacenes, tanto de materia prima como de producto terminado. La figura 5.1 muestra esta división.

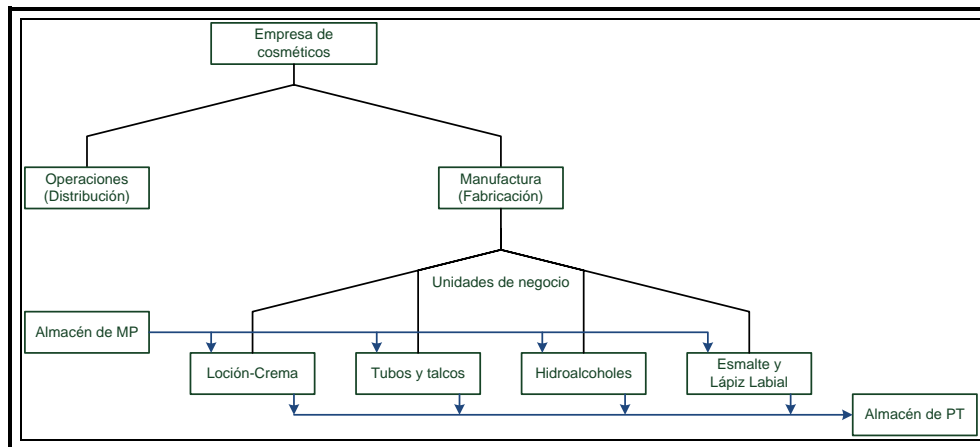


Figura 5.1 División operativa de la empresa manufacturera de cosméticos.
Fuente: El autor

Por su parte, el área de manufactura se divide, para cuestiones de mantenimiento, en dos secciones: Procesos, encargada de elaborar todos los productos a granel (conocidos por el nombre genérico de “bulk”) en tanques y reactores y Envasado, donde se envasan los productos en su presentación final antes de salir para ser distribuidos a las Representantes. Además de esto, se encuentra el área de Servicios, que es la encargada de proveer a la planta de aire comprimido a 7 [kgf/cm²], agua de enfriamiento, agua desmineralizada, agua caliente, vapor de agua y energía eléctrica a los voltajes necesarios para los diferentes procesos llevados a cabo.

La aplicación de la metodología se llevó a cabo en el área de envasado. La figura 5.2 muestra la división de la planta productiva desde el punto de vista de mantenimiento, así como algunos de los equipos encargados a las diferentes áreas de mantenimiento. Cabe señalar que estas áreas reportan a la gerencia de ingeniería.

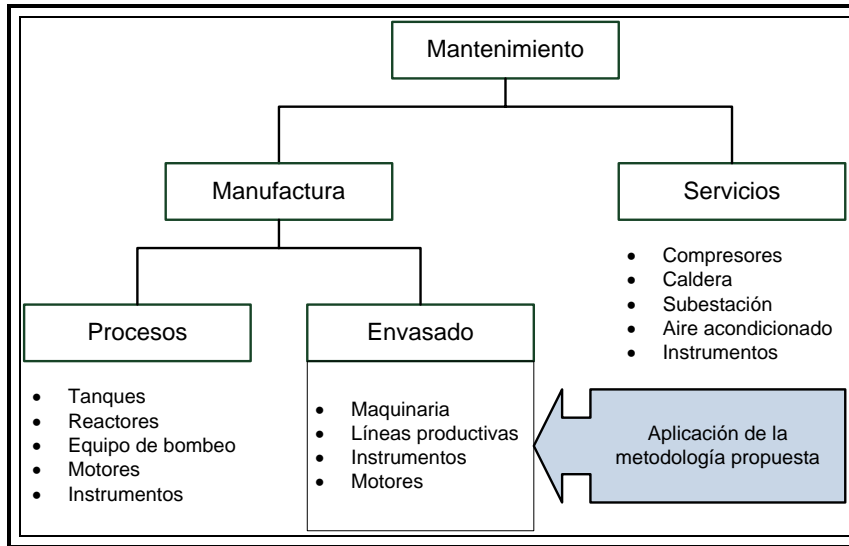


Figura 5.2 División de la planta para cuestiones de mantenimiento y lugar donde se aplicó la metodología propuesta.
Fuente: El autor.

La metodología propuesta en este trabajo para la detección de fallas crónicas y prevención de fallas esporádicas, fue aplicada sobre la maquinaria del área de envasado.

5.2 Detección de fallas crónicas en línea de llenado de tubos

Con la finalidad de ubicar al lector en la terminología técnica utilizada, en la figura 5.3 se muestran los elementos de interés en los tubos de plástico.



Figura 5.3 Partes que componen a un tubo de plástico.

Para efectos de este trabajo, se enuncian todas las fallas crónicas que aparecen en la línea de llenado de tubos compresibles, sin embargo, sólo se describe la detección y solución de dos de ellas, esto con la finalidad de establecer la diferencia de la metodología aplicada al caso de atributos (del tipo “pasa-no pasa”) así como para el caso de variables (datos numéricos). El desarrollo de la metodología y los resultados obtenidos se detallan en los siguientes párrafos.

5.2.1 Descripción de la línea

La línea de llenado de cremas y mascarillas en tubos compresibles, se compone de tres estaciones de trabajo: Alimentación manual de tubo por parte de un operador, máquina llenadora y banda transportadora para inspección y empaque. La figura 5.4 muestra una representación gráfica de la configuración de la línea.

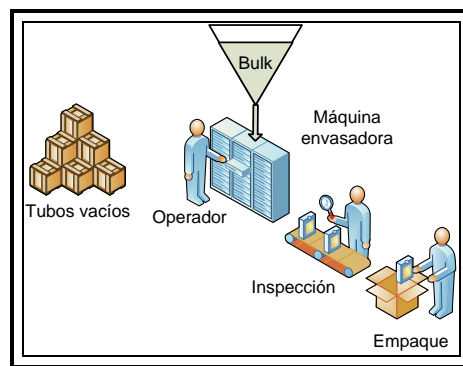


Figura 5.4 Línea de envasado de cremas y mascarillas en tubos compresibles.
Fuente: El autor

5.2.2 Actividades de mantenimiento básico en la línea de producción

El arranque de la metodología se realiza con una propuesta de actividades de mantenimiento básico en la línea. Limpieza y lubricación de la máquina envasadora y del transportador de cama plana. Se reaprietan tornillos tanto de piezas mecánicas como de dispositivos eléctricos.

En esta fase de limpieza, se detectan algunas piezas en mal estado, mismas que se cambian y reparan, según el caso. A continuación, la línea se pone a trabajar en operación normal, para detectar los posibles fallos en los que incurre. El formato que se llena para la detección de fallas crónicas se muestra en la figura 5.5. Este formato se aplica a la máquina envasadora, pues es en ese equipo donde las fallas (tanto crónicas como esporádicas) pueden realmente afectar la continuidad del proceso.

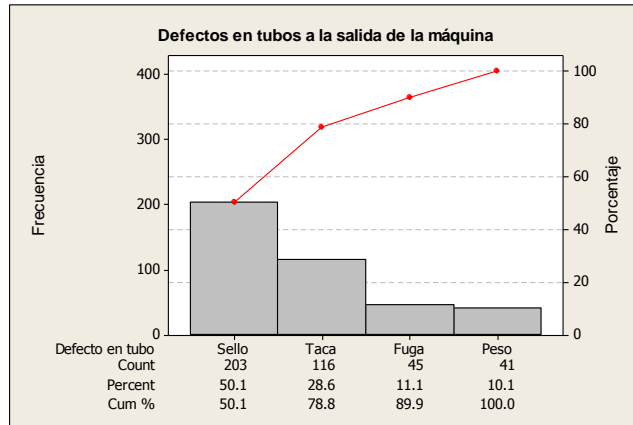


Figura 5.6 Diagrama de Pareto de primer nivel para los defectos en los tubos a la salida de la máquina.
Fuente: El autor

A su vez, los defectos presentes en el sellado de los tubos, puede subdividirse en otras categorías, por lo que los tubos rechazados en la inspección de control de calidad se revisan para identificar cuál de los defectos presentes en el sellado de los tubos es el que más se presenta a la salida de la máquina. La figura 5.7 muestra la tabla con la información condensada y el correspondiente diagrama de Pareto para este caso.

Defecto en sello	Total	Porcentaje	Acumulado
Quemado	126	62.07%	62.07%
Mal cortado	41	20.20%	82.27%
Con burbujas	26	12.80%	95.07%
Con rebaba	10	4.93%	100.00%
Total	203	100.00%	

Total de piezas producidas en la corrida: 5131 pza.

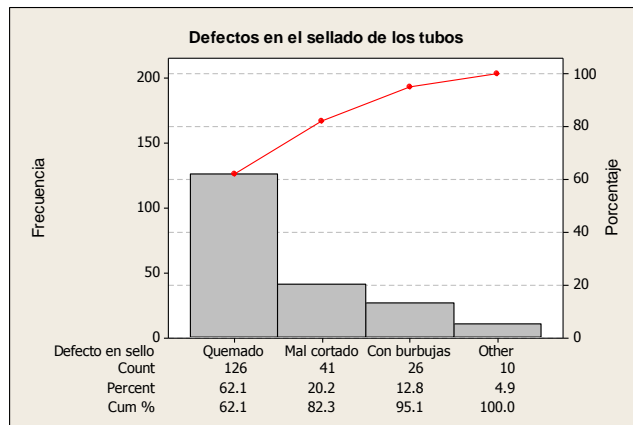


Figura 5.7 Diagrama de Pareto de primer nivel para los defectos en los tubos a la salida de la máquina.
Fuente: El autor

Con la ayuda de los dos diagramas se puede definir que el problema más frecuente, y el primero que se atacará, en la línea de llenado de tubos compresibles, es que *los tubos a la salida de la máquina son rechazados debido a que el sello en la mayoría de los casos se encuentra quemado* y eso da una apariencia poco estética.

5.2.4 Identificación de la causa raíz del quemado del sello

El proceso de encontrar la causa raíz que ocasiona que los tubos salgan quemados en el sello y por eso sean rechazados, se compone de varias actividades. La primera es conocer cómo funciona la línea y dentro de la línea, conocer el funcionamiento de la máquina así como las estaciones o partes funcionales que están relacionadas con el sellado de los tubos para determinar dónde es posible encontrar la causa raíz.

Para hacer lo anterior, se recurre a un mapeo de procesos. Se considera en el primer nivel la configuración de la línea tal como se muestra en la figura 5.8.

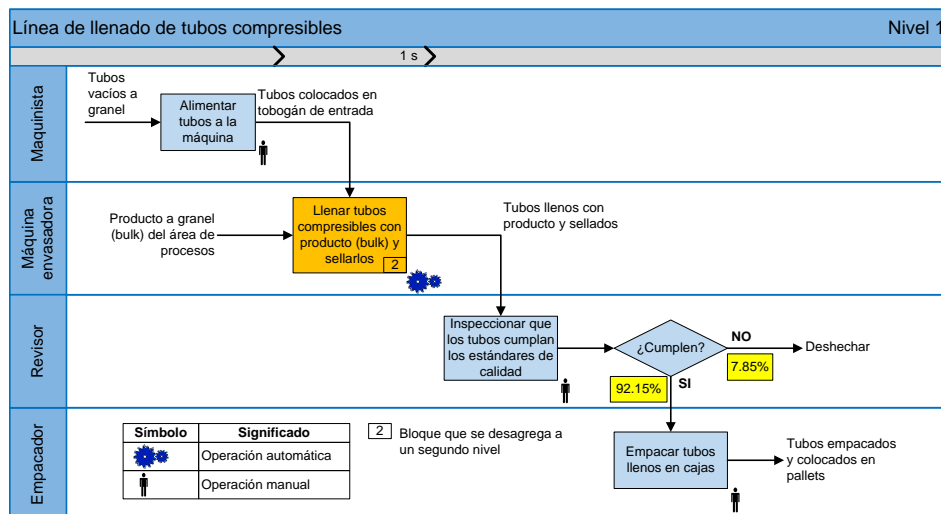


Figura 5.8 Mapa de procesos de nivel 1 para el funcionamiento de la línea de llenado de tubos compresibles. Fuente: El autor

Personal de producción coloca manualmente los tubos vacíos en la máquina; estos son orientados, llenados y sellados en la máquina de manera automática; a la salida de la máquina, una persona verifica que todos los tubos cumplan con las características de calidad para que puedan ser empaquetados y trasladados al área de operaciones donde serán enviados a las Representantes.

Una vez detectado que la causa de la falla se encuentra en la máquina envasadora, se elabora el mapa de proceso de segundo nivel, el cual se muestra en la figura 5.9.

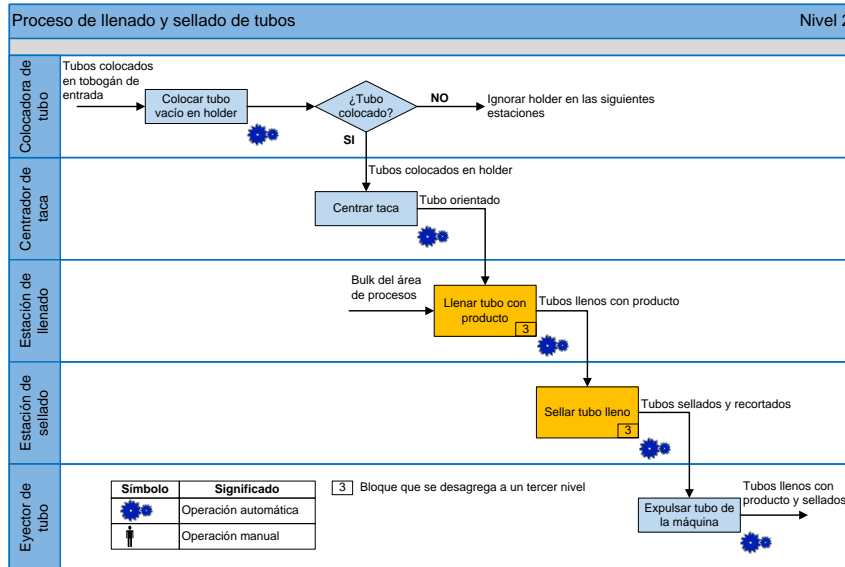


Figura 5.9 Mapa de procesos de nivel 2 para el proceso de llenado y sellado de tubos compresibles.
Fuente: El autor

Un dispositivo (volteador) coloca los tubos en los holders; un sensor de presencia detecta si el tubo fue colocado en el holder para que sea orientado por la estación de centrado de taca. Si no se colocó el tubo, entonces ese holder es ignorado en las siguientes estaciones.

Al seccionar la máquina en estaciones funcionales, se detecta que la causa del problema se encuentra en la estación de sellado de tubo, por lo que se desagrega para identificar sus elementos. La figura 5.10 muestra el mapa de procesos obtenido en el tercer nivel para esta estación.

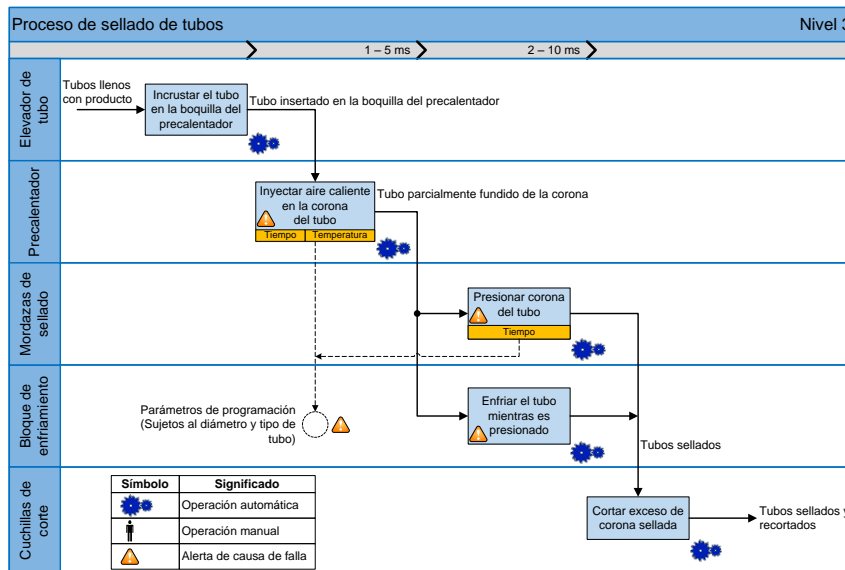


Figura 5.10 Mapa de procesos de nivel 3 para el proceso de sellado de tubos compresibles.
Fuente: El autor

Cuando los tubos han sido llenados con producto, pasan a la estación de sellado y un elevador introduce cada tubo en una boquilla que sopla aire caliente. Este aire es soplado sólo en la parte superior del tubo, llamada corona, la cual no tiene barniz ni pintura, para que el tubo pueda ser sellado sin problemas. Posteriormente, los tubos son presionados por las mordazas de sellado, las cuales se componen de dos secciones, una es la mordaza propiamente y la otra es un bloque de enfriamiento. La función de este bloque es que el sello no se desborde hacia los límites del barniz de tal manera que la apariencia de los tubos en la parte baja del sello quede como una línea recta. El movimiento de las mordazas de sellado y del bloque de enfriamiento ocurre de manera simultánea. Cuando el tubo fue sellado, el remanente superior del sello es cortado por las cuchillas para dar un acabado estético al sello.

En el mapa de procesos mostrado en la figura 5.10, aparecen unos recuadros de tiempo y temperatura los cuales son señalados con línea punteada como “parámetros de programación”, esto es porque dichos parámetros, en las actividades en las que aparecen, deben ser programados por el técnico del área para conseguir un acabado perfecto en el sello. Son programables debido a que se manejan diferentes materiales según el tipo de producto y el diámetro del tubo.

En dicho mapa de procesos, también aparecen algunos recuadros con un símbolo de alerta en uno de los costados. Esta señal se colocó para indicar los elementos que serán analizados en el diagrama de Ishikawa para identificar las causas potenciales del quemado en el sello de los tubos.

Con el proceso de sellado desagregado en el mapa de procesos, se procede a realizar un diagrama de Ishikawa para determinar cuál de los elementos colocados en la columna izquierda del mapa, o algún otro factor que se haya identificado, pueden ser la causa por la cual los tubos queden con el sello quemado y por lo tanto sean rechazados.

El diagrama de Ishikawa es desarrollado por el personal de mantenimiento de la empresa y su versión final se muestra en la figura 5.11, donde se pueden apreciar las X's, las cuales son consideradas las causas potenciales que pueden ocasionar el problema que se trata de resolver.

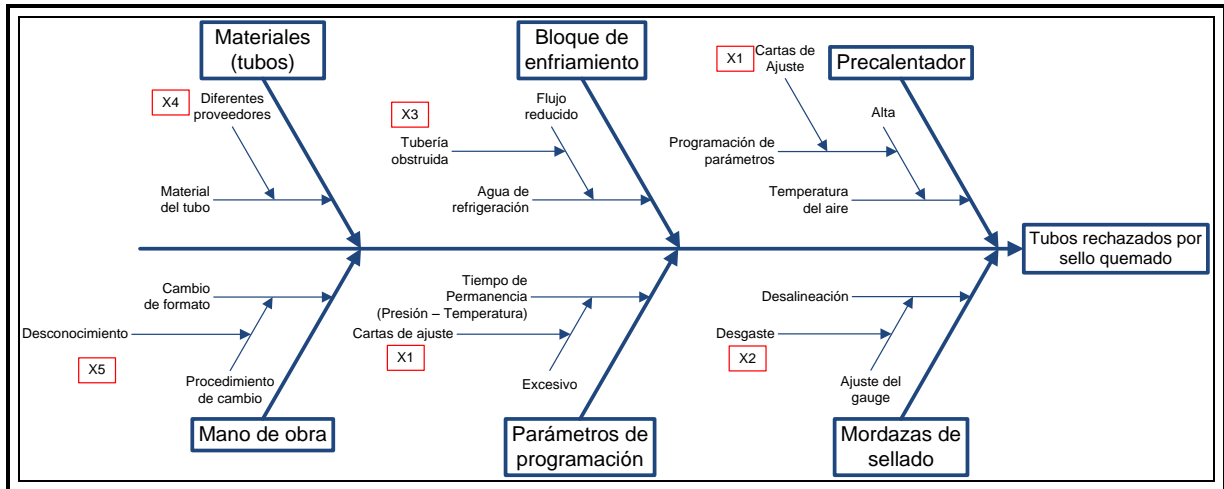


Figura 5.11 Versión final del diagrama de Ishikawa para las causas potenciales del rechazo de tubos por sello quemado.
Fuente: El autor

Una vez obtenido el diagrama, es necesario determinar, de todas las causas potenciales, cuáles de ellas realmente inciden en el problema que se trata de resolver. Para ello, se plantea una tabla AMEF donde se incluye una hipótesis nula (H_0) para cada causa potencial. Dicha información se muestra en la tabla 5.1.

X's	Modo potencial de falla	Efecto	Causas potenciales	Hipótesis nula	S	O	D	NPR	Acciones recomendadas
X1	Los parámetros de programa no coinciden con las características del material	Tubos rechazados por sello quemado	Cartas de ajuste obsoletas	No hay diferencia entre ajustar la máquina con cartas de ajuste actualizadas o sin actualizar	2	5	9	90	Revisar cartas de ajuste y actualizar. Resp. Supervisor de mantenimiento
X2	Desalineación de las mordazas de sellado		Desgaste del gauge	No hay diferencia entre ajustar las mordazas con gauge desgastados o sin desgaste	2	8	9	144	Revisar gauges y placas de soportes en mordazas de sellado y utilizar sólo aquellos en buen estado. Resp. Almacenista
X3	Baja circulación de agua de enfriamiento en mordazas de sellado		Tubería de agua fría obstruida	No hay diferencia si la tubería está obstruida o no	2	8	10	160	Colocar bypass en máquina para asegurar libre flujo de agua de enfriamiento. Resp. Mecánico de línea

Tabla 5.1 Tabla AMEF para las causas potenciales de tubos rechazados por sello quemado.
Fuente: El autor

X's	Modo potencial de falla	Efecto	Causas potenciales	Hipótesis nula	S	O	D	NPR	Acciones recomendadas
X4	Diferentes materiales	Tubos rechazados	Diferentes proveedores	No hay diferencia entre un proveedor y otro	2	2	3	12	Hacer pruebas con materiales de un solo proveedor. Resp. Supervisor de producción y Supervisor de control de calidad
X5	No se sigue el procedimiento de cambio de formato	por sello quemado	Desconocimiento	No hay diferencia entre seguir o no el procedimiento de cambio de formato	2	7	5	70	Revisar que el cambio de formato se haga conforme al procedimiento de ajuste. Resp. Supervisor de mantenimiento

Tabla 5.1 (continuación) Tabla AMEF para las causas potenciales de tubos rechazados por sello quemado.
Fuente: El autor

Una vez realizadas las acciones recomendadas, se llena nuevamente el check list presentado en la figura 5.5 para determinar si las causas potenciales enunciadas en el diagrama de Ishikawa realmente están influyendo en el rechazo de los tubos por tener el sello quemado. Cabe mencionar aquí que se hizo una acción recomendada a la vez y se llevó a cabo una corrida en donde se contabilizaron los productos defectuosos y, de ellos, los tubos con el sello quemado.

Las tablas llenas para cada caso se muestran en el anexo A.4 de este trabajo. Para las pruebas de hipótesis, se tabulan únicamente los totales observados, correspondientes a cada X potencial. Dicho resumen se muestra en la tabla 5.2.

X's	Acción recomendada	Piezas producidas	Defectuosos (Sello)	Sello quemado
X1	Actualizar cartas de ajuste	9,870	145	43
X2	Gauges en buen estado	5,056	118	58
X3	Colocación de bypass	3,151	63	22
X4	Un solo proveedor	6,503	136	84
X5	Seguir el procedimiento	4,988	98	62

Tabla 5.2 Resumen de resultados obtenidos después de las acciones recomendadas.
Fuente: El autor

Con los resultados obtenidos se realiza una prueba de hipótesis de una cola para dos proporciones dado que se trata de atributos del tipo pasa-no pasa. Para efectos de este trabajo se presenta sólo el desarrollo de la primera prueba ya que todas las demás son similares.

- *Prueba de hipótesis para proporciones X1.*

Las hipótesis a probar se enuncian a continuación:

H_0 : No existe diferencia en el número de tubos rechazados por sello quemado, cuando se ajusta la máquina, ya sea con cartas de ajuste actualizadas o sin actualizar.

H_1 : Si existe diferencia en el número de tubos rechazados por sello quemado, cuando se ajusta la máquina, ya sea con cartas de ajuste actualizadas o sin actualizar.

Matemáticamente, se pueden expresar de la siguiente manera:

$H_0: p_1 = p_2$ (La proporción de tubos rechazados es la misma una vez aplicada la mejora que antes de hacerlo).

$H_1: p_1 < p_2$ (La mejora aplicada funciona)

Es decir, si las cartas de ajuste se actualizan y si se ajusta la máquina con los nuevos parámetros de programación y el porcentaje de tubos disminuye, como se enuncia en la hipótesis alternativa, se puede concluir que efectivamente las cartas de ajuste utilizadas están obsoletas y es necesario actualizarlas.

En la tabla 5.2 se observa que en la nueva corrida, el valor de la proporción de tubos rechazados por sello quemado es:

$$\bar{p}_1 = \frac{43}{145} = 0.2966 \quad (\text{después de la mejora})$$

$$p_2 = \frac{126}{203} = 0.6207 \quad (\text{antes de la mejora})$$

La proporción global de tubos con el sello quemado se estima a partir de:

$$\hat{p} = \frac{n_1 \bar{p}_1 + n_2 \bar{p}_2}{n_1 + n_2} = \frac{145(0.2966) + 203(0.6207)}{145 + 203}$$

$$\hat{p} = 0.4856$$

Con este valor se puede obtener una estimación del error estándar de la diferencia de las proporciones de tubos con el sello quemado:

$$\hat{\sigma}_{\bar{p}_1 - \bar{p}_2} = \sqrt{\hat{p}(1 - \hat{p}) \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)} = \sqrt{0.4856(1 - 0.4856) \left(\frac{1}{145} + \frac{1}{203} \right)}$$

$$\hat{\sigma}_{\bar{p}_1 - \bar{p}_2} = 0.0543$$

La diferencia de las proporciones de los tubos rechazados antes y después de la mejora se estandariza a continuación. La prueba se realiza con un nivel de significancia del 5% ($\alpha = 0.05$)

$$z_o = \frac{(\bar{p}_1 - \bar{p}_2) - (p_1 - p_2)}{\hat{\sigma}_{\bar{p}_1 - \bar{p}_2}} = \frac{(0.2966 - 0.6207) - 0}{0.0543}$$

$$z_o = -5.96$$

En el bosquejo de la distribución normal mostrada en la figura 5.12 se observa que el valor obtenido para z observado (z_o) cae fuera de la región de aceptación por lo que no existe evidencia estadística para aceptar H_0 y se concluye que las cartas de ajuste que actualmente se utilizan sí influyen en el defecto del tubo rechazado por sello quemado, por lo que se deben actualizar.

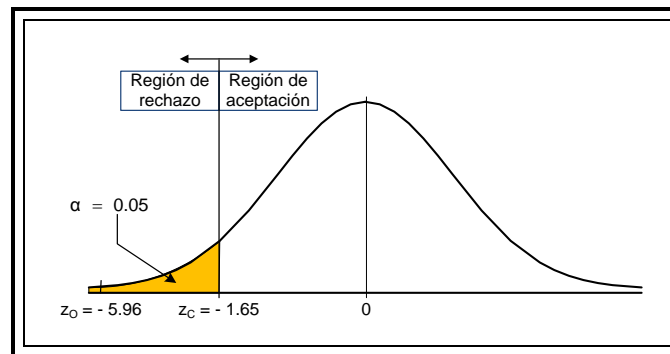


Figura 5.12 Curva normal para la prueba de hipótesis de X_1 .

A continuación, y siguiendo un procedimiento similar, se muestran los resultados de todas las pruebas de hipótesis y las conclusiones para cada prueba. Esto se hace en la tabla 5.3 para una significancia del 5%, a la que corresponde una z de corte (z_c) de -1.65.

X's	\bar{p}_1	\bar{p}_2	z_o	Se acepta	Se rechaza	Conclusión
X1	0.2966	0.6207	- 5.96		✓	Las cartas de ajuste si afectan
X2	0.4915	0.6207	- 2.26		✓	El desgaste del gauge si afecta
X3	0.5080	0.6207	- 2.91		✓	El flujo de agua si afecta
X4	0.6176	0.6207	-0.06	✓		El proveedor no afecta
X5	0.6327	0.6207	0.20	✓		El procedimiento de ajuste no afecta

Tabla 5.3 Pruebas de hipótesis para las causas potenciales del rechazo por sello quemado.
Fuente: El autor

De la tabla 5.3 se puede concluir que tanto los proveedores de tubos como el procedimiento que sigue el mecánico de línea en el cambio de formato no influyen en el rechazo de los tubos por sello quemado. En el caso de las causas que si influyen, se aplican las soluciones recomendadas juntas de manera provisional en un solo equipo para ver y analizar los resultados obtenidos bajo estas nuevas circunstancias y su efecto sobre el problema que se está atacando.

5.2.5 Comparación con el desempeño anterior

Una vez realizadas las modificaciones de manera provisional, se procede a comparar el desempeño del equipo bajo estas nuevas circunstancias, en operación normal, con el desempeño anterior. El resumen de los resultados para la nueva corrida se muestra en la tabla 5.4.

Defecto en tubo	Total	Porcentaje
Sello	112	31.11%
Centrado de taca	149	41.39%
Fuga de producto	51	14.17%
Peso	48	13.33%
Total	360	100.00%

Defecto en sello	Total	Porcentaje
Quemado	9	8.04%
Mal cortado	60	53.57%
Con burbujas	28	25.00%
Con rebaba	15	13.39%
Total	112	100%

Total de piezas producidas en la corrida: 6504 pza.

Tabla 5.4 Resultados obtenidos después de la aplicación de las soluciones provisionales a las causas raíz identificadas.
Fuente: El autor

Como se puede apreciar en la tabla, el defecto de los tubos quemados se redujo sensiblemente una vez aplicadas las soluciones para las causas identificadas como raíz del quemado del sello en los tubos. Esta disminución también contribuyó, de manera indirecta, a reducir los productos defectuosos al final de la línea, así como los productos rechazados por problemas en el sello.

En una pirámide de Pareto (Wadsworth, 2005), se pueden apreciar gráficamente los beneficios obtenidos una vez realizados los cambios. En la figura 5.13 se muestran los diagramas correspondientes, donde se han colocado los porcentajes de defectos en los

tubos y defectos en el sellado, ambos con respecto al tamaño de la corrida, dado que las corridas que se compraran son diferentes en cuanto número de piezas producidas.

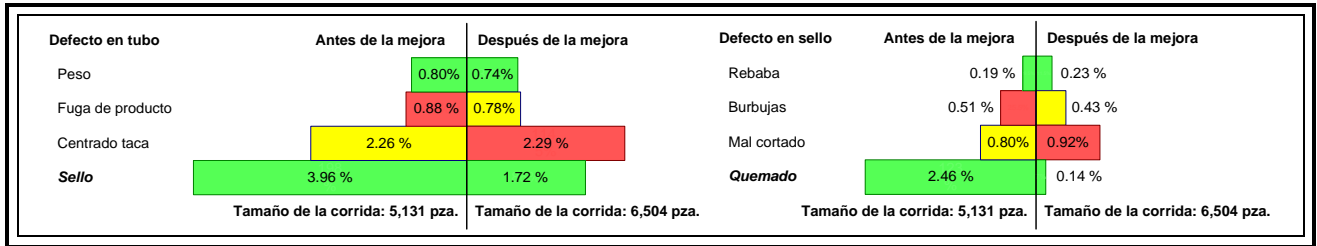


Figura 5.13 Pirámides de Pareto donde se comparan los porcentajes de defectos antes y después de la mejora.
Fuente: El autor

5.2.6 Estandarización y conclusiones

Dado que las soluciones aplicadas en el apartado anterior contribuyeron a la disminución casi completa del problema del rechazo de los tubos por sello quemado, las observaciones del departamento de mantenimiento para esta nueva situación se enuncian enseguida:

1. Revisar y actualizar las cartas de ajuste de llenadoras de tubos compresibles con parámetros tomados de la experiencia del personal mecánico del área.
Responsable: Supervisor de ajuste mecánico.
2. No alterar los tiempos de cambios de formatos de las máquinas definidos en las cartas de ajuste.
3. Revisar los gauges del almacén para cada diámetro de tubo (12, 18, 22, 30 y 40 mm) con el micrómetro. Los que tengan un desgaste superior a las 500 micras, solicitarlos al proveedor (un juego por cada diámetro de tubo).
Responsable: Almacenista.
4. Quitar bypass de tubería de agua de enfriamiento y colocar un manifold con la configuración mostrada en la figura 5.14.
Responsable: Supervisor de mantenimiento.

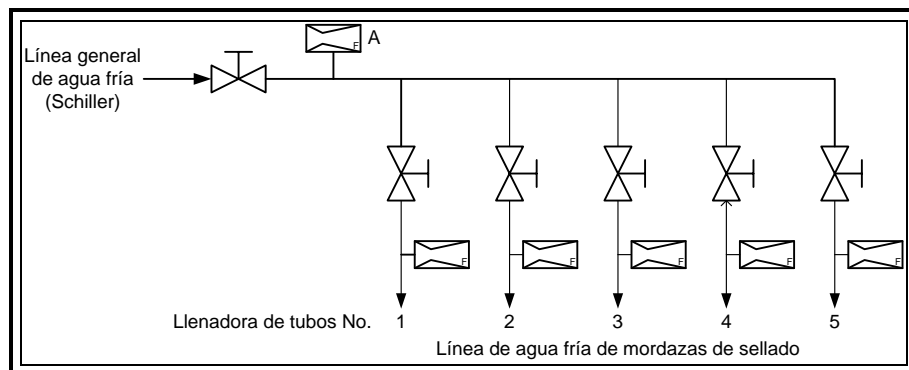


Figura 5.14 Configuración de la tubería de agua fría para máquinas llenadoras de tubos compresibles.
Fuente: El autor

5. Verificar que el flujo de agua fría en A sea igual a la suma de los flujos individuales en cada llenadora. Asimismo, cada llenadora debe tener el mismo flujo. Proponer programa de limpieza de tubería con desincrustante para evitar formación de sarro en las paredes.
Responsable: Supervisor de mantenimiento.

5.3 Variación en el peso del producto

La siguiente falla que se ataca es el problema de las variaciones en el peso del producto a la salida de la máquina. El caso que se estudia es el de tubos de 100 gramos de peso neto. La metodología se aplica de la misma manera, sólo que en este caso el mantenimiento básico ya se hizo debido a que se trata de la misma línea.

Las especificaciones de la empresa para estos tubos son 100 gramos, como límite inferior, y 103 gramos, como límite superior. La especificación es muy estricta en cuanto al límite inferior, es decir, no se aceptan tubos con pesos inferiores a los 100 gramos, pero tubos con pesos superiores a los 103 gramos se pueden quedar con la condición de que no presenten otro defecto.

5.3.1 Identificación del problema

En el diagrama de Pareto de la figura 5.5 se observa que los tubos rechazados por problemas de peso, en porcentaje, son los menos. Sin embargo, si los tubos tienen problemas de peso, cabría en este momento hacer la pregunta: ¿qué tan grave es el problema? Para poder determinarlo, se hace un muestreo sistemático de una corrida de 15,304 piezas de las cuales se extrajeron 10 piezas cada media hora y se registra el peso que marcan en la báscula.

Los datos del muestreo y la hoja de datos propuesta para la toma de los pesos, se muestran en la figura 5.15.

Mediciones para identificación de valores reales de un parámetro												
Línea:	Llenado/sellado de tubos compresibles						Fecha:	04-mar-08				
Máquina:	Llenadora mod. 850						Valor estándar	100 - 103 gramos				
Producto:	Crema para manos						Piezas producidas:	15.304				
Defecto:	Peso en tubos de 100 gramos						Método de muestreo:	Sistemático (10 pza/media hora)				
Piezas muestreadas:	150											

Muestra	Lectura observada										Promedio
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	102,4	99,3	101,7	102,8	99,6	103,3	103,6	99,1	103,4	101,5	101,7
2	99,2	100,3	103,3	99	100,5	101,5	100,1	101,1	100,3	101	100,6
3	102,9	101,3	101,7	103	102,1	101	101,6	102,9	101	99,6	101,7
4	101,4	100,2	103,3	101,2	103,6	102,9	100,5	102	101,2	102,4	101,9
5	101,8	100,3	102,2	102,6	101,9	102,4	99,5	101	101,7	101,5	101,5
6	101,3	103	102,3	101,7	102,9	102,2	103,1	101,7	101,7	99,8	102,0
7	102,9	100,4	102,2	102,3	103,7	101	101,3	99,6	102,4	102,2	101,8
8	102,8	101,9	102,5	102,9	103,6	103,2	101,2	103,3	101,5	101,3	102,4
9	101,8	102,2	102,6	99,5	102,8	102,6	102,1	101,7	100,6	103,1	101,9
10	101,8	102,9	102,5	103,1	101	103,1	101,8	101,7	102,7	102,9	102,4
11	102,4	103,2	104,3	101	102,4	102,8	103,2	101,1	99,5	102,9	102,3
12	102,3	102,1	102,9	101,3	103,1	101,7	102,6	101,3	99,8	100,7	101,8
13	100,9	100,6	103,3	102,6	103,6	104,2	101,5	101,5	102,3	102,9	102,3
14	100,2	103,1	101,4	99,3	100,9	99,9	103,3	102	102,9	102,8	101,6
15	100,6	102,3	102,7	102,5	102,1	99,4	101,5	101,9	101,3	102,6	101,7
16											
17											
18											
19											
20											

Observaciones: Estudio para identificar problemas en el peso en tubos de 100 gramos.

Elaboró: Ing. Enrique Hernández Revisó: Ing. Ricardo León Aprobó: Ing. Ricardo León

Figura 5.15 Resultados del muestreo de pesos para tubos de 100 gramos.
Fuente: El autor

En la figura 5.16 se muestra el histograma que resulta de la estadística descriptiva de los 150 datos registrados. Este estudio se hace con la ayuda del software Minitab. Aunque el estudio se hace para tubos de 100 gramos, es lógico suponer que los diferentes tubos, con sus diferentes pesos, deben tener problemas similares cuyas causas también son las mismas.

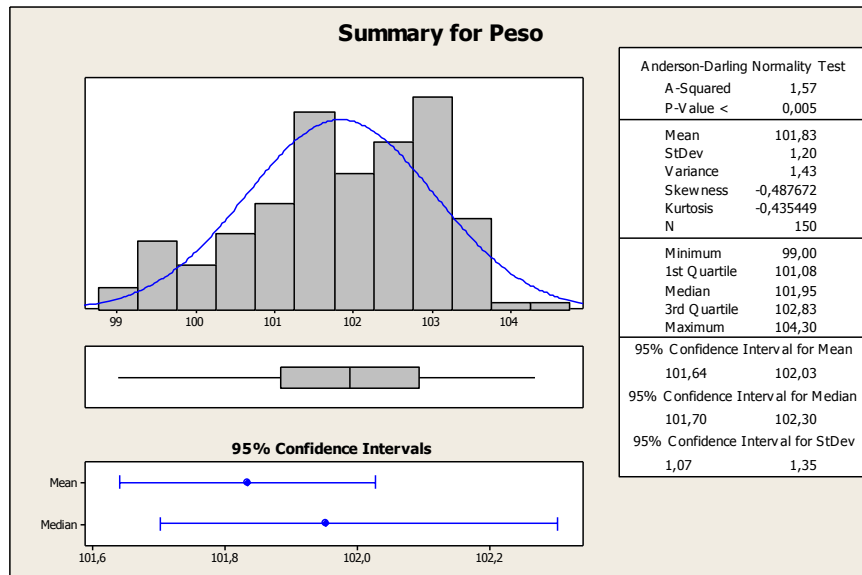


Figura 5.16 Estadística descriptiva para los datos de los pesos para tubos de 100 gramos.

Se aprovecha la habilidad del software para realizar la prueba de normalidad de Anderson Darling, donde se puede concluir que los pesos se comportan normalmente.

En los resultados de la estadística descriptiva para los pesos se puede apreciar que el peso promedio es de 101.83 gramos con una desviación estándar de 1.20 gramos. De igual manera, se observa que hay valores tan pequeños como 99 gramos y tan grandes como 104.3 gramos. En este caso se puede observar que hay un pequeño sesgo hacia los pesos superiores a los 101 gramos, esto debido a que se prefiere entregar productos con mayor peso, los cuales no se rechazan, que entregar productos con pesos inferiores a los 100 gramos, los cuales serán desechados. Según la política de la empresa, los tubos con pesos menores a los 100 gramos serán desechados en tanto que los mayores a 103 gramos serán aceptados.

Para determinar cuán grave puede ser el hecho de que haya pesos que salgan fuera de las especificaciones, se hace un análisis de la capacidad del proceso, mismo que se utiliza para saber qué tan capaz es la máquina de entregar productos dentro de las especificaciones determinadas por la empresa. Dicho estudio se realiza también en Minitab y los resultados se muestran en la figura 5.17.

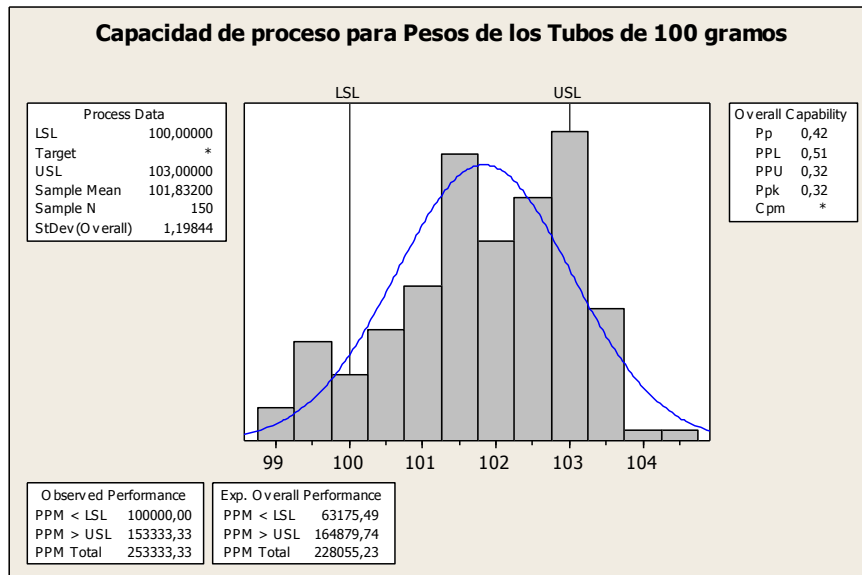


Figura 5.17 Estudio de capacidad de proceso para pesos de tubos de 100 gramos.

Si sólo se presta atención a los resultados del diagrama de Pareto, donde se especifica que el defecto menos frecuente es el peso del producto, se podría caer en el error de minimizarlo y dejarlo desatendido, pero con el estudio de capacidad, se puede observar que la máquina tiene un coeficiente de capacidad potencial (c_p) de tan sólo 0.42, el cual, según el recuadro del desempeño esperado en partes por millón de la misma figura 5.17, arrojaría un total de hasta 228 mil piezas fuera de especificaciones por cada millón de piezas producidas y cerca de 165 mil piezas con un peso superior a los 103 gramos. Esto desde luego no es un problema que perjudica al cliente, pero sí perjudica a la empresa.

5.3.2 Identificación de la causa raíz de la variación en el peso

Para determinar en dónde se puede encontrar la falla, se recurre a un mapa de proceso de tercer nivel, donde se desagrega el bloque marcado con el número 3: “Llenar tubo con producto” de la figura 5.9, la cual es el mapa de procesos del segundo nivel de llenado y sellado de los tubos. Dicho mapa se muestra a continuación en la figura 5.18.

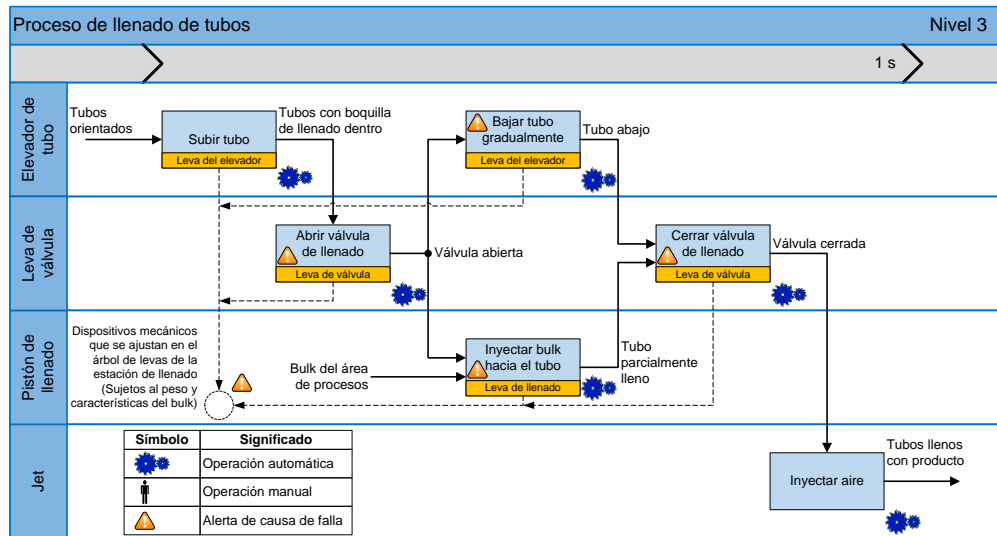


Figura 5.18 Mapa de procesos de nivel 3 para el proceso de llenado de tubos compresibles.

Fuente: El autor

En las bandas referentes a los mecanismos responsables de llevar a cabo las acciones que se encierran en los rectángulos del mapa de la figura 5.18, se debe mencionar que se trata de mecanismos que realizan ciclos, los cuales están sincronizados por un árbol de levas. Es decir, el elevador de tubo se halla mecánicamente controlado por la leva del elevador, la cual hace que suba y baje. La válvula se abre y cierra gracias a una leva que se encarga de realizar la operación. El pistón de llenado se encuentra conectado a una leva que se encarga de llenar la camisa del pistón, con la cantidad de bulk requerida, inyectar el bulk hacia el tubo y después recargar la camisa para la siguiente operación. El jet se halla dentro del cuerpo de la boquilla y la válvula que inyecta aire para el vaciado del bulk remanente en la boquilla, es controlada por una leva que se encarga de activarla cada vez que la válvula se cierra y el pistón terminó de inyectar el bulk hacia el tubo.

En el mapa de procesos del llenado de los tubos, sólo se presentan los bloques que se consideran, según el departamento de mantenimiento, como responsables de las variaciones en el peso. Esto hace también al mapa un poco más sencillo de interpretar, aunque es evidente que se necesita estar muy familiarizado con el funcionamiento de la estación de llenado para comprender perfectamente su funcionamiento.

Los recuadros marcados con el símbolo de alerta se agregan como encabezados de causas raíz en el diagrama de Ishikawa. Este diagrama es desarrollado en conjunto con el departamento de mantenimiento de la empresa y su versión final se muestra en la figura 5.19.

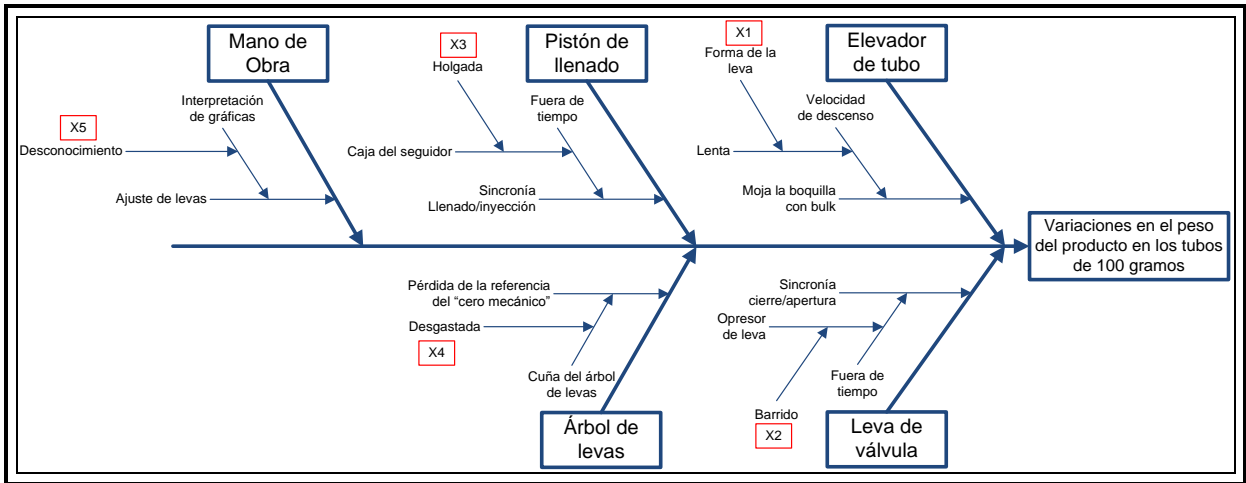


Figura 5.19 Versión final del diagrama de Ishikawa para las causas potenciales de las variaciones en el peso de los tubos.
Fuente: El autor

Una vez obtenido el diagrama, es necesario determinar, de todas las causas potenciales, cuáles de ellas realmente inciden en el problema que se trata de resolver. Pare ello, se plantea una tabla AMEF donde se incluye una hipótesis nula (H_0) para cada causa potencial. Su versión final se muestra a continuación en la tabla 5.5.

X's	Modo potencial de falla	Efecto	Causas potenciales	Hipótesis nula	S	O	D	NPR	Acciones recomendadas
X1	La boquilla de llenado se moja con el producto que se está envasando en el tubo	Variaciones en el peso del producto en tubos de 100 gramos	Desgaste en la caja del seguidor de leva del elevador	No hay diferencia si la caja del seguidor está desgastada o no	2	5	9	90	Revisar levas para boquilla en almacén y compararlas con los dibujos del proveedor. Utilizar sólo aquellas que muestren diferencias mínimas. Resp. Almacenista

Tabla 5.5 Tabla AMEF para las causas potenciales del problema en el peso en tubos de 100 gramos.
Fuente: El autor

X's	Modo potencial de falla	Efecto	Causas potenciales	Hipótesis nula	S	O	D	NPR	Acciones recomendadas
X2	Sincronía cierre-apertura de la leva de la válvula fuera de tiempo	Variaciones en el peso del producto en tubos de 100 gramos	Opresor de leva barrido	No hay diferencia si el opresor de la leva de la válvula está barrido o no.	2	8	9	144	Revisar roscas de alojamiento del opresor. Hacer prueba con aquellas que no presenten problemas y estudiar opción de colocar insertos con roscas nuevas en aquellas levas con problemas. Resp. Supervisor de ajuste mecánico
X3	Sincronía recarga/inyección de la leva de la válvula fuera de tiempo		Holgura en la caja del seguidor de leva presenta holgura o no de llenado	No hay diferencia si la caja del seguidor de leva presenta holgura o no	2	8	10	160	Revisar dimensionalmente la caja del seguidor de leva para tubos de 100 gramos, elegir la que mejor se ajuste y hacer una prueba de llenado. Hacer lo mismo para las demás levas y entregar reporte de resultados. Resp. Supervisor de ajuste y técnico de taller.
X4	Pérdida de la referencia del cero mecánico del árbol de levas		Desgaste en la cuña de la flecha	No hay diferencia si la cuña de la flecha del árbol de levas está desgastada o no	2	2	3	12	Programar carga en máquina para desensamble de árbol de levas. Si hay desgaste en caja o cuña, rellenar con soldadura y maquinar para hacer pruebas. Entregar reporte de resultados. Resp. Programador y Sup. de ajuste.
X5	Ajuste deficiente de las levas de la estación de llenado		Desconocimiento de la interpretación de las gráficas de ajuste de la máquina enviadas por el proveedor	No hay diferencia si se desconoce cómo interpretar las gráficas del proveedor o no.	2	7	5	70	Verificar que el personal técnico esté haciendo los ajuste conforme a las gráficas. Rastrear al técnico que hizo el ajuste en estudio y contrastarlo con un ajuste hecho por Armando Díaz para el mismo peso. Preparar evaluación técnica del manejo de gráficas y programar curso para el personal del área. Resp. Sup. de ajuste y Armando Díaz.

Tabla 5.5 (continuación) Tabla AMEF para las causas potenciales del problema en el peso en tubos de 100 gramos.
Fuente: El autor

Una vez realizadas las acciones recomendadas, se llena nuevamente el check-list presentado en la figura 5.15 para determinar si las causas potenciales enunciadas en el diagrama de Ishikawa realmente están influyendo en la variación del peso del producto en los tubos de 100 gramos. Cabe mencionar aquí que, de nuevo, se realiza una sola acción recomendada a la vez y se lleva a cabo una corrida en donde se toma una muestra de 150 tubos.

Las tablas llenas para cada caso se muestran en el anexo A.5 de este trabajo. Para las pruebas de hipótesis, se tabulan únicamente los promedios y la correspondiente varianza para cada muestra. Dicho resumen se muestra en la tabla 5.6.

X's	Acción recomendada	Piezas producidas	\bar{X}	S_x^2
X1	Levas en buen estado	5,048	101.08	1.38
X2	Rosca opresor en buen estado	6,550	102.13	1.31
X3	Caja de seguidor ajustada	3,986	100.94	1.37
X4	Árbol de levas reparado	10,076	100.85	0.83
X5	Ajuste conforme a gráficas	11,204	100.92	0.99

Tabla 5.6 Resumen de resultados obtenidos después de las acciones recomendadas.
Fuente: El autor

Con los resultados obtenidos se realiza una prueba de hipótesis de una cola para la igualdad de varianzas dado que se trata de variables de tipo continuo. Para efectos de este trabajo se presenta sólo el desarrollo de la primera prueba ya que todas las demás son similares.

- *Prueba de hipótesis para la igualdad de varianzas X1.*

Las hipótesis a probar se enuncian a continuación:

H_0 : No existe diferencia en la variación del peso del producto en los tubos, ya sea que la caja del seguidor de leva del elevador esté desgastada o no.

H_1 : Sí existe diferencia en la variación del peso del producto en los tubos, si la caja del seguidor de leva del elevador está desgastada.

Matemáticamente, se pueden expresar de la siguiente manera:

$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ (La dispersión de los pesos del producto en los tubos es la misma una vez aplicada la mejora que antes de hacerlo).

$H_1: \sigma_1^2 < \sigma_2^2$ (La dispersión es menor si la mejora aplicada funciona)

Es decir, si se utiliza una leva para el elevador de tubo cuya caja del seguidor no presente desgaste o éste sea mínimo y se da el caso que la dispersión (varianza) de los pesos del producto en los tubos disminuye, como se enuncia en la hipótesis alternativa, se puede concluir que efectivamente las levas que se deben utilizar para el caso del elevador de tubo tienen que ser aquellas que no presenten desgaste en la caja del seguidor.

En la tabla 5.6 se observa que en la nueva corrida, el valor de la desviación estándar de la muestra es:

$$s_1^2 = 1.38 \text{ para una muestra } (n_1) \text{ de 150 piezas.}$$

De la primera corrida, se tiene que,

$$s_2^2 = 1.43 \text{ para una muestra } (n_2) \text{ de 150 piezas.}$$

Con estos valores de varianzas, se calcula el estadístico F_o ,

$$F_o = \frac{s_1^2}{s_2^2} = \frac{1.38}{1.43} = 0.9650$$

Para una significancia del 5% se tiene en un bosquejo de la distribución F de Fisher mostrada en la figura 5.20, que la región de aceptación de la hipótesis nula se halla a la derecha del valor de $F_{1-\alpha, n_1-1, n_2-1}$ ($F_{1-0.05, 149, 149}$), pues se trata de una prueba de cola izquierda:

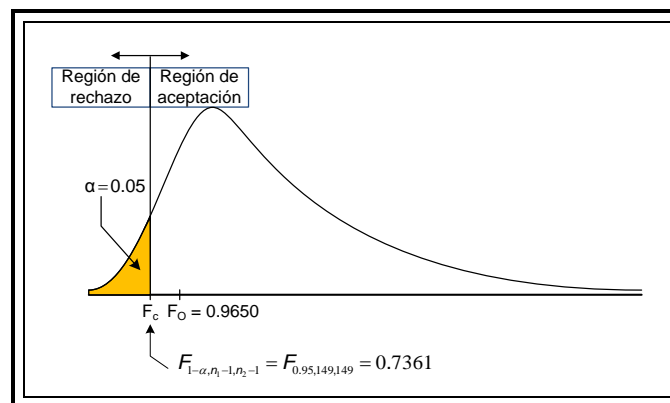


Figura 5.20 Distribución F para la prueba de hipótesis X1.
Fuente: El autor

Como se puede observar en la figura 5.20 la F_o (F observada) es mayor que la F_c (F de corte), por lo que no existe evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula, lo cual indica que la dispersión en el peso de los tubos de 100 gramos no se ve afectada por la holgura debida al desgaste en la caja del seguidor del elevador de tubo.

A continuación, y siguiendo un procedimiento similar, se muestran los resultados de todas las pruebas de hipótesis y las conclusiones para cada prueba. Esto se hace en la tabla 5.7 para una significancia del 5%, a la que corresponde una F de corte (F_c) de 0.7361.

X's	S_1^2	S_2^2	F_o	Se acepta	Se rechaza	Conclusión
X1	1.38	1.43	0.9650	✓		El desgaste en la caja del seguidor de la leva del elevador no afecta
X2	1.31	1.43	0.9161	✓		El opresor de leva barrido no afecta
X3	1.37	1.43	0.9580	✓		La holgura en la caja del seguidor de leva del pistón de llenado no afecta
X4	0.83	1.43	0.5804		✓	Desgaste en la cuña del árbol de levas si afecta
X5	0.99	1.43	0.6923		✓	La interpretación de las gráficas de ajuste si afecta

Tabla 5.7 Pruebas de hipótesis para las causas potenciales del rechazo por sello quemado.
Fuente: El autor

De la tabla de la tabla 5.7 se observa que los desgastes en las cajas del seguidor de las levas del elevador y del pistón de llenado no afectan la variabilidad del peso, así como el hecho del que el opresor de la leva de la válvula se encuentre barrido no afecta dicha variabilidad. En el caso de las causas que si influyen, se aplican las soluciones recomendadas juntas de manera provisional en un solo equipo para ver y analizar los resultados obtenidos bajo estas nuevas circunstancias y su efecto sobre el problema que se está atacando.

5.3.3 Comparación con el desempeño anterior

Una vez realizadas las modificaciones de manera provisional, se procede a comparar el desempeño del equipo bajo estas nuevas circunstancias, en operación normal, con el desempeño anterior. El resumen de los resultados para la nueva corrida se muestra en la tabla de la figura 5.21.

Mediciones para identificación de valores reales de un parámetro												
Línea:	Llenado/sellado de tubos compresibles						Fecha:					27-mar-08
Máquina:	Llenadora mod. 850						Valor estándar					100 - 103 gramos
Producto:	Crema para manos de aniversario						Piezas producidas:					8.506
Defecto:	Peso en tubos de 100 gramos						Método de muestreo:					Sistemático (10 pza/media hora)
Piezas muestreadas:	150											

Muestra	Lectura observada										Promedio
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	100,5	100,6	102,4	100,6	101,1	101,9	102,2	101,2	101,7	102,4	101,5
2	101,5	102	101,1	100,7	101,2	101,1	100,2	101,1	101,6	101,8	101,2
3	100,6	101,8	102	100,7	101,6	101,9	100,2	101	101,1	102,3	101,3
4	101,4	101,8	100,5	101,7	102,7	101	100,3	100,6	100,7	100,3	101,1
5	101,4	101,6	101,5	101	101,3	101,2	100,1	100,2	102,6	100,4	101,1
6	100,9	100,2	101,9	102,2	102,4	101,7	101,2	100,3	101,5	101	101,3
7	100,7	100,8	102	100	101,8	101,9	100,3	101	101,7	101,1	101,1
8	100,8	101,2	100,4	101,8	100,7	101,5	101,6	100,8	101,2	100,7	101,1
9	101,1	100,3	101,3	101,6	101,9	101,4	102	101,8	102,2	101,5	101,5
10	100,1	102,7	102,5	101,3	102,1	101	101,6	101,2	100,7	100,9	101,4
11	100,3	100,3	102,2	101,8	101,5	101,2	100,9	101,2	101,7	101,2	101,2
12	100,3	102,9	102,3	100,4	102,1	101,4	100	102,3	102,3	101,3	101,5
13	101,7	100,9	100,4	101,6	102,1	100,1	100,9	101,1	101,1	102	101,2
14	101,7	101,5	101,8	101,6	100,4	101,2	100,6	102	101,7	101	101,4
15	100,7	102	100,3	101	102,4	100,6	100,3	101,1	100,3	101,4	101,0
16											
17											
18											
19											
20											

Observaciones: Comparación con el desempeño anterior para pesos en tubos de 100 gramos

Elaboró: Ing. Hugo Ferrer Revisó: Ing. Enrique Hernández Aprobó: Ing. Ricardo León

Figura 5.21 Resultados obtenidos después de la aplicación de las soluciones provisionales a las causas raíz identificadas.
Fuente: El autor

Con estos valores se obtiene el resumen de la estadística descriptiva. Dicho resumen se muestra en la figura 5.22.

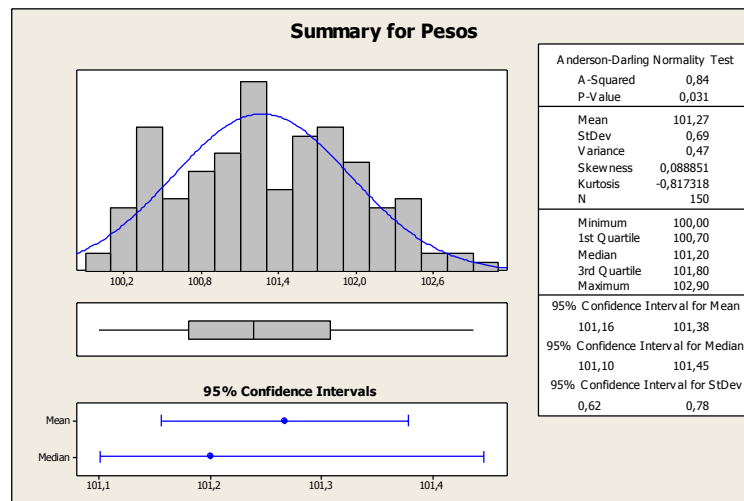


Figura 5.22 Estadística descriptiva para los datos de los pesos para tubos de 100 gramos después de la mejora.
Fuente: El autor

De la misma manera, es posible graficar y calcular la capacidad del proceso para esta nueva condición a fin de tener gráficamente los beneficios obtenidos con las mejoras aplicadas. Dicha gráfica se muestra en la figura 5.23.

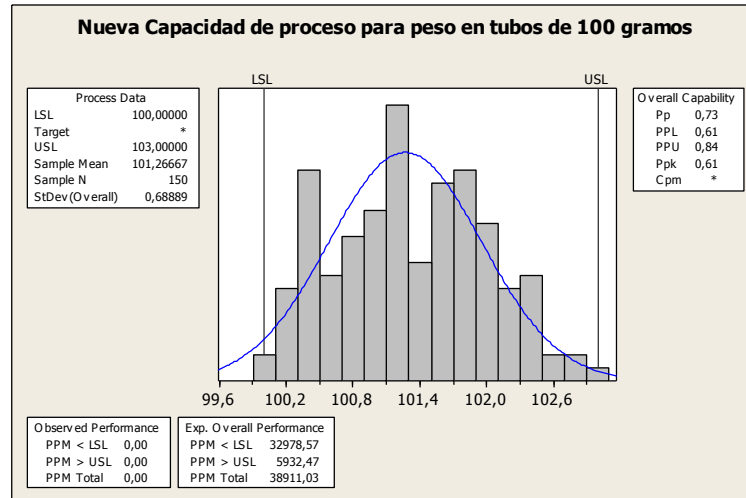


Figura 5.23 Estudio de capacidad de proceso para pesos de tubos de 100 gramos después de la mejora.
Fuente: El autor

En estas nuevas gráficas se puede observar que el promedio de los pesos sigue estando alrededor de los 101 gramos (101.27); sin embargo, la variancia se ha reducido notablemente, pues de 1.43 que se obtuvo en la primera corrida, se tiene ahora una variancia de 0.47. También se puede observar que los pesos ahora están, en su mayoría, dentro de especificaciones y, aunque con ciertos picos intermedios, el sesgo hacia arriba a pesos mayores a los 101 gramos fue reducido y ahora el proceso se encuentra más centrado. El total de piezas que posiblemente queden fuera de estos límites se redujo de 228 mil piezas a cerca de 39 mil por cada millón de piezas producidas.

5.3.4 Estandarización y conclusiones

Las acciones recomendadas contribuyeron notablemente a la reducción de la variabilidad en los pesos del producto en los tubos, además de que el proceso se centró más hacia los 101 gramos. Sin embargo, a pesar de que hubo una mejora notable en el índice de capacidad potencial del proceso (c_p), el valor de 0.73 todavía es un valor demasiado bajo como para considerarlo aceptable para un proceso capaz.

Con la finalidad de identificar si existe alguna condición no detectada que influya en la variabilidad del peso en tubos de 100 gramos, se elabora un gráfico de control $\bar{x} - S$. Este gráfico fue seleccionado debido a que las muestras fueron de 10 piezas.

La idea es identificar si el proceso de llenado se encuentra bajo control estadístico o si existe algún patrón para que éste sea atacado al aplicar la metodología nuevamente.

La gráfica de control obtenida con los datos de la tabla de la figura 5.23 se desarrolló con la ayuda del software estadístico Minitab. Dicha gráfica se muestra a continuación en la figura 5.24.

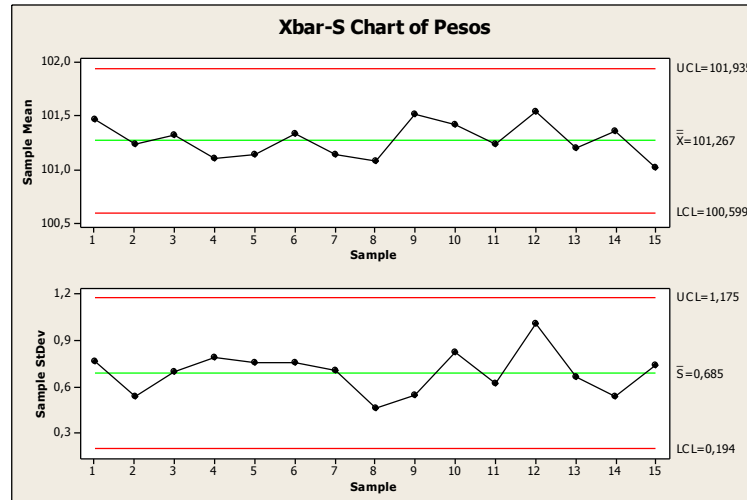


Figura 5.24 Gráfica de control $\bar{x} - S$ para el peso en tubos de 100 gramos después de la mejora.
Fuente: El autor

En la gráfica de control de la figura 5.24 se puede apreciar que el proceso de llenado de tubos de 100 gramos se encuentra bajo control estadístico, pues no se observa ningún punto fuera de los límites de control, ni tampoco se observa algún patrón definido que haga suponer que el proceso está fuera de control.

Se regresa al análisis del diagrama causa-efecto para buscar si hay alguna causa que no se haya considerado para el efecto de la variación del peso en los tubos de 100 gramos, sin embargo, el departamento de mantenimiento considera que dicho diagrama contiene todas las posibles causas del problema en cuestión por lo que se revisa si las soluciones propuestas están correctamente aplicadas.

Al revisar la reparación provisional de la flecha, se observa cierto desgaste en la soldadura, debido a que no hubo una correcta amalgama entre flecha y material de aporte de la soldadura porque la flecha del árbol de levas tiene un tratamiento térmico para incrementar su dureza y éste no permite la amalgama perfecta, además de que la soldadura no tiene la dureza que se necesita para el esfuerzo que se lleva a cabo.

Debido a que un árbol de levas no se tiene en el almacén como refacción, se decide trabajar con el reparado y, entonces, tomar las siguientes acciones en la línea:

1. Comentar con el fabricante de la maquinaria los desgastes que se presentan en las cajas del seguidor de las levas. Verificar si ha habido diferencias en el tratamiento térmico de las levas o el seguidor que se usa no es el recomendado por el fabricante. Elaborar reporte de las levas que se tienen en almacén cuándo

se compraron y el desgaste que presentan para identificar alguna causa probable del desgaste.

Responsable: Ingeniería/almacenista.

2. Programar curso de interpretación de gráficas de ajuste con el representante del proveedor en México. Incluir a todo el personal técnico de Tubos-Talcos y técnicos del taller de desarrollo.

Responsable: Líder de mantenimiento.

3. Revisar el estado de los árboles de levas de las demás máquinas llenadoras de tubos y, en caso necesario, programar reparación. Elaborar reporte y entregarlo a ingeniería.

Responsable: Supervisor de mantenimiento/Programador de producción.

4. Dar seguimiento al comportamiento del peso en los tubos a través de las cartas de control propuestas. Asignar becarios de control de calidad para el registro de datos y reportar cualquier anomalía o punto fuera de control.

Responsable: Supervisor de calidad/Supervisor de producción.

5. Proponer para el siguiente proyecto de compra de refacciones de envasado la inclusión de al menos el número de árboles de levas que se encuentren dañados según el reporte de mantenimiento de la revisión de los mismos.

Responsable: Líder de mantenimiento/Ingeniería.

6. Realizar un estudio de prevención para estas máquinas a fin de detectar cuál o cuáles son las causas por las que la flecha y la cuña sufren desgaste. Analizar esfuerzos, alineaciones de regletas, seguidores, levas y mecanismos relacionados, así como forma de ajustar del personal involucrado. De ser posible llevar a cabo un análisis de vibraciones.

Responsable: Líder de mantenimiento.

5.4 Prevención de fallas esporádicas en línea de llenado de tubos

Para el caso de la prevención de fallas esporádicas, se aprovecha que el árbol de levas del apartado anterior sigue teniendo desgaste aún cuando fue reparado. Esto se hace debido a que el departamento de mantenimiento quiere asegurar que cuando coloque los nuevos árboles de levas, éstos no presenten el mismo problema, es decir, se desea prevenir el deterioro de la flecha y la continuidad del problema de la variabilidad en los pesos. El desarrollo de la metodología y los resultados obtenidos se detallan en los siguientes párrafos.

El desarrollo de la metodología contempla el mantenimiento básico como primer paso, sin embargo, éste ya se está realizando por lo que se continúa con el paso siguiente que es la identificación de los modos potenciales de falla.

5.4.1 Identificación de modos potenciales de falla

En los apartados anteriores ya se han hecho algunos avances para la identificación de los modos potenciales de falla, es decir, se han detectado cuáles son los problemas que la línea puede tener al entregar un producto fuera de especificación, de igual manera se desarrollaron algunos mapas de proceso, los cuales indican en qué parte de la máquina se debe buscar la causa de la falla o problema que se quiere atacar. Asimismo se ha hecho un diagrama causa-efecto para identificar cuál es la causa de la variabilidad en los pesos de los tubos.

Con la finalidad de dar seguimiento a la metodología de la prevención de fallas esporádicas para esta misma línea, se parte de un árbol de fallas para identificar cuáles pueden ser las fallas que presenta la máquina para que un producto sea considerado fuera de especificaciones. El árbol de fallas de primer nivel para un producto fuera de especificaciones en la línea de llenado de tubos compresibles se muestra en la figura 5.25.

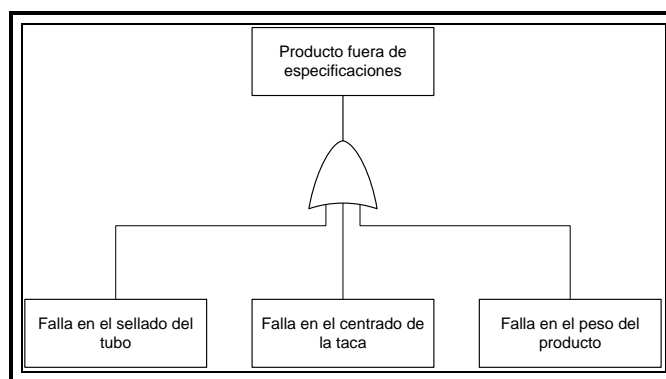


Figura 5.25 Árbol de fallos de primer nivel para un producto fuera de especificaciones.
Fuente: El autor

En la figura 5.25 se puede observar que para considerar a un producto fuera de especificaciones y, por lo tanto, desecharlo, éste debe presentar alguna falla ya sea en el sello, el centrado de la taca o el peso del producto. Dado que la empresa está interesada en resolver el problema del árbol de levás, se toma como evento principal (top event) a la “falla en el peso del producto” para identificar cómo es que el peso puede presentar variabilidad y quedar fuera de las especificaciones de la empresa.

Para poder comprender cuáles eventos tienen que aparecer para que se presenten problemas en el peso del producto en los tubos, es necesario conocer cómo funciona la línea, la máquina y, de ésta, la estación donde se puede encontrar la causa de dicho problema. Para eso se recurre a un mapeo de procesos mismo que se ya se ha realizado en apartados anteriores. La figura 5.7 muestra el mapa de primer nivel de la línea de llenado y sellado de tubos; la figura 5.8 muestra el mapa de segundo nivel de la máquina que se encarga de llenar y sellar los tubos. Dado que se está interesado en el proceso de llenado de tubos, se desagrega a un tercer nivel el bloque de “llenar tubos

con producto”. Dicho mapa se reproduce a continuación para mayor facilidad y se etiqueta como figura 5.26.

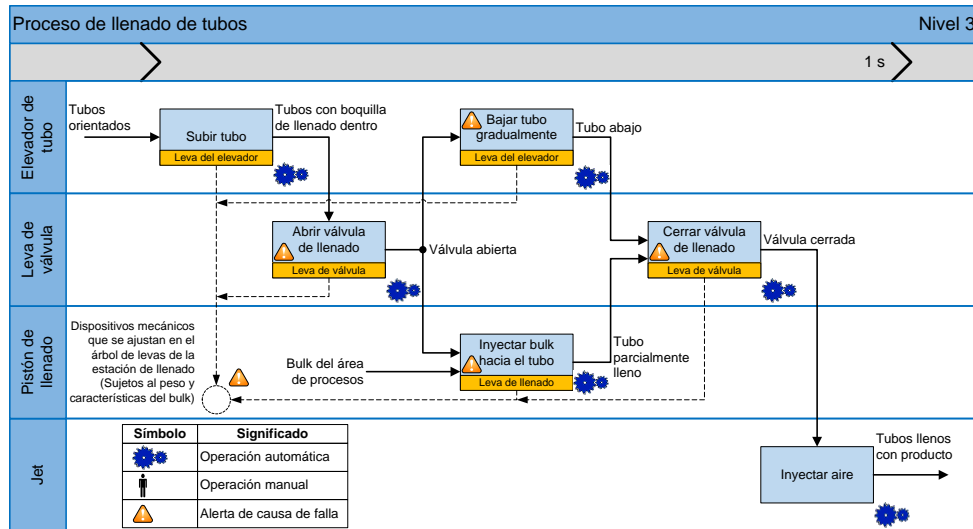


Figura 5.26 Mapa de procesos de tercer nivel para el llenado de tubos compresibles.
Fuente: El autor

Una vez que el proceso de llenado de tubos ha sido mapeado, es posible identificar en el tercer nivel del mapa de procesos los mecanismos encargados de llenar el producto en el tubo. Con esto en mente, cada uno de los elementos de la banda izquierda del mapa se puede colocar como un evento en el árbol de fallas y, entonces empezar a buscar cuáles son los elementos que pueden provocar la falla en el peso de los tubos.

El análisis del árbol de fallos se hace sólo de forma cualitativa, ya que no se está interesado en la probabilidad de que tales elementos fallen, de hecho tales probabilidades se desconocen. El hecho aquí es detectar cuáles son los elementos que pudieran tener alguna relación directa con la falla para monitorear su desempeño y eliminar las condiciones de riesgo que lleven a la posible falla.

El desglose final del árbol de fallas desarrollado con ayuda del departamento de mantenimiento se muestra en la figura 5.27. Cabe mencionar aquí que sólo se desarrolla el evento “falla en el árbol de levas” porque se aprovechan los resultados obtenidos en el apartado anterior y por la preocupación de la empresa de encontrar la causa raíz que provoca los problemas en el árbol de levas.

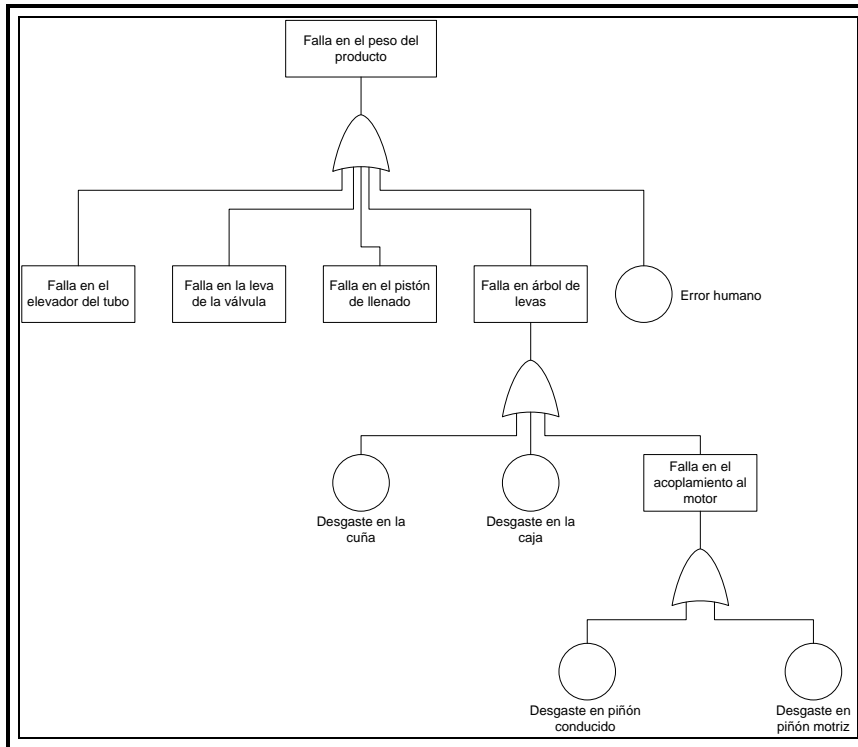


Figura 5.27 Árbol de fallas para el evento de falla en el peso del producto en los tubos.
Fuente: El autor

5.4.2 Identificación de la causa raíz de la falla en el árbol de levas

Para la identificación de la causa raíz se utiliza un diagrama causa-efecto en el que cada evento básico se coloca como causa principal y el top event ocupa la cabeza del diagrama. Este diagrama es desarrollado en conjunto con el departamento de mantenimiento y su versión final se presenta en la figura 5.28.

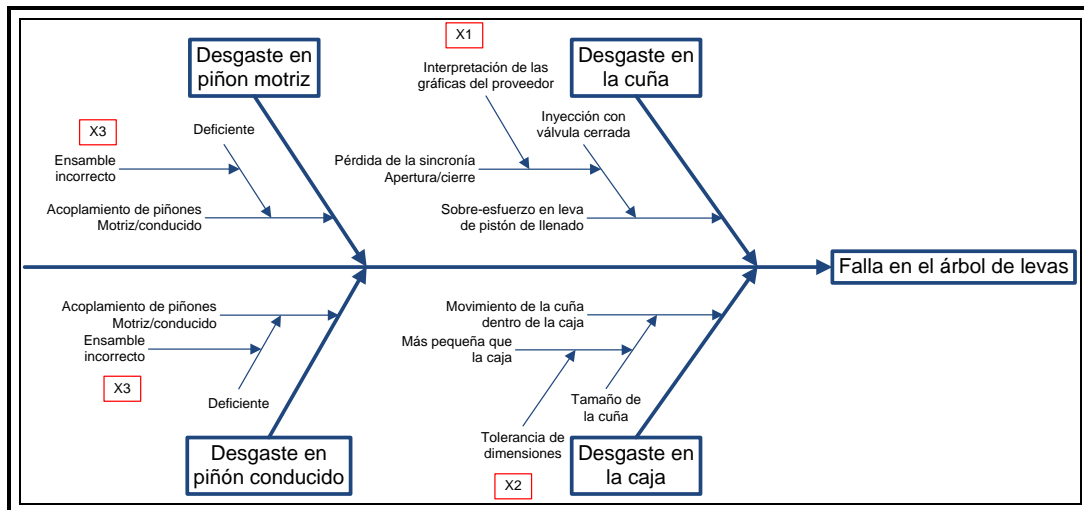


Figura 5.28 Diagrama causa-efecto para la falla en el árbol de levas.
Fuente: El autor

Como puede observarse en el diagrama causa efecto, existen tres condiciones de riesgo que deben ser monitoreadas y/o eliminadas según sea el caso. Sólo se consideran tres porque el desgaste en el conjunto piñón motriz y conducido de la flecha del árbol de levas se considera la misma causa raíz para el desgaste de cualquiera de los dos piñones.

Una vez encontradas las posibles causas raíz de la falla en el árbol de levas, es preciso definir cuáles serán las condiciones que se estarán monitoreando para saber que el árbol no tendrá problemas y que, en caso de alguna anomalía en esa condición, sea reparada antes de que cause algún daño.

5.4.3 Monitoreo de la condición de riesgo y prevención

De las tres condiciones de riesgo encontradas como posibles causas de la falla en el árbol de levas, la única que se puede monitorear de manera continua es X1. Esta condición no puede esperar a que el personal técnico asista al curso de interpretación de las gráficas enviadas por el proveedor para lograr la perfecta sincronía entre los ciclos de la máquina: Apertura/cierre de la válvula, inyección de producto/recarga y subida/bajada del elevador del tubo.

Las otras dos condiciones, dimensiones de la cuña y ensamble del árbol sólo pueden ser revisadas una vez que se tengan los dispositivos enviados por el proveedor. Sin embargo, los pronósticos más optimistas señalan que para fin de año estarán esas piezas en almacén.

En un estudio analítico del funcionamiento de la máquina, se determina que la corriente del motor es un indicador del esfuerzo que realiza el árbol de levas. Dado que el árbol de levas es movido por el motor, cualquier esfuerzo en el árbol será transmitido a la flecha del motor. De igual manera, cualquier esfuerzo en el motor se verá reflejado en un incremento en la temperatura del mismo y en un incremento en la corriente de alimentación, la cual es un parámetro que se puede medir fácilmente con la máquina en movimiento y registrarse de manera regular para llevar un control e identificar una posible anomalía o causa especial que provoque un sobre-esfuerzo en el árbol.

Dado que se trata de un motor trifásico se tienen tres lecturas de corriente cada vez, por lo que se puede utilizar una gráfica de control de medias y rangos. Se desconoce la corriente nominal que debe consumir el motor de la máquina, por lo que se desensambla la válvula, se arranca la máquina y se mide la corriente. En este caso se tiene una corriente de consumo de: Fase A = 2.15 amperes, fase B = 2.16 amperes, fase C = 2.15 amperes. Se ensambla la máquina y se registra nuevamente la corriente: Fase A = 2.15 amperes, fase B = 2.18 amperes, fase C = 2.17 amperes. Con estos valores de corriente, se puede promediar la corriente total y a partir de allí empezar a tomar datos para generar la gráfica.

El formato que se propone para la captura de datos de este tipo se presenta en la figura 5.29.

Captura de datos de corriente de motores

Línea: Llenado/sellado de tubos compresibles Corriente nominal _____
Máquina: Llenadora mod. 850 (L 31) FA 2,15 [A]
No. Serie: 14-233 FB 2,18 [A]
Voltaje: 440 VAC FC 2,17 [A]

Lectura No.	Fecha	Turno	Corrientes de consumo					Elaboró
			FA	FB	FC	Prom.	Rango	
1	18/04/2008	1	2,22	2,17	2,2	2,20	0,050	Antonio Acosta
2	18/04/2008	2	2,28	2,2	2,17	2,22	0,110	Francisco Morales
3	19/04/2008	1	2,23	2,22	2,2	2,22	0,030	Antonio Acosta
4	19/04/2008	1	2,25	2,23	2,22	2,23	0,030	Martín López
5	19/04/2008	2	2,15	2,21	2,23	2,20	0,080	Francisco Morales
6	19/04/2008	3	2,23	2,21	2,18	2,21	0,050	Roberto Sandoval
7	22/04/2008	1	2,18	2,21	2,2	2,20	0,030	Martín López
8	22/04/2008	2	2,21	2,18	2,17	2,19	0,040	Francisco Morales
9	23/04/2008	1	2,22	2,23	2,23	2,23	0,010	Antonio Acosta
10	24/04/2008	1	2,24	2,25	2,22	2,24	0,030	Antonio Acosta
11	24/04/2008	2	2,22	2,29	2,2	2,24	0,090	Francisco Morales
12	24/04/2008	3	2,16	2,21	2,23	2,20	0,070	Roberto Sandoval
13	25/04/2008	2	2,22	2,2	2,25	2,22	0,050	Francisco Morales
14	28/04/2008	2	2,26	2,2	2,24	2,23	0,060	Francisco Morales
15	28/04/2008	3	2,19	2,22	2,24	2,22	0,050	Roberto Sandoval
16	29/04/2008	2	2,23	2,28	2,23	2,25	0,050	Francisco Morales
17	30/04/2008	1	2,25	2,18	2,23	2,22	0,070	Antonio Acosta
18	02/05/2008	1	2,2	2,29	2,23	2,24	0,090	Antonio Acosta
19	02/05/2008	2	2,22	2,23	2,18	2,21	0,050	Martín López
20	05/05/2008	2	2,18	2,26	2,21	2,22	0,080	Martín López
21	05/05/2008	2	2,23	2,14	2,16	2,18	0,090	Martín López
22	06/05/2008	3	2,41	2,29	2,21	2,30	0,200	Roberto Sandoval
23	07/05/2008	2	2,21	2,15	2,23	2,20	0,080	Martín López
24	07/05/2008	3	2,15	2,26	2,23	2,21	0,110	Roberto Sandoval
25	08/05/2008	2	2,19	2,23	2,25	2,22	0,060	Martín López

Observaciones: Lecturas para gráfica de control de consumo de corriente en motor de llenadora de tubos compresibles. Un punto de control indica un esfuerzo excesivo de la máquina debido a una falta de sincronía en la etapa apertura/cierre de la leva de válvula. Si aparece, verificar sincronía con mecánico de línea.

Figura 5.29 Formato para recopilar datos de corriente en motor de llenadora de tubos compresibles.
Fuente: El Autor

Con este formato, se genera una gráfica de control con el promedio de las lecturas de corriente. Se puede observar la nota en el mismo formato donde se hace referencia a lo que pasa si un punto sale de los límites de control relacionado con la pérdida de la sincronía en la apertura y cierre de la válvula con respecto a la inyección de producto al tubo, de tal manera que cuando esto sucede se le pide al mecánico de línea que revise la sincronía y la corrija.

Es importante hacer notar que en la empresa se sigue buscando la mejor manera de prevenir la sobrecarga en la flecha del árbol de levas, sin embargo, la solución propuesta ha dado resultado e incluso algunos mecánicos de la línea revisan la corriente de fase del motor como indicador de una buena sincronía. Se espera que próximamente se tenga una solución que sea más de tipo preventivo para este problema en tanto se espera el curso de actualización.

Con los datos de la tabla de la figura 5.29 se genera una gráfica de control de promedios y rangos, misma que se reproduce en la figura 5.30.

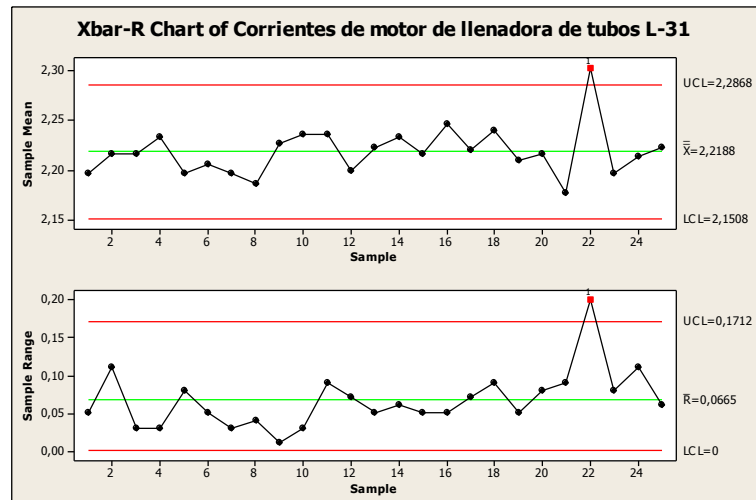


Figura 5.30 Gráfica de control para la corriente de motor en llenadora de tubos compresibles.
Fuente: El autor

En esta gráfica se puede apreciar que el punto 22 está fuera de control, por lo que se revisa el reporte del tercer turno donde se especifica que, efectivamente, el técnico de mantenimiento tomó las lecturas, notó un punto fuera de control y pidió al mecánico de línea que revisara la sincronía, misma que al ser corregida disminuyó el consumo de corriente en el motor.

5.4.4 Estandarización y conclusiones

Como se menciona en el apartado anterior, el personal de mantenimiento sigue buscando una mejor manera de prevenir la sobrecarga en el árbol de levas. Mientras la mejor solución es encontrada, la corriente en los motores de las máquinas llenadoras de tubos compresibles es monitoreada y sus promedios y rangos colocados en del área de tubos

Con base en los resultados observados, el departamento de mantenimiento elabora las siguientes conclusiones:

1. Para cada una de las llenadoras de tubos compresibles medir la corriente por fase del motor principal en vacío. Conectar la leva de la válvula y verificar que el incremento de corriente no sea superior a 0.1 [A] por fase. Si esto sucede, verificar la sincronía cierre/ apertura de la leva de válvula.
Responsable: Supervisor de ajuste mecánico.
2. Proponer un programa de mediciones a intervalos regulares durante las corridas para cada máquina llenadora de las corrientes de motor.
Responsable: Supervisor de mantenimiento.
3. Si en la toma de lecturas se observa un rango (corriente máxima – corriente mínima) que sea superior a 0.15 [A], sin importar si el punto queda fuera de

control o no, solicitar al mecánico de línea la verificación de la sincronía de válvula de llenado y pistón de inyección.

Responsable: Supervisor de mantenimiento/Supervisor de producción.

4. Programar un curso de interpretación de gráficas de ajuste con el representante del proveedor en México. Incluir a todo el personal técnico de Tubos-Talcos y técnicos del taller de desarrollo.

Responsable: Líder de mantenimiento.

5.5 Análisis Costo/Beneficio

Como ejemplo se desarrolla el análisis costo/beneficio para la primera falla crónica corregida, es decir, la corrección del rechazo de los tubos por sello quemado. Debido a que no se cuenta con la suficiente información financiera por parte de la empresa, dicho análisis es más bien a título indicativo y con algunas estimaciones.

Se consideran los costos de la implantación de la metodología para la eliminación de las fallas crónicas, los costos por productos rechazados, los costos de capacitación del personal por parte de los proveedores, el salario del personal encargado de dar seguimiento a la implementación de la metodología, así como el costo de las refacciones utilizadas para la solución de la falla.

En el caso de los beneficios, se considera el ahorro de los productos que ya no fueron rechazados. Los intangibles sólo se mencionan como beneficios indirectos de la implementación de la metodología. Asimismo, el estudio se hace a un año, sólo para el caso de la falla corregida misma que es un indicador de los beneficios que pueden tenerse si esta metodología es implementada en toda la empresa.

5.5.1 Costos

Los costos por mala calidad (COPQ, por sus siglas en inglés), se refieren a los productos rechazados, por tener el sello quemado y que no cumplen con los estándares requeridos por la empresa. Se debe recordar que en esta empresa, las piezas que se fabrican ya están vendidas y por lo tanto su fabricación es imperativa, o sea que, en cada corrida, se fabrican más piezas por concepto de productos rechazados por sello quemado lo que implica un costo adicional de mano de obra para operar la línea, además del costo de los materiales y materia prima (bulk).

En promedio, la venta anual de productos correspondientes al área de tubos compresibles, es de 25 millones, 350 mil piezas. Si se considera que un porcentaje de esas piezas tendrá el sello quemado y, por lo tanto, serán desechadas, la producción del área tiene que ser mayor para compensar los defectos.

Para operar la línea una hora, el costo de mano de obra se puede obtener si se saben los salarios del personal involucrado en su operación. En promedio, un operador tiene un salario de \$930.00 semanales y el personal de apoyo en la línea, también cuenta

con un salario de \$930.00 pesos a la semana; la persona que revisa los tubos también los empaca y su salario es de \$820.00 semanal. Es decir, en conjunto el costo de mano de obra para una línea de producción de tubos compresibles es de \$2,680.00 por semana, es decir, \$47.86 en promedio por hora por concepto de mano de obra para tener operando una línea de tubos compresibles.

La velocidad estándar de estas máquinas es de 60 piezas por minuto (ppm) según consta en las órdenes de producción. Aunque en la práctica se observa que esta velocidad es menor, se consideran las 60 ppm como velocidad de la línea. Por otro lado, el costo de un producto, por concepto de materiales (tubos) y materia prima (bulk) es, en promedio, de \$1.65 por pieza.

Aún cuando no están cuantificados con exactitud, se tienen costos indirectos por concepto de insumos para el funcionamiento de la línea para producir las piezas rechazadas, como son: energía eléctrica, agua de enfriamiento y aire comprimido; los cuales no sería necesario suministrar si no se requirieran producir más piezas. Para fines de comparación, se estima un costo de 15 centavos por cada pieza producida.

Otros costos que también impactan de manera indirecta son los relacionados a la basura que se genera por concepto de productos defectuosos y que tiene que ser destruida. En este caso se estima un costo de \$350.00 por cada tonelada de basura que se destruye. Se hace la diferencia entre los 100 gramos del bulk y el peso del empaque (tubo y tapa) el cual es de 16 gramos en conjunto.

Los otros costos son aquellos debidos a la prevención. En este caso, se considera la implementación de la metodología de eliminación de fallas crónicas, la capacitación al personal del área y los aditamentos necesarios para la medición y el control de las variables de interés. A todo esto se debe aunar el costo por refacciones y mejoras implementadas en el área.

En conjunto con personal de los departamentos de producción, mantenimiento y calidad, se acuerda la necesidad de contratar a una persona para la supervisión de los indicadores de mantenimiento, mismo que tendría a su cargo a los becarios de calidad para la toma de mediciones y un técnico de planta por turno para la revisión de los trabajos efectuados por los becarios. El salario de este supervisor sería de \$16,000.00 mensuales y el de los técnicos sería de \$8,500.00 mensuales cada uno. Es decir, por concepto de personal adicional, se tiene un gasto de \$498,000.00 pesos anuales.

Se cotiza un curso de control estadístico de calidad básico para el personal técnico (60 personas), el cual tiene un costo de \$10,200.00 por grupo de 5 personas, es decir, \$122,400.00 pesos cuesta capacitar al personal.

Además, es necesario cubrir al personal que está tomando el curso con personal de tiempo extra. La política de la empresa considera la mitad del tiempo como tiempo extra y la otra mitad de tiempo cedido por el técnico. El curso tiene una duración de 40 horas, por lo que 20 horas son cubiertas con personal de tiempo extra, lo que equivale a 1,200 horas extras en total que tienen que ser cargadas al departamento de mantenimiento. La hora extra de este personal tiene un costo de \$46.40.

Finalmente, el costo de las refacciones utilizadas y del tiempo extra que se utiliza para la implementación del manifold en el área de tubos compresibles tiene un costo estimado de \$26,000.00.

Con estos valores es posible hacer un comparativo de los costos que se tienen antes de la mejora y de los costos que se tienen después de la implementación de la metodología, así como del costo mismo de la implantación. Esto se observa en la tabla 5.8.

Concepto (por año)	Antes		Después	
	Cantidad	Costo [\$]	Cantidad	Costo [\$]
Producción				
Producción del área [pza.]	25'350,000		25'350,000	
Porcentaje de tubos rechazados	2.46%		0.14%	
Producción total requerida	25'988,951		25'385,540	
Piezas rechazadas				
Piezas rechazadas por sello quemado	638,951	1'054,268.83	35,540	58'640.48
HH para producir defectos (60 ppm)	177.49	8,494.50	9.87	472.50
Basura generada por rechazos	Producto (kg)	63,895	3,554	1,243.89
	Empaque (kg)	10,223	568.6	199.02
*Insumos para defectos (1.5 cts. /pza.)	638,951	9,584.26	35,540	533.10
Costo por producción de defectos		1'098,288.99		61,088.99
Implementación de la metodología				
Salario de personal de nuevo ingreso		0.00	4	498,000.00
Capacitación a personal técnico		0.00	60	122,400.00
Tiempo extra para asistir a curso [h]		0.00	1,200	55,680.00
Costo de implementación		0.00		676,080.00
Corrección de la falla 'rechazos por sello quemado'				
Refacciones y otros gastos		0.00		26,000.00
Costo por corrección de una falla		0.00		26,000.00

*Valores estimados

Tabla 5.8 Comparación de los costos para una falla antes y después de la implementación de la metodología.
Fuente: El autor

En la tabla 5.8 se puede apreciar que el costo más significativo en la implementación de la metodología es el referente al salario del personal de nuevo ingreso que se encargaría de dar seguimiento a la solución de fallas; sin embargo, también se debe tomar en cuenta que este personal sólo ocupa una parte de su tiempo en la solución de una falla, por lo que el costo por concepto de salarios de este personal debiera ser dividido entre el tiempo que el personal tarda en resolver una falla.

Para la solución de la falla por sello quemado, el equipo se tarda aproximadamente siete semanas en resolverla, de tal manera que de las 52 semanas que tiene el año, se ocupa el 13.5% del tiempo en resolver esta falla. Es decir de los \$676,080.00, sólo \$91,270.80 se utilizan en la solución de esta falla por concepto de implementación.

Es necesario hacer notar que, en este caso, no existen pérdidas por productos no vendidos, puesto que, como ya se ha comentado con anterioridad, en esta empresa los productos fabricados ya están vendidos.

A continuación, en la tabla 5.9 se presentan los costos resumidos para identificar el ahorro que se tiene con la implementación de la metodología al resolver sólo una falla crónica.

Concepto	Antes [€]	Después [€]
Costos por producción de defectos	1'098,288.99	61,088.99
Costos de implementación	0.00	91,270.80
Costos por corrección de falla	0.00	26,000.00
Totales	1'098,288.99	178,359.80
Ahorro con la implantación de la metodología		919,929.20

Tabla 5.9 Comparación de los costos para una falla antes y después de la implementación de la metodología.
Fuente: El autor

5.5.2 Beneficios

En este caso se tienen beneficios tangibles e intangibles. Los beneficios tangibles son los ahorros que se tienen al no producir el 2.46% extra de piezas diarias por concepto de rechazos. Asimismo, en este renglón, se tiene el ahorro obtenido de la mano de obra no utilizada para producir las piezas que se rechazaron. Es también menester considerar en este rubro los ahorros por concepto de insumos no utilizados para producir las piezas defectuosas. Otro ahorro que se tiene es el correspondiente a lo que no se paga al contratista para que se lleve la basura y la destruya.

Entre los beneficios intangibles, se tienen la reducción del riesgo de no entregar los productos a tiempo, se disminuye la contaminación al medio ambiente al generar menos productos de desecho, se evita el deterioro de la imagen de la empresa, pues se incrementa la disponibilidad de los productos, se mejora la conciencia del concepto de calidad entre el personal de la empresa y un espíritu de pertenencia a la misma.

En la tabla 5.10 se pueden concentrar los beneficios para su fácil revisión:

Tipo de beneficio	Concepto	Monto [€]
Tangibles	Ahorro por disminución de piezas rechazadas	995,628.35
	Ahorro de mano de obra no utilizada	8,022.00
	Ahorro por insumos no utilizados	9,051.16
	Ahorro por basura no generada	24,498.50
Intangibles	Menor contaminación	NC
	Menor riesgo de no entregar productos	NC
	Evita el deterioro de la imagen de la empresa	NC
	Mejora la conciencia de calidad entre el personal	NC
	Total de ahorro en el primer año	1'037,200.01

*NC = no cuantificado

Tabla 5.10 Resumen de beneficios de la corrección del rechazo de tubos por sello quemado.
Fuente: El autor

En las tablas 5.8 y 5.10 se pueden apreciar claramente que los beneficios superan por mucho a los costos. Además, es importante recordar que este estudio es para una sola falla por lo que se puede decir que es conveniente invertir en la aplicación de la metodología de eliminación de fallas crónicas debido a que el incremento en los costos sería mínimo, pero el beneficio en cuestión de ahorros sería muy grande.

Conclusiones

El departamento de mantenimiento debe continuar su camino ascendente hacia su inclusión como unidad estratégica de las empresas en el logro de los objetivos de éstas. La propuesta metodológica que se hace en este trabajo es sólo un paso en esa dirección: Un paso que es y debiera ser mejorado.

Los objetivos planteados al inicio del desarrollo de este trabajo fueron logrados satisfactoriamente. La puesta en práctica de las metodologías propuestas en la empresa en la que se trabajó dejó entrever muchas de las ventajas que se pueden obtener cuando las metodologías son aplicadas ya no como parte de una estrategia del departamento de mantenimiento sino como una estrategia de la empresa en sí.

Algunas de las ventajas más sobresalientes que se pueden mencionar son:

1. Cambia el paradigma tradicional de que los equipos pueden fallar y de que resolver las fallas es parte de la vida diaria y los problemas cotidianos del departamento de mantenimiento.
2. Motiva la integración de los diferentes departamentos operativos (mantenimiento, producción y calidad) haciendo que la responsabilidad de entregar productos sin defectos sea una responsabilidad compartida.
3. Rompe con el viejo paradigma de que los equipos, cuando funcionan, están bien y cuando fallan no funcionan, e introduce al producto como principal indicador de la buena salud de los equipos.
4. Fomenta el registro de los datos como indicadores del estado de salud de los equipos y la comprensión del proceso y el papel de los equipos dentro de él.
5. Estimula el análisis sistemático y sistémico de los equipos de producción y sus diferentes tipos de fallas y los modos en que éstas se pueden manifestar.
6. La inversión inicial para su puesta en marcha no es significativa y las mejoras obtenidas en la eliminación de defectos superan por mucho ese rubro.
7. Los logros de las mejoras obtenidas se pueden ver a corto plazo, lo que motiva su continuidad.

Asimismo, durante la puesta en práctica de las metodologías se observaron algunas desventajas:

1. Requiere de un tiempo considerable para implementarse en la planta; depende del estado general de los equipos y el número de fallas que se vayan a atacar.

2. Necesita de personal con una formación basada en la estadística y el análisis de datos, además de sus capacidades técnicas.
3. Al requerir personal encargado de la recolección de datos, necesita que una mayor cantidad de personas ingrese al departamento o redefinir las responsabilidades y tareas del personal actual.
4. Al intentar romper el viejo paradigma de que los equipos tienen que fallar para repararse, lucha con la idiosincrasia de personal que tiene muchos años viviendo así.

Al considerar el mantenimiento de los equipos industriales de producción como un proceso en el cual entran equipos con fallas y salen equipos funcionando correctamente, las herramientas de la calidad encajan perfectamente como método de eliminación de fallas.

Se observa que los costos, por concepto de entregar productos defectuosos a la salida de los equipos, deben considerarse y erradicarse del área productiva. Cuando la tarea de la corrección haya sido finalizada, se puede pasar a la etapa de la prevención; etapa en la cual las organizaciones, en general, deberían funcionar.

Tal vez los logros obtenidos por la aplicación de la metodología de prevención de fallas esporádicas no sean tan evidentes como lo son los de la detección y corrección de fallas crónicas, sin embargo, es precisamente ese el papel que se propone debe desempeñar el departamento de mantenimiento en las empresas: Mantenimiento no está para reparar equipos, sino para evitar su deterioro y pérdida de la función que desempeñan. Será a través de la planeación del mantenimiento y del cambio de paradigmas cuando esto sea una realidad en cada empresa productiva y de servicios.

Referencias

- Bibliográficas
 1. CREUS Solé, A. (1992). **Fiabilidad y seguridad: Su aplicación en procesos industriales**. Marcombo Boixareu Editores. Barcelona, España.
 2. CUATRECASAS, L. (2000). **TPM: Hacia la competitividad a través de la eficiencia de los equipos de producción**. Gestión 2000. Barcelona, España.
 3. DUFFUAA, S., Raouf, A, et all. (2007). **Sistemas de mantenimiento: Planeación y control**. Limusa Wiley. México, D. F.
 4. ESCALANTE Vázquez, E. (2007). **Seis Sigma: Metodología y técnicas**. Limusa. México, D. F.
 5. EVANS, J. y Lindsay, W. (2005). **Administración y control de la calidad**. Thompson. México, D. F.
 6. GRIMA Cinta, P. y Marco Almagro, L, et all. (2004). **Estadística práctica con Minitab**. Pearson Prentice Hall. Madrid, España.
 7. GUTIÉRREZ Pulido, H. y De la Vara Salazar, R. (2004). **Control estadístico de la calidad y seis sigma**. McGraw-Hill. México, D. F.
 8. GUTIÉRREZ González, Eduardo y Vladimiovna Panteleeva, Olga (2000). **Tablas y Fórmulas Estadísticas**. Libudi, S. A. de C. V. México, D. F.
 9. KAORU, I (1976). **Guía de control de calidad**. UNIPUB. New York, USA.
 10. KELLY, Anthony (2006). **Strategic Maintenance Planning**. Elsevier. Oxford, U. K.
 11. MATHER, Daryl (2005). **The Maintenance Scorecard. Creating Strategic Advantage**. Industrial Press Inc. New York, U. S. A.
 12. MONTGOMERY, D. C. (2006). **Control estadístico de la calidad**. Limusa Wiley. México, D. F.
 13. MOUBRAY, John (1992). **Reliability-centered Maintenance**. Industrial Press Inc. New York, U. S. A.
 14. NAKAJIMA, Seiichi (1991). **Introducción al TPM**. Productivity Press, Inc. Massachusetts, U. S. A.
 15. NARAYAN, V. (2004). **Effective Maintenance Management: Risk and Reliability Strategies for optimization performance**. Industrial Press Inc. New York, U. S. A.
 16. RAMOS Soto, Lauro Jaime (2007). Tesis de maestría: **Confiabilidad en sistemas industriales**. Facultad de ingeniería. México, D. F.
 17. RENDER, B y Heizer, J. (2004). **Principios de administración de operaciones**. Pearson Educación. México, D. F.
 18. WADSWORTH, H y Stephens, K, et all. (2005). **Métodos de control de calidad**. Compañía Editorial Continental. México, D. F.
 19. WILSON, Alan (2002). **Asset maintenance management. A guide to developing strategy and improving performance**. Industrial Press Inc. New York, U. S. A.
 20. WIREMAN, Terry (2005). **Developing performance indicator for managing maintenance**. Industrial Press Inc. New York, U. S. A.

- Electrónicas
 1. AMENDOLA, Luis (2003). **Diagnóstico de fallos por monitoreo de condición**. En <http://www.mantenimientomundial.com/sites/mmnew/bib/notas/diagnostico.asp>
 2. CABRERA Gómez, Jesús (2003). **¿Cuál es la frecuencia adecuada para la ejecución de una tarea predictiva?** En <http://www.mantenimientomundial.com/sites/mmnew/bib/notas/Cm43.pdf>
 3. CABRERA Gómez, Jesús (2004). **El análisis causa raíz: una herramienta de inestimable valor**. En <http://www.mantenimientomundial.com/sites/mmnew/bib/notas/Cm53.pdf>

4. CABRERA Gómez, Jesús (2002). **Mantenimiento detectivo, ¿una nueva estrategia?** En <http://www.mantenimientomundial.com/sites/mmnew/bib/notas/Cm23.pdf>
5. CABRERA Gómez, Jesús (2003). **¿Qué es lo que el mantenimiento debe mantener?** En <http://www.mantenimientomundial.com/sites/mmnew/bib/notas/Cm33.pdf>
6. CABRERA Gómez, Jesús (2004). **Queremos mejorar la confiabilidad operacional, pero... ¿por dónde empezar?** En <http://www.mantenimientomundial.com/sites/mmnew/bib/notas/Cm59.pdf>
7. Definiciones de mantenimiento. Página web: www.mantenimientomundial.com. Consultada en Junio de 2007
8. FELIPE Sexto, Luis (2004). **El ciclo de la calidad, ¡qué tontería más genial!** En <http://www.mantenimientomundial.com/sites/mmnew/bib/notas/L-A-4.pdf>.
9. <http://www.mantenimientomundial.com>. Definiciones de mantenimiento.
10. <http://www.solomantenimiento.com>. Mantenimiento, reliability y confiabilidad – RCM.
11. Latino, Charles J. (2003). **Eliminando fallas crónicas puede reducirse el costo del mantenimiento hasta en un 60%.** En <http://www.mantenimientomundial.com/sites/mmnew/bib/notas/fallas.asp>
12. MOUBRAY, John (2002). **Máximas del mantenimiento.** En <http://www.mantenimientomundial.com/sites/mmnew/bib/notas/RCMintro.asp>
13. PALOMINO Marín, Evelio (2007). **Protección, predicción, monitoreo.** En <http://www.mantenimientomundial.com/sites/mmnew/bib/notas/Cm79.pdf>
14. Tague, Nancy R. (2004). **Scatter diagram.** En <http://www.asq.com>.
15. Trujillo C., Gerardo (2002). **El mantenimiento proactivo como una herramienta para extender la vida de sus equipos.** En <http://www.mantenimientomundial.com>.
16. WIDMAN, Richard (2007). **La implementación del mantenimiento proactivo.** En <http://www.mantenimientomundial.com/sites/mmnew/bib/notas/w51.pdf>

Fórmulas para el cálculo de la línea central y límites de las gráficas de control

Notación:

LCS	-- Límite superior de control	n	-- Tamaño de la muestra
LCI	-- Límite inferior de control	σ	-- Desviación estándar del proceso
LC	-- Línea central	\bar{x}	-- Promedio de las mediciones
\bar{R}	-- Promedio de los rangos	$\bar{\bar{x}}$	-- Promedio de los promedios
\bar{S}	-- Promedio de las desv. std.	R	-- Rango

Gráficas de control para variables*

	$\bar{x} - R$ ($n < 10$)		$\bar{x} - S$	
	\bar{x}	R	\bar{x}	S
LCS	$\bar{\bar{x}} + A_2 \bar{R}$	$\bar{R} D_4$	$\bar{\bar{x}} + 3 \frac{\bar{S}}{c_4 \sqrt{n}}$	$\bar{S} + 3 \frac{\bar{S}}{c_4} \sqrt{1 - c_4}$
LCI	$\bar{\bar{x}} - A_2 \bar{R}$	$\bar{R} D_3$	$\bar{\bar{x}} - 3 \frac{\bar{S}}{c_4 \sqrt{n}}$	$\bar{S} - 3 \frac{\bar{S}}{c_4} \sqrt{1 - c_4}$
LC	$\bar{\bar{x}}$	\bar{R}	$\bar{\bar{x}}$	\bar{S}

Gráficas de control para atributos*

	p (fracción)	np (número de unidades disconformes)	c (conteo de disconformidades)	U (conteo de disconformidades/unidad)
LC	\bar{p}	$n\bar{p}$	\bar{c}	\bar{u}
LSC	$\bar{p} + 3 \sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n}}$	$n\bar{p} + 3 \sqrt{n\bar{p}(1-\bar{p})}$	$\bar{c} + 3\sqrt{\bar{c}}$	$\bar{u} + 3 \sqrt{\frac{\bar{u}}{n}}$
LIC	$\bar{p} - 3 \sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n}}$	$n\bar{p} - 3 \sqrt{n\bar{p}(1-\bar{p})}$	$\bar{c} - 3\sqrt{\bar{c}}$	$\bar{u} - 3 \sqrt{\frac{\bar{u}}{n}}$
Notas	Si n varía, usar \bar{n} o n_i mediciones individuales	n debe ser constante	n debe ser una constante	Si n varía, usar \bar{n} o n_i mediciones individuales

Factores para construir cartas de control para variables*

n	A_2	D_3	D_4	c_4
2	1.880	0	3.267	0.7979
3	1.023	0	2.575	0.8862
4	0.729	0	2.282	0.9213
5	0.577	0	2.115	0.9400
6	0.483	0	2.004	0.9515
7	0.419	0.076	1.924	0.9594
8	0.373	0.136	1.864	0.9650
9	0.337	0.184	1.816	0.9693
10	0.308	0.223	1.777	0.9727
11	0.285	0.256	1.744	0.9754
12	0.266	0.283	1.717	0.9776
13	0.249	0.307	1.693	0.9794
14	0.235	0.328	1.672	0.9810
15	0.223	0.347	1.653	0.9823
16	0.212	0.363	1.637	0.9835
17	0.203	0.378	1.622	0.9845
18	0.194	0.391	1.608	0.9854
19	0.187	0.403	1.597	0.9862
20	0.180	0.415	1.585	0.9869
21	0.173	0.425	1.575	0.9876
22	0.167	0.434	1.566	0.9882
23	0.162	0.443	1.557	0.9887
24	0.157	0.451	1.548	0.9892
25	0.153	0.459	1.541	0.9896

Para $n > 25$

$$c_4 \approx \frac{4(n-1)}{4n-3}$$

*Fuente: Montgomery (2006). *Control estadístico de la calidad*

Tablas de severidad, ocurrencia y detección del AMEF

Grado de severidad (S)	Evaluación
Peligro al operador, operación insegura del producto. Sin aviso	10
Peligro al operador, operación insegura del producto. Con aviso	9
100% del producto defectuoso. Producto inoperable	8
Menos del 100% del producto es defectuoso. Producto operable, bajo rendimiento	7
Menos del 100% del producto es defectuoso. Producto operable, sin confort	6
Menos del 100% del producto es re-trabajo. Producto operable, poco confort	5
Menos del 100% del producto es re-trabajo. Mal acabado y ruidoso. Muy notable	4
Menos del 100% del producto es re-trabajo. Mal acabado y ruidoso. Notable	3
Menos del 100% del producto es re-trabajo. Mal acabado y ruidoso. Poco notable	2
No afecta	1

Tabla A.1.1 Calificaciones para grado de severidad de la falla en el AMEF*

Probabilidad de ocurrencia (O)	Evaluación
Muy alta (> 1/2)	10
Muy alta (1/3)	9
Alta (1/8)	8
Alta (1/20)	7
Moderada (1/80)	6
Moderada (1/400)	5
Moderada (1/2,000)	4
Baja (1/15,000)	3
Baja (1/150,000)	2
Remota (1/1.5 millones)	1

Tabla A.1.2 Calificaciones para probabilidad de ocurrencia de la falla en el AMEF*

Detección del defecto (D)	Evaluación
Casi imposible	10
Muy remota	9
Remota	8
Muy baja	7
Baja	6
Moderada	5
Moderada alta	4
Alta	3
Muy alta	2
Casi segura	1

Tabla A.1.3 Calificaciones para la posibilidad de detección de la falla en el AMEF*

*Fuente: Escalante, 2007. *Seis sigma, metodología y técnicas*.

Fórmulas para pruebas de hipótesis

En las siguientes tablas se muestra el resumen de fórmulas para los procedimientos de pruebas de hipótesis que involucran uno y dos parámetros. Se muestra en cada caso el planteamiento de la hipótesis, el estadístico de prueba y el criterio de rechazo para cada una de las tres posibles alternativas. Si se trabaja usando el software Minitab, es más directo y conveniente basarse en el *p-value*, el cual para cualquier hipótesis debe ser menor que alfa (α) para rechazar la hipótesis nula (H_0).

Procedimientos para un parámetro*

Caso	Hipótesis nula	Hipótesis alternativa	Estadístico de prueba	Región de rechazo de H_0
Se conoce σ	$\mu = \mu_0$	$\mu \neq \mu_0$ $\mu > \mu_0$ $\mu < \mu_0$	$Z_0 = \frac{\bar{X} - \mu_0}{\sigma / \sqrt{n}}$	$ Z_0 > Z_{\alpha/2}$ $Z_0 > Z_\alpha$ $Z_0 < -Z_\alpha$
Se desconoce σ ; muestras grandes ($n \geq 30$)	$\mu = \mu_0$	$\mu \neq \mu_0$ $\mu > \mu_0$ $\mu < \mu_0$	$Z_0 = \frac{\bar{X} - \mu_0}{S / \sqrt{n}}$	$ Z_0 > Z_{\alpha/2}$ $Z_0 > Z_\alpha$ $Z_0 < -Z_\alpha$
Se desconoce σ ; muestras pequeñas ($n < 30$)	$\mu = \mu_0$	$\mu \neq \mu_0$ $\mu > \mu_0$ $\mu < \mu_0$	$t_0 = \frac{\bar{X} - \mu_0}{S / \sqrt{n}}$ $\nu = n - 1$	$ t_0 > t_{\alpha/2}$ $t_0 > t_\alpha$ $t_0 < -t_\alpha$
Población normal	$\sigma^2 = \sigma_0^2$	$\sigma^2 \neq \sigma_0^2$ $\sigma^2 > \sigma_0^2$ $\sigma^2 < \sigma_0^2$	$\chi_0^2 = \frac{(n-1)S^2}{\sigma_0^2}$ $\nu = n - 1$	$\chi_0^2 > \chi_{\alpha/2, \nu}^2$ ó $\chi_0^2 < \chi_{\alpha/2, \nu}^2$ $\chi_0^2 > \chi_{\alpha, n-1}^2$ $\chi_0^2 < \chi_{1-\alpha, n-1}^2$
Parámetro p , muestras grandes ($n > 30$)	$p = p_0$	$p \neq p_0$ $p > p_0$ $p < p_0$	$Z_0 = \frac{\bar{X} - np_0}{\sqrt{np_0(1-p_0)}}$	$ Z_0 > Z_{\alpha/2}$ $Z_0 > Z_\alpha$ $Z_0 < -Z_\alpha$

Procedimientos para dos parámetros*

Caso	Hipótesis nula	Hipótesis alternativa	Estadístico de prueba	Región de rechazo de H_0
Se conocen σ_1^2 y σ_2^2	$\mu_1 = \mu_2$	$\mu_1 \neq \mu_2$ $\mu_1 > \mu_2$ $\mu_1 < \mu_2$	$Z = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2 - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}}$	$ Z_0 > Z_{\alpha/2}$ $Z_0 > Z_\alpha$ $Z_0 < -Z_\alpha$
Se desconocen σ_1^2 y σ_2^2 ; muestras grandes	$\mu_1 = \mu_2$	$\mu_1 \neq \mu_2$ $\mu_1 > \mu_2$ $\mu_1 < \mu_2$	$Z = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2 - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}}$	$ Z_0 > Z_{\alpha/2}$ $Z_0 > Z_\alpha$ $Z_0 < -Z_\alpha$
Se desconocen σ_1^2 y σ_2^2 ; muestras pequeñas; $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$	$\mu_1 = \mu_2$	$\mu_1 \neq \mu_2$ $\mu_1 > \mu_2$ $\mu_1 < \mu_2$	$t = \frac{x_1 - x_2 - (\mu_1 - \mu_2)}{s_p \sqrt{(1/n_1) + (1/n_2)}}$ $v = n_1 + n_2 - 2$ $s_p = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}}$	$ t_0 > t_{\alpha/2, v}$ $t_0 > t_{\alpha, v}$ $t_0 < -t_{\alpha, v}$
Se desconocen σ_1^2 y σ_2^2 ; muestras pequeñas; $\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$	$\mu_1 = \mu_2$	$\mu_1 \neq \mu_2$ $\mu_1 > \mu_2$ $\mu_1 < \mu_2$	$t = \frac{x_1 - x_2 - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{(1/n_1) + (1/n_2) \left(\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2} \right)^2}}$ $v = \frac{\left(\frac{S_1^2}{n_1} \right)^2 \left(\frac{1}{n_1 - 1} \right) + \left(\frac{S_2^2}{n_2} \right)^2 \left(\frac{1}{n_2 - 1} \right)}{\left(\frac{S_1^2}{n_1} \right)^2 \left(\frac{1}{n_1 - 1} \right) + \left(\frac{S_2^2}{n_2} \right)^2 \left(\frac{1}{n_2 - 1} \right)}$	$ t_0 > t_{\alpha/2, v}$ $t_0 > t_{\alpha, v}$ $t_0 < -t_{\alpha, v}$
Poblaciones normales	$\sigma_1^2 = \sigma_2^2$	$\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$ $\sigma_1^2 > \sigma_2^2$ $\sigma_1^2 < \sigma_2^2$	$F_0 = \frac{S_1^2}{S_2^2}$ $v_1 = n_1 - 1$ $v_2 = n_2 - 1$	$F_0 > F_{\alpha/2, v_1, v_2}$ ó $F_0 < F_{1-(\alpha/2), v_1, v_2}$ $F_0 > F_{\alpha, v_1, v_2}$ $Z_0 < F_{1-\alpha, v_1, v_2}$
Para p_1, p_2 , muestras grandes	$p_1 = p_2$	$p_1 \neq p_2$ $p_1 > p_2$ $p_1 < p_2$	$Z = \frac{\hat{p}_1 - \hat{p}_2}{\sqrt{\hat{p}(1-\hat{p}) \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}}$ $\hat{p} = \frac{x_1 + x_2}{n_1 + n_2}$	$ Z > Z_{\alpha/2}$ $Z > Z_\alpha$ $Z < -Z_\alpha$

*Fuente: Gutiérrez González y Vladimirovna Panteleeva (2000). *Tablas y Fórmulas Estadísticas*.

Check List para identificación de defectos en Producto Terminado

Línea: Llenado/sellado de tubos compresibles Fecha: 28-feb-08
Máquina: Llenadora mod. 850
Producto: Mascarilla Poros abiertos
Vel. Std. 60 ppm Vel. Real: 46 ppm Piezas producidas: 4.988
Hora inicio: 11:30 hrs. Hora Fin: 13:45 hrs.

No.	Descripción del defecto	Frecuencia (Coloque una línea / cada vez que aparezca el defecto en cuestión)	Totales
1	Problemas en el sello de los tubos		98
2	Taca descentrada		116
3	Fugas de bulk		45
4	Variaciones en el peso		41
5	Sello quemado		62
6			
7			

Observación: Revisión del procedimiento de ajuste paso a paso vigilado por Hugo Ferrer. Ajuste hecho por Julián Sánchez

Elaboró: Ing. Hugo Ferrer Revisó: Ing. Enrique Hernández Aprobó: Ing. Enrique Hernández

Figura A.4.5 Datos obtenidos del sellado de tubos para la mejora 'Seguir el procedimiento'

Check List para identificación de defectos en Producto Terminado

Línea: Llenado/sellado de tubos compresibles Fecha: 03-abr-08
Máquina: Llenadora mod. 850
Producto: Mascarilla de reducción de poros
Vel. Std. 60 ppm Vel. Real: 48 ppm Piezas producidas: 6.504
Hora inicio: 19:30 hrs. Hora Fin: 22:30 hrs.

No.	Descripción del defecto	Frecuencia (Coloque una línea / cada vez que aparezca el defecto en cuestión)	Totales
1	Tubos mal sellados		112
2	Taca descentrada		149
3	Fugas de bulk		51
4	Variaciones en el peso		48
5	Sello quemado		9
6			
7			

Observación: Modificaciones hechas a la línea: Gauges en buen estado, bypass de agua de enfriamiento. Cartas actualizadas. Ajuste efectuado por Alberto Castañeda.

Elaboró: Ing. Óscar Chávez Revisó: Ing. Ricardo León Aprobó: Ing. Ricardo León O.

Figura A.4.6 Datos obtenidos del sellado de tubos para la todas las mejoras integradas

Tablas para la nueva condición del peso en los tubos

Mediciones para identificación de valores reales de un parámetro

Línea: Llenado/sellado de tubos compresibles Fecha: 07-mar-08
 Máquina: Llenadora mod. 850
 Producto: Mascarilla de fresas Valor estándar 100 - 103 gramos
 Defecto: Peso en tubos de 100 gramos Piezas producidas: 5.048
 Piezas muestreadas: 150 Método de muestreo: Sistemático (10 pza/cuarto hora)

Muestra	Lectura observada										Promedio
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	100,2	101,6	100,0	101,6	101,2	99,1	99,5	100,9	100,3	100,5	100,5
2	101,8	100,2	101,3	101,8	100,9	104,2	101,5	100,6	102,2	101,3	101,6
3	101,4	101,6	99,4	103,2	100,6	99,5	100,2	100,3	101,1	101,5	100,9
4	101,3	101,3	101,7	100,9	101,9	102,4	101,1	101,5	100,0	101,8	101,4
5	100,1	100,9	103,5	100,5	101,4	100,7	99,9	101,1	100,0	101,3	100,9
6	101,3	100,3	101,4	101,3	101,6	103,4	101,3	102,2	100,1	100,5	101,3
7	101,1	101,6	99,3	100,6	101,2	101,2	100,7	102,3	102,8	101,6	101,2
8	99,2	101,1	102,3	101,6	100,4	101,4	99,9	100,6	99,1	100,9	100,7
9	100,1	100,6	100,7	102,7	100,9	100,1	99,7	101,2	101,8	100,7	100,9
10	99,3	100,8	100,4	101,1	101,6	101,3	103,0	100,4	100,1	101,4	100,9
11	101,1	102,1	101,9	102,3	102,5	102,1	101,6	101,3	99,1	100,9	101,5
12	100,9	102,5	99,5	102,6	100,2	101,8	100,8	100,0	101,7	102,3	101,2
13	100,9	101,9	98,8	103,9	102,4	100,5	101,5	101,1	101,6	100,7	101,3
14	100,4	100,8	100,4	100,6	101,8	102,1	100,3	101,9	102,3	100,7	101,1
15	101,5	100,4	101,5	101,0	99,5	100,1	101,6	100,2	102,8	99,3	100,8
16										Prom.	101,08
17										Var.	1,2793
18											
19											
20											

Observaciones: Ajuste realizado con levas en buen estado.
Ajuste hecho por Julián Sánchez. Cambio de levas: Roberto Sandoval.

Elaboró: Tec. Nayeli Vázquez Revisó: Ing. Enrique Hernández Aprobó: Ing. Enrique Hernández

Figura A.5.1 Datos obtenidos del peso en tubos para la mejora 'Ajuste con levas en buen estado'

Mediciones para identificación de valores reales de un parámetro

Línea: Llenado/sellado de tubos compresibles
 Máquina: Llenadora mod. 850
 Producto: Loción descansa piés
 Defecto: Peso en tubos de 100 gramos
 Piezas muestreadas: 150

Fecha: 10-mar-08
 Valor estándar 100 - 103 gramos
 Piezas producidas: 6.550
 Método de muestreo: Sistemático (10 pza/cuarto hora)

Muestra	Lectura observada										Promedio
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	102,2	100,7	102,7	103,0	100,8	103,8	101,0	102,4	102,8	102,8	102,2
2	102,2	101,5	101,7	103,3	101,6	104,1	101,6	103,1	100,9	103,0	102,3
3	103,5	102,8	100,9	101,7	102,2	103,8	102,0	102,4	103,0	101,3	102,4
4	101,9	102,9	102,6	100,4	103,2	102,7	100,2	100,6	101,8	101,3	101,8
5	102,0	101,1	101,7	101,9	101,4	103,9	102,4	102,9	102,1	101,7	102,1
6	102,9	102,5	104,2	102,9	104,4	100,6	102,0	104,1	103,4	102,3	102,9
7	102,9	103,1	102,6	101,1	101,8	102,5	103,0	99,2	102,6	101,7	102,1
8	102,3	100,7	103,3	101,0	103,8	100,6	102,3	103,2	101,9	101,1	102,0
9	101,9	100,8	100,0	101,2	102,9	102,9	102,6	102,0	103,5	102,4	102,0
10	101,8	101,3	102,4	100,7	104,3	101,8	102,5	102,4	102,9	103,6	102,4
11	101,3	102,7	102,3	104,0	100,9	101,2	102,5	103,2	103,0	103,2	102,4
12	103,1	102,1	99,8	101,1	99,6	101,6	102,7	100,3	99,8	101,8	101,2
13	101,6	103,4	100,4	102,5	101,7	100,6	101,0	103,9	103,4	101,0	102,0
14	100,5	102,7	104,7	101,4	102,2	101,5	102,2	100,8	101,8	101,2	101,9
15	103,4	102,3	102,9	101,9	102,1	103,5	102,1	102,8	100,8	102,1	102,4
16										Prom.	102,13
17										Var.	1,2117
18											
19											
20											

Observaciones: Rosca de opresor de leva reparada por Francisco Montero. Rosca nueva 8 mm NF.

Elaboró: Tec. Adriana Osorno Revisó: Ing. Hugo Ferrer Aprobó: Ing. Ricardo León

Figura A.5.2 Datos obtenidos del peso en tubos para la mejora 'Rosca de opresor de leva en buen estado '

Mediciones para identificación de valores reales de un parámetro

Línea: Llenado/sellado de tubos compresibles

Fecha: 14-mar-08

Máquina: Llenadora mod. 850

Producto: Crema aniversario. Glicerina

Valor estándar 100 - 103 gramos

Defecto: Peso en tubos de 100 gramos

Piezas producidas: 3.986

Piezas muestreadas: 150

Método de muestreo: Sistemático (10 pza/10 min)

Muestra	Lectura observada										Promedio
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	99,5	101,4	103,6	101,3	101,1	100,5	101,0	100,8	101,0	100,4	101,1
2	100,0	101,8	102,6	100,5	102,3	99,8	101,7	99,8	101,5	98,6	100,9
3	100,1	102,5	100,7	101,7	99,9	100,7	99,9	101,0	100,0	99,0	100,6
4	101,8	100,2	100,7	98,6	100,0	98,9	101,3	100,6	100,1	103,2	100,5
5	99,2	98,2	102,1	99,7	102,1	100,5	100,6	99,4	101,6	101,7	100,5
6	98,5	102,1	101,5	99,5	103,0	100,7	100,9	100,2	103,0	100,2	101,0
7	101,3	99,4	101,6	102,4	100,5	100,6	102,9	101,8	100,7	101,8	101,3
8	103,0	102,5	99,4	102,0	101,3	99,1	100,8	103,2	101,7	100,7	101,4
9	98,4	103,0	100,5	102,2	98,9	102,8	101,4	99,0	100,6	101,3	100,8
10	100,7	101,9	99,6	99,9	98,8	101,4	102,3	102,5	102,5	100,1	101,0
11	100,7	99,4	97,6	99,7	101,7	101,2	100,1	98,2	103,5	101,2	100,3
12	100,4	100,4	101,3	99,6	99,0	100,9	103,0	101,3	101,2	103,9	101,1
13	100,6	103,7	101,6	102,6	102,3	99,6	100,1	102,5	101,7	100,3	101,5
14	100,4	99,8	100,9	102,7	101,0	101,8	98,9	99,8	100,0	102,1	100,7
15	101,6	101,3	103,1	102,3	100,3	102,6	99,8	101,4	100,5	101,5	101,4
16										Prom.	100,94
17										Var.	1,3709
18											
19											
20											

Observaciones: Caja de seguidor ajustada. Ing. Cárdenas (Máquinados de Precisión)

Elaboró: Tec. Nayeli Vázquez

Revisó: Ing. Hugo Ferrer

Aprobó: Ing. Enrique Hernández

Figura A.5.3 Datos obtenidos del sellado de tubos para la mejora 'Caja de seguidor de leva ajustada'

Mediciones para identificación de valores reales de un parámetro

Línea: Llenado/sellado de tubos compresibles
 Máquina: Llenadora mod. 850
 Producto: Mascarilla árbol de té
 Defecto: Peso en tubos de 100 gramos
 Piezas muestreadas: 150

Fecha: 24-mar-08
 Valor estándar 100 - 103 gramos
 Piezas producidas: 10.076
 Método de muestreo: Sistemático (10 pza/media hora)

Muestra	Lectura observada										Promedio
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	101,3	100,2	101,6	99,7	102,8	102,6	101,2	100,7	101,1	102,2	101,3
2	101,7	100,2	101,4	100,2	100,0	100,9	99,6	100,9	101,3	100,1	100,6
3	100,4	100,4	101,6	100,2	101,6	101,0	101,6	100,3	100,1	101,6	100,9
4	101,9	100,8	100,5	100,4	100,5	101,5	100,5	100,6	99,5	100,8	100,7
5	100,5	101,4	100,8	100,4	99,1	99,2	100,8	100,3	101,8	100,5	100,5
6	100,6	101,0	100,2	99,9	100,8	101,2	101,7	100,5	102,7	101,4	101,0
7	100,0	101,6	100,2	101,0	101,1	101,8	100,7	100,6	100,3	100,3	100,8
8	100,9	102,3	102,6	101,9	101,9	100,0	99,8	100,8	99,2	101,1	101,1
9	102,0	101,4	100,6	101,5	100,1	100,5	100,5	101,1	100,9	101,5	101,0
10	98,9	100,8	99,9	100,7	100,6	100,5	100,8	100,5	101,0	99,9	100,4
11	101,0	100,2	100,3	101,4	101,5	100,2	100,0	100,5	101,4	101,5	100,8
12	100,6	102,1	101,6	100,4	100,9	103,2	99,9	101,5	99,8	101,6	101,2
13	101,7	100,8	101,9	100,8	101,8	101,2	99,3	100,3	100,5	99,2	100,8
14	99,6	100,8	101,6	100,7	100,2	100,7	101,7	102,0	101,5	102,0	101,1
15	101,4	100,0	100,1	100,5	101,3	101,6	101,4	100,0	101,5	99,8	100,8
16										Prom.	100,85
17										Var.	0,8299
18											
19											
20											

Observaciones: Flecha de árbol de levas reparada. Ing. Alva (Precisa)

Elaboró: Tec. Abel Lozada Revisó: Ing. Ricardo León Aprobó: Ing. Ricardo León

Figura A.5.4 Datos obtenidos del sellado de tubos para la mejora 'Árbol de levas reparado'

Mediciones para identificación de valores reales de un parámetro

Línea: Llenado/sellado de tubos compresibles
 Máquina: Llenadora mod. 850
 Producto: Crema glicerina y silicones
 Defecto: Peso en tubos de 100 gramos
 Piezas muestreadas: 150

Fecha: 19-mar-08
 Valor estándar 100 - 103 gramos
 Piezas producidas: 11.204
 Método de muestreo: Sistemático (10 pza/media hora)

Muestra	Lectura observada										Promedio
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	101,2	101,8	100,1	100,3	100,2	101,3	100,3	100,8	100,7	100,1	100,7
2	100,9	102,6	100,9	99,7	101,1	100,8	102,0	102,1	102,3	103,0	101,5
3	99,8	101,1	100,9	102,3	100,0	100,1	99,7	99,8	101,7	101,5	100,7
4	100,9	101,7	101,4	100,4	100,8	100,7	100,6	100,2	102,2	98,8	100,8
5	101,3	99,8	99,3	102,0	101,3	101,1	99,7	100,5	101,3	102,8	100,9
6	99,9	103,3	100,9	100,6	101,2	101,0	99,5	101,6	102,9	99,4	101,0
7	101,4	100,4	101,5	100,5	100,2	99,9	101,1	101,5	100,4	101,3	100,8
8	100,8	102,5	99,5	101,6	102,4	101,8	100,9	100,4	101,2	101,2	101,2
9	99,6	100,5	99,1	100,2	101,8	99,7	102,2	101,1	101,5	101,6	100,7
10	103,7	100,0	99,2	97,5	101,0	99,8	99,6	100,4	101,4	101,9	100,5
11	99,9	101,4	101,0	100,5	100,9	102,9	99,9	102,8	101,6	99,5	101,0
12	101,4	101,3	100,2	102,1	101,7	99,8	101,2	102,2	101,5	101,8	101,3
13	99,6	101,1	100,9	99,2	100,9	100,5	101,7	101,4	101,2	100,8	100,7
14	101,1	101,2	101,2	101,1	101,4	100,3	100,3	100,3	100,8	102,4	101,0
15	100,7	99,8	99,5	100,9	101,0	102,5	101,4	100,4	100,1	102,3	100,9
16										Prom.	100,92
17										Var.	0,9946
18											
19											
20											

Observaciones: Ajuste hecho por Armando Díaz. Supervisor: Enrique Hdz.

Elaboró: Tec. Adriana Osorno Revisó: Ing. Enrique Hernández Aprobó: Ing. Enrique Hernández

Figura A.5.5 Datos obtenidos del sellado de tubos para la mejora 'Ajuste conforme a gráficas'