



1.1 Introducción

El Mantenimiento es un proceso de gestión integral que debe comenzar en el momento mismo de la concepción de una obra o anteproyecto; vale decir, desde el inicio del ciclo de vida de los equipos. Lamentablemente es fácil darse cuenta que esto no siempre se ve reflejado en la práctica. Nos conformamos con pensar en el mantenimiento a partir del momento en que los equipos o activos se instalan en la Planta, o aún lo que es peor, cuando comienzan a funcionar.

La Gestión del Mantenimiento, como especialidad de la ingeniería, abarca un amplio campo de aplicación. Hay mantenimiento en la industria química y petroquímica, industria del acero, construcción, aeronáutica, hospitales, escuelas, bancos, ingenios, centros de compras, minas, distribución eléctrica, servicios públicos, redes informáticas, etc.

Todas las decisiones tomadas en relación a un activo como parte de un sistema productivo de bienes o servicios, y en cualquier etapa de su vida, tendrán indefectiblemente algún impacto en su desempeño. Además, las máquinas durante su operación sufren un proceso de deterioro, por lo que es preciso eliminar o reducir las pérdidas operativas de cualquier índole que ocurran a raíz de tal deterioro.

El principal objetivo de esta sección es hallar una definición para el proceso Mantenimiento que se ajuste a las necesidades actuales, teniendo en cuenta algunos aspectos de importancia.

En principio debe reconocerse que el mantenimiento busca que las instalaciones satisfagan las funciones requeridas por el proceso productivo. Por tanto, las actividades relacionadas con mantener funciones de activos deben ser dosificadas con estudiada precisión. Téngase en cuenta que, en mayor o menor medida, las intervenciones de mantenimiento son invasivas por naturaleza y su aplicación es conveniente que sea controlada y no deliberada; no siempre por "hacer más" se obtienen mejores resultados.

Suele definirse a Mantenimiento como un conjunto de acciones de preservación de activos, en un determinado sector productivo, satisfaciendo estándares de calidad, seguridad o servicio. También se lo relaciona con el impacto que tiene en la salud económica del negocio a través de los gastos en los que hay que incurrir para realizar las tareas. Sin embargo, y al igual de lo que sucede con la empresa en su totalidad, las estrategias y actividades para mantener las funciones de los equipos deben estar alineadas con la misión y objetivos de la organización; la gestión del mantenimiento debe desarrollarse, desde todo punto de vista, lo más cercanamente posible a la producción.

En los últimos tiempos la misión y objetivos del Mantenimiento han virado desde un punto de vista conceptual. El abandono de viejos paradigmas se vio forzado por la necesidad de cubrir las expectativas actuales de producción. La misión de toda actividad industrial, es su razón de ser; más precisamente, las razones por las que existe. La misión debe ser amplia y estar claramente establecida y conocida por todos los miembros de la empresa.

Eliyahu M. Goldratt en su libro *La Meta*¹ introduce nuevas ideas referidas a los objetivos primarios que una actividad industrial alcanza y mantiene. El autor indica que la meta de una organización que produce bienes o servicios es ganar dinero ahora y en el futuro. Por lo tanto, todo lo que se haga en el *Proceso Mantenimiento*, desde un punto de vista económico, deberá apuntar a que la compañía alcance su meta.

Mantenimiento presta un servicio basado en la reparación de averías o defectos. Pero no sólo ello, también persigue anticiparse a las fallas aplicando métodos de análisis para evitar su recurrencia o mitigar sus consecuencias. Además, y ocasionalmente, el área de Mantenimiento puede participar en la modificación de activos para aumentar su disponibilidad o capacidad. Si bien es cierto que desde lo estrictamente conceptual dichas modificaciones no representan acciones de mantenimiento, de todos modos deben tenerse en cuenta.

Considérese que los programas de mantenimiento no tienen efecto sobre los aumentos de capacidad nominal productiva. Las áreas operativas deben asumir que no es posible superar las expectativas del diseño sólo ejecutando acciones de mantenimiento puro. Para incrementar la capacidad nominal de un diseño, hacen falta recursos adicionales, tecnología y un proceso controlado de mejora.

El concepto anterior permite definir ítem *mantenible* como aquel cuya capacidad inherente en su diseño supera la capacidad deseada; sólo en estos casos Mantenimiento puede asumir el compromiso de garantizar su disponibilidad.

¹ Eliyahu M. Goldratt es autor de *La Meta* (Ed. Díaz de Santos 1993), y de otras publicaciones como "No es cuestión de Suerte".

Gestionar el Mantenimiento también requiere administrar recursos, por lo general escasos. Es un proceso de análisis y reflexión pues muchos de estos recursos, como las variables que intervienen, están en función del tipo de industria y del escenario en el que ésta se desempeña. El nivel de disponibilidad necesario, la calidad requerida para los productos, los niveles de servicios solicitados, los volúmenes de producción comprometidos, las habilidades del personal y su especialización, el escenario financiero que atraviesa la empresa, las reglamentaciones vigentes en seguridad y medio ambiente, etc., son factores propios de un determinado contexto. Cuando una compañía decide *hacer mantenimiento*, debe primero definir el alcance de lo que desea mantener en su contexto. ¿Qué pretendemos de los equipos?

Lo tradicional fue siempre pensar en el mantenimiento del activo como una actividad aislada del resto del sistema, con parámetros que tienen categoría de **absolutos**. En mantenimiento, como en otras actividades, la mayoría de los parámetros son **relativos**. Analizar un sistema asumiendo sus parámetros como relativos es entenderlo de manera **sistémica**; es en este punto donde radica el problema y ocurren las mayores divergencias de criterio.

Si las instalaciones se conciben aisladas del contexto de funcionamiento del que forman parte, las acciones tomadas no tendrán la profundidad necesaria para satisfacer los resultados esperados. Muchas acciones irán dirigidas a objetivos intrascendentes y se generarán gastos innecesarios. Por otra parte, se correrá el riesgo de omitir tareas imprescindibles para evitar o minimizar perjuicios en la seguridad o el entorno.

Por el contrario, si se considera a los activos dentro del sistema productivo y formando parte de un proceso integrado, donde no haya propiedades absolutas sino relativas, podremos darle al proceso de gestión de mantenimiento mayor alcance, eficacia y eficiencia.

Asumir que los equipos pertenecen a un proceso sistémico pondera la hipótesis del contexto y permite conocer sus funciones en profundidad para mantenerlas en estado operativo.

1.1.1 Hipótesis del Contexto

El conjunto de factores de cualquier índole que influyen de manera directa o indirecta sobre el funcionamiento de un equipo en proceso, se llama **Contexto de Funcionamiento** o **Contexto Operativo**. Se resumen a continuación algunos de estos factores.

- ✓ Ubicación, distribución y tipo de proceso productivo.
- ✓ Materias primas e insumos utilizados.
- ✓ Consecuencias de las detenciones.
- ✓ Factores sociales, geográficos y climáticos.
- ✓ Regímenes y estándares de operación.
- ✓ Dispositivos de protección y grado de redundancias (elementos en stand-by).
- ✓ Períodos de servicio, tipo de demanda.
- ✓ Cantidad y grado de habilidad de los talentos humanos.
- ✓ Sistema de gestión implementado y su profundidad de despliegue.
- ✓ Capacidad, calidad y precio de los proveedores.
- ✓ Disposiciones legales sobre Seguridad y Medio Ambiente.



Figura 1.1.1 Factores que influyen y determinan el Contexto Operativo de un equipo.

La importancia del contexto operativo en la gestión de activos es fuertemente señalada por la metodología RCM¹. Siendo que el entorno en el que actúa un equipo tiene un gran impacto en su estrategia de mantenimiento, se torna imprescindible mencionarlo en este momento porque excede ampliamente el ámbito de la metodología mencionada. El contexto operativo debe considerarse en cualquier método de gestión o emprendimiento de mantenimiento.

Si el contexto operativo varía, es altamente probable que también lo hagan las funciones que los equipos cumplen dentro de él. Si el entorno cambia, seguramente será a través de los factores enumerados en la figura anterior. Dichas alteraciones influyen directamente en las funciones del activo y, por tanto, en su estrategia de mantenimiento. Así por ejemplo, dos ventiladores de impulsión de aire iguales podrán tener distintos planes de mantenimiento si el contexto operativo en el que operan no es el mismo.

El concepto de contexto operativo constituye la mejor explicación acerca de que los planes de mantenimiento son dinámicos. Que sean dinámicos no significa que tengan que cambiar porque sí, o que su modificación deba ser establecida con anticipación a la entrada en servicio. En realidad se encuentran en una situación potencial de cambio permanente; vale decir, son susceptibles de modificación. Por tal motivo, es imprescindible contar con procesos de mejora bien establecidos y eficaces.

La hipótesis del contexto establece que cualquier activo físico se comportará de acuerdo al entorno en el que se desarrolla. Las necesidades que de él se tengan (sus funciones) estarán signadas en gran medida por ese contexto.

Siendo que el entorno influye en las funciones de los equipos, Mantenimiento debe asegurar que dichas funciones se cumplan en el contexto reinante; y no en un contexto o situación ideal. Es por tal motivo que Mantenimiento no debe mantener equipos concebidos como **objetos absolutos**, sino que debe mantener sus funciones como **objetos relativos** al propio contexto.

Un equipo se pone en servicio para dar garantía de continuidad a funciones específicas; alguien lo instaló para cumplir un propósito y un objetivo. Mantenimiento debe preservar justamente la condición básica de funcionamiento a través de sus funciones. Sin embargo, la noción de condición básica (utilizada por TPM²) tampoco es un parámetro absoluto. Puede no ser necesario que todos los equipos de un proceso productivo alcancen cierto grado de condición básica **absoluto** pues podría generarse un elevado e innecesario nivel de gastos.

Los responsables de las áreas de mantenimiento deben nutrirse de nuevas metodologías de optimización y gestión que tengan en cuenta estos aspectos y que aporten favorablemente en el cumplimiento de objetivos integrales como, por ejemplo, RCM y TPM.

1.1.2 Paradigma de Máxima Disponibilidad

Es comprensible que para encontrar una buena definición sobre Mantenimiento, y teniendo en cuenta que se trata de una actividad técnica – económica, podamos comenzar analizando las funciones de los elementos desarrollándose en un determinado contexto operativo. Como se mencionó oportunamente, no alcanza con mantener equipos. Ir más allá significa pensar que, desde un punto de vista productivo, debemos mantener funciones.

Reparemos en el hecho de que mantener equipos realza la noción de absolutismo; mientras que la manutención de sus funciones tiene un carácter relativista.

Escuchamos a menudo: “Mantenimiento debe garantizar la disponibilidad”, y sobre esto existe poca discusión. Pero... ¿La disponibilidad de qué? ¿De los equipos? No precisamente. Debe procurar mantener la disponibilidad de las funciones. Y, ¿qué nivel de disponibilidad?, ¿importa la máxima disponibilidad?, no necesariamente, sino la disponibilidad suficiente para que el proceso productivo no se vea interrumpido o afectado de ninguna forma.

Un sistema productivo se verá comprometido cuando deje de aportar lo necesario para cumplir con la meta y objetivos de la empresa, y en ningún otro caso.

¹ RCMII – Reliability Centred Maintenance (Mantenimiento Centrado en Confiabilidad) de John M. Moubrey - Aladon LLC2004, página 29.
² Herramienta administrativa de Gestión y Mejora cuyas siglas en inglés significan Mantenimiento Productivo Total.

En ciertas ocasiones, para mejorar la disponibilidad es preciso hacer modificaciones totales o parciales sobre un equipo. En lo que respecta al mantenimiento, estas mejoras pueden requerirse por razones de **confiabilidad** o de **mantenibilidad**. Sin embargo, toda alteración deberá aportar con valor a la meta directa o indirectamente. (*Ver Mantenimiento Mejorativo, Capítulo 6*).

1.1.3 Aspecto Económico

El área de mantenimiento presta un servicio al resto de las actividades productivas. Las tareas técnicas y administrativas de tal servicio generan gastos operativos que deben ser controlados. Sin embargo, el control de gastos en mantenimiento no debe basarse únicamente en los costos que sólo indican resultados de corto plazo.

Se dice que lo que no se puede medir no se puede controlar ni mejorar. Los indicadores de resultados y de proceso son adecuados para medir e implementar acciones que corrijan los desvíos. No obstante, resulta difícil mejorar el desempeño de un activo si la medición efectuada es errónea. Medir mal es tener indicadores inadecuados; consecuentemente, los resultados que éstos arrojen pueden inducirnos a decisiones cuyas consecuencias sean catastróficas.

Es muy común escuchar comentarios como: *“Si todos nuestros indicadores están bien.....no sabemos por qué estamos como estamos”*.

Cuantificar el gasto de mantenimiento y las pérdidas asociadas a los fallos es relativamente sencillo; estimar los ahorros por un buen desempeño en la gestión, no es costumbre y resulta bastante más difícil. En el capítulo correspondiente a gastos de mantenimiento se aborda la problemática de indicadores de resultados vinculados al gasto integral. Por el momento, es suficiente saber que los indicadores son sólo herramientas útiles para medir la eficacia, eficiencia o efectividad de un proceso y tomar decisiones en consecuencia. Si éstos no son adecuados, probablemente las decisiones tampoco lo sean. *“...se debe dedicar tanto esfuerzo en asegurar que se están realizando las tareas correctamente como en asegurar que se están haciendo las tareas correctas.”*¹

Para hacer mantenimiento es necesario gastar recursos; pero ¿cuál es el monto más bajo que garantiza alcanzar la meta? *“Debemos hacer mantenimiento al menor costo posible”*, motivante afirmación que esconde un falso paradigma porque puede suceder que tomar el gasto aislado de alguna otra variable industrial resulte contraproducente, sobre todo a largo plazo. Una cosa es reducir el **costo instantáneo** y otra el **costo total integral**.

La respuesta pareció darla la contabilidad de costos; por ejemplo, haciendo el cociente entre el gasto de mantenimiento y el volumen producido. Este indicador parece ser irrefutable porque permite hacer comparaciones entre los costos de mantenimiento de dos activos similares. Sin embargo, puede ocurrir que el menor costo no contribuya a los objetivos del negocio. No siempre el menor costo (así estimado) es garantía del aumento de beneficios. Las compañías buscan aumentar sus ingresos netos por ventas y no bajar solo los costos. Estos dos últimos aspectos no siempre van de la mano.

El costo de mantenimiento, como indicador, es tremendamente peligroso si no se utiliza en forma correcta y oportuna. La capacidad instalada y el sostenimiento de la disponibilidad en el tiempo, pueden verse seriamente afectados si dicho indicador es mal interpretado.

1.1.4 La Tecnología y el Mantenimiento

Es frecuente ver que conforme aumenta el nivel de complejidad técnica aumenta también el grado de habilidad y preparación requerido de los talentos humanos cuya responsabilidad será intervenir tanto en el diagnóstico como en la reparación de los fallos.

► El aumento de capacidad nominal requiere mayor atención

Siendo que generalmente los procesos productivos incrementan en forma progresiva su capacidad nominal, y no aumentan proporcionalmente en número, las detenciones provocadas por las averías tendrán cada vez mayor impacto.

► El aumento de complejidad técnica requiere mayor atención

Las formas, causas o maneras de fallar de los componentes son cada vez más complejas y menos do-

¹ Del libro RCMII Reliability Centred Maintenance de John M. Moubrey - Aladon LLC2004, página 6.

minantes (*Ver modos de falla* pág. 22). Las fallas suelen ser más fortuitas o aleatorias. Antiguamente las formas en que un equipo podía fallar estaban asociadas a un par de causas fáciles de identificar y vinculadas casi exclusivamente al desgaste progresivo. A medida que crece la automatización y la complejidad, estas posibles *formas de fallar* aumentan en complejidad y cantidad. Su diagnóstico se vuelve más y más difícil y la probabilidad de que surjan defectos inesperados se eleva significativamente.

► El contexto operativo requiere mayor atención

Los regímenes de trabajo actuales a los que se encuentran sometidos los equipos son bastante más exigentes que en el pasado. Mayores velocidades de trabajo, elevadas temperaturas, mayor carga puntual, mayores estándares de calidad, etc. son algunas de las causas que obligan a la función mantenimiento a evitar la aparición de averías que alejen a las funciones del activo (total o parcialmente) de su estándar de funcionamiento.

De acuerdo a estos tres aspectos anteriores se impone la necesidad de controlar y evitar cada vez con mayor énfasis las detenciones no previstas, porque aumenta considerablemente la sensibilidad del proceso productivo. Con el aumento de la capacidad nominal de un equipo se compromete mayor volumen y las consecuencias que tendrán ahora las detenciones serán también mayores. Los efectos contra los que hay que lidiar tienen cada vez mayor impacto desfavorable, y el mantenimiento debe enfocarse y esforzarse en minimizar la ocurrencia de las fallas y mitigar sus consecuencias.

Para afrontar este incremento de dificultad, el personal afectado a Mantenimiento debe estar permanentemente actualizado y contar con recursos suficientes.

1.1.5 La Seguridad y el Mantenimiento

La seguridad y el mantenimiento están íntimamente relacionados. Este concepto está a flor de piel en la opinión pública. Cuando acontecen hechos desgraciados en que personas o entorno han sufrido daños, el mantenimiento es uno de los factores primeramente analizados.

En ciertos ámbitos tecnológicos las funciones de los equipos tienen como misión prevenir situaciones peligrosas. Si el servicio que presta Mantenimiento no es capaz de proteger las funciones en un grado tal que las fallas con perjuicios graves no se manifiesten, evidentemente estamos frente a falta de calidad en los trabajos, incumplimiento del plan de mantenimiento o rutinas de mantenimiento mal diseñadas (plan de mantenimiento inadecuado).

Por lo anterior, y en mucha mayor escala de lo que habitualmente se cree, Mantenimiento debe asumir su rol protagónico. Muchas acciones llevadas adelante casi diariamente en el ámbito industrial (o de servicios), encierran potenciales consecuencias para la seguridad.

Los dispositivos de seguridad, alarmas, circuitos automáticos de detención, elementos de protección, equipos redundantes (stand-by), sistemas contra incendios, detectores, etc., son todos componentes que Mantenimiento debe gestionar de manera eficaz.

Existen distintas estrategias de mantenimiento¹ para reducir a niveles tolerables los riesgos de falla que pongan en peligro la seguridad. Lo interesante es determinar qué clase de mantenimiento o combinación de tareas será mejor en cada caso.

1.1.6 Definición

Con lo precedente podemos definir al Mantenimiento como:

Proceso que tiene como misión lograr los niveles establecidos de disponibilidad para las funciones de la instalación en su contexto operativo, valiéndose de talentos humanos, recursos, activos, controles y mecanismos de gestión, y satisfaciendo los niveles de Producción / Servicio comprometidos por la Organización durante un determinado horizonte de tiempo con los estándares de seguridad vigentes y sin incurrir en gastos que no contribuyan con el sostenimiento de las condiciones anteriores.

¹ Se llama Estrategia de Mantenimiento al conjunto de tareas de mantenimiento que se aplican a un equipo con el fin de evitar la ocurrencia de las fallas o minimizar sus consecuencias, y sin agregarle valor adicional a éste.

El Proceso Mantenimiento puede representarse por medio del siguiente esquema:

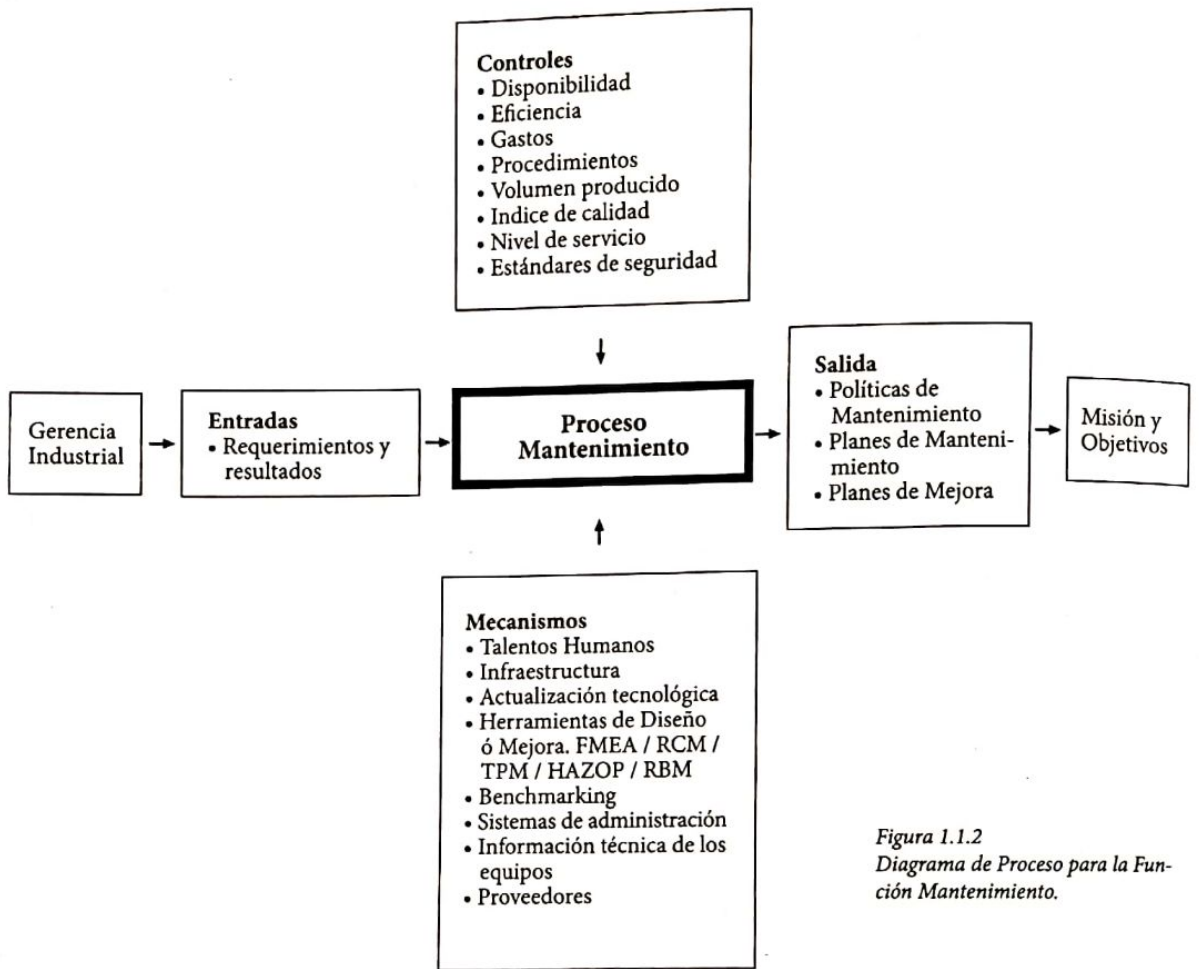


Figura 1.1.2
Diagrama de Proceso para la Función Mantenimiento.

Cabe finalmente mencionar que un error sorprendentemente generalizado es *diseñar para la media*. Creer que pueden aplicarse estrategias de mantenimiento idénticas para todos los equipos pertenecientes a un mismo *tipo*. Esto es un error por lo dicho anteriormente en relación al contexto operativo y a las funciones que los equipos desarrollan dentro de él.

1.2 Disponibilidad

La combinación apropiada de Mantenibilidad y Confiabilidad es garantía del sostenimiento de la Disponibilidad.

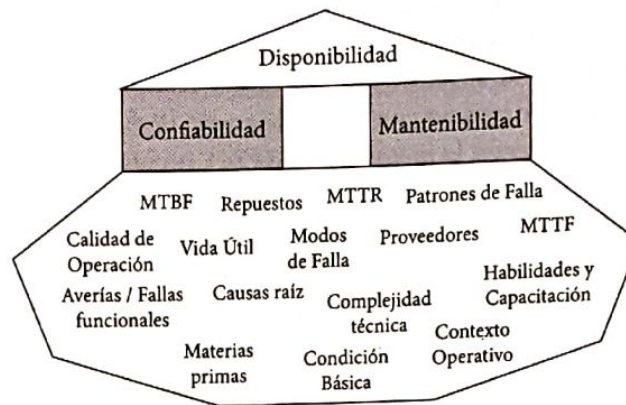


Figura 1.2.1
Esquema de Disponibilidad.

Con Mantenimiento se busca sostener los valores de disponibilidad según las necesidades del proceso. Esta propiedad debe ser conservada en el tiempo dentro de límites prefijados.

La **Disponibilidad Operacional**, conocida como *Available Production Time*, se mantiene con dos pilares fundamentales, la Confiabilidad y la Mantenibilidad. El mantenimiento tiene que ser capaz de asegurar la firmeza de estas *columnas*. La altura del *techo* está en relación a los valores necesarios y suficientes para no interrumpir los procesos productivos. Hablamos de disponibilidad requerida y no de máxima disponibilidad.

Cuando se aborden temas referidos a los tipos de mantenimiento, se verá que alcanzar un valor de disponibilidad explícito requerirá cierto tipo de tareas (y frecuencias). Si dicho valor (expectativa) cambia, probablemente también varíen las tareas y sus frecuencias de ejecución.

El estudio y diseño del Plan de Mantenimiento tiene como variable fundamental el nivel de disponibilidad requerido, por ello no es justo hablar de *máxima disponibilidad*, en términos absolutos.

1.2.1 Fallas e Introducción a los Modos de Falla

La entidad suprema en el ámbito del mantenimiento es el **modo de falla (fallo¹)**. Existe abundante material escrito al respecto; sin embargo, en general se percibe falta de uniformidad de criterios. Solemos escuchar: “la máquina falló”, “el sistema se encuentra en estado de falla”, “hay que eliminar los fallos”, “se produjo un fallo”, etc.

Para satisfacer completamente las necesidades de producción debe existir consenso en el significado del término. No obstante, antes de introducir el concepto de modo de falla (desarrollado con mayor grado de detalle en el Capítulo 7) debemos definir qué se entiende por **falla (falla funcional)**.

Se dijo que establecer una condición de funcionamiento para un equipo es una situación completamente subjetiva. De la misma forma, a la hora de calificar a un evento como “falla” suele existir discrepancia entre distintas opiniones. Por este motivo la definición más ajustada se logra relacionando el evento **falla** con el estado deseado de funcionamiento del equipo bajo análisis². Para saber si un equipo falla hay que establecer qué se esperaba de él antes de sucederle la eventualidad.

Si no se tiene en cuenta el nivel de demanda establecido para la función que esperamos del activo, podrá suceder que una persona considere que el equipo falló mientras que otra opine lo contrario. Cuando el estándar de funcionamiento deseado³ es explícito, pocas dudas quedarán para determinar si ha ocurrido una falla (Ver Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, sección 7.2 del Capítulo 7).

Decimos que una **falla** es la pérdida de capacidad, total o parcial, de un ítem mantenible para satisfacer un nivel de operación establecido por la función. Si sobre el componente se presenta dicho estado de no funcionamiento (insatisfactorio), no es posible alcanzar los estándares definidos para la operación.

Suele considerarse el término avería como un caso particular de falla. Cuando una falla impide el funcionamiento total del equipo, al que pertenece el elemento fallado, se dice que ocurrió una avería. A las averías se las vincula habitualmente con la detención del equipo o el incumplimiento total de su función. De todas formas no siempre es necesario discriminar las fallas de las averías.

¹ Usamos el término **fallo** como abreviatura de **modo de falla**.

² Los conceptos sobre Función, Falla Funcional y Modo de Falla aquí adoptados se basan en los criterios establecidos por la metodología RCM a través de la Norma SAE JA 1011 (Secciones 3.12, 3.13 y 3.14).

³ Expresión tomada de la metodología RCM y su norma reguladora.

Ejemplo 1.2.1

Un ventilador para forzar el flujo de material molido y en suspensión impulsa mineral hacia un silo de almacenamiento. Si se interrumpe completamente el flujo, existirán pocas dudas de que el transporte presenta una falla (avería). Hay otras situaciones, sin embargo, en que el equipo opera aparentemente en forma normal pero con un caudal de aire más bajo que el nominal. Para estos casos el sistema también presenta una falla, aunque todavía no con la pérdida total de función. A continuación se listan 10 ejemplos de falla (*falla funcional según la metodología RCM*), no relacionados con el ejemplo anterior.

1. *La luz de alarma no indica en el tablero de control.*
2. *El soplante impulsa menos de 45 m³/h de aire, que es lo requerido por la operación.*
3. *El caudal de la bomba de agua es menor a 20 m³/h necesarios para llenar el tanque.*
4. *El motor no mantiene la velocidad de la cinta entre 0,4 y 0,5 m/seg.*
5. *La válvula de seguridad no alivia la presión del reactor cuando ésta alcanza 6 Kg/cm².*
6. *El eje transmite la potencia con un valor de vibración en velocidad mayor a 10 mm/seg.*
7. *El aceite no es capaz de evitar la corrosión de los mecanismos.*
8. *La viscosidad del aceite está por debajo de 15 cSt.*
9. *El reactor no alcanza, en dos horas, los 89 °C requeridos para el proceso productivo.*
10. *El reductor no contiene el aceite completamente, presenta pérdidas.*

Este ejemplo pone de manifiesto la necesidad de establecer cuantitativamente, en la medida de lo posible, el estándar de funcionamiento requerido para la función. En el primero de ellos esto no es posible dado que la luz de alarma indica o no indica; de igual manera en 7 y 10.

Una falla es la consecuencia que se da como resultado de manifestarse, al menos, un modo de falla.

Modos de Falla

El corazón de la gestión de activos son los **modos de falla (fallos)**. La única forma de obtener buenos resultados perdurables en el tiempo, es a través de un correcto manejo de los modos de falla. Aunque no nos demos cuenta, el trabajo diario de Mantenimiento consiste en corregir y evitar modos de falla, o bien mitigar sus consecuencias. No comprender este concepto, es no saber **porqué** se hace lo que se hace. Mantenimiento debe entender acabadamente porqué y para qué hace sus labores. Lamentablemente esto no se resume diciendo: *"para que los equipos funcionen correctamente"*.

Cada acción tomada (reactiva o pro-activa) tiene detrás, al menos, un modo de falla. Sabemos que es requisito establecer el estándar de funcionamiento para las funciones de un equipo. Luego, si se asume que los modos de falla son las **razones** o **causas** por las que no se cumple dicho estándar, lo efectuado desde mantenimiento debe "apuntar" a evitar la ocurrencia del modo de falla; lo demás, no tendrá sentido.

Las posibles causas que originan una pérdida de función, y que eventualmente pueden ocurrir en alguna de las partes individuales de una máquina como proceso de degradación conocido o aleatorio, se denominan modos de fallas.

Un equipo es un conjunto de componentes relacionados tecnológicamente que podrá ser más o menos complejo en función de la cantidad de partes que lo constituyen y en función de la relación lógica que entre ellas exista. Esta agrupación será del tipo serie, paralela o compuesta (*Ver Confiabilidad de Sistemas, punto 1.2.9*). Su complejidad dependerá también de la complejidad técnica de cada uno de sus elementos que, a los fines del análisis, se pueden subdividir en tantas partes como sea necesario aunque hasta cierto límite.

Los sistemas con muchos componentes (multicomponentes) contemplan más de un modo de falla, y el espectro del árbol de fallos de todo el sistema estará determinado por el aporte que cada elemento hace en forma individual. A su vez, puede ocurrir que cada componente individual tenga más de un modo de falla, o también que un mismo modo de falla se pueda repetir en más de un componente. Cualquiera sea la combinación, el desempeño del sistema estará signado por el de cada una de sus partes.

El párrafo anterior tiene un fuerte impacto en lo que más adelante se desarrolla como tasa de fallas (λ). La tasa de fallas de un sistema esta referida a la tasa de fallas de sus partes a través de los respectivos modos de falla.

Para el diseño u optimización de un Plan de Mantenimiento es muy importante proponer todos los modos de falla (potenciales y reales, ocurridos y no ocurridos); sólo así será factible realizar un análisis base cero y alcanzar los estándares de disponibilidad requeridos¹.

Ejemplo 1.2.2

Se lista a continuación un **modo de falla** para cada **falla** descrita en el ejemplo anterior.

1. Lámpara del tablero quemada.
2. Daños y fugas en el conducto de acometida a la operación.
3. Rotor de la bomba desgastado.
4. Errores de configuración en los parámetros de programación del PLC (Program Logic Controller).
5. Vástago de apertura trabado en cerrado.
6. Eje desbalanceado.
7. Contaminación del aceite con agua.
8. Aceite contaminado con combustible.
9. Suministro insuficiente de vapor.
10. Rotura del retén debido a golpes durante el montaje.

Es muy probable que existan causas más profundas para los modos de falla enumerados. Debemos responder la pregunta, ¿por qué se dan estas condiciones? Por ejemplo, determinar cuáles son las posibles razones del "suministro insuficiente de vapor" del punto 9, nos debería conducir a sus causas *más raíces*. Estas últimas serán los verdaderos modos de falla.

Ejemplo 1.2.3

Tomemos el caso de un reductor con lubricación forzada que se compone, entre otras partes, del cuerpo o caja, rodamientos, engranajes, ejes, lubricante, juntas, retenes, filtro, bomba de aceite, cañerías de lubricación, conectores, presostato, sistema de control de aceite, etc.

El comportamiento de cada elemento y la relación técnica de causa y efecto que entre ellos se establezca, signará el desempeño del reductor completo a lo largo de su vida.

Según se dijo, si un equipo deja de cumplir sus funciones, parcial o totalmente, se produce una falla funcional; si el reductor deja de cumplir alguna de sus funciones es por causa de la aparición de uno o más modos de falla ocurriendo aislada o simultáneamente.

Establecidas las funciones, un listado de los posibles modos de falla y sus efectos, podría ser:

- ✓ *Conexión desajustada en la cañería de alimentación de aceite (pérdida de aceite).*
- ✓ *Retén dañado (pérdida de aceite).*
- ✓ *Baja presión de aceite (que, a su vez, puede estar asociado a otro modo de falla primario en la bomba de lubricación)*
- ✓ *Propiedades físicas ó químicas del aceite insuficientes o agotadas (daños en las superficies de contacto deslizante).*
- ✓ *Filtro de aceite tapado (baja presión o caudal de aceite)*
- ✓ *Ventoso dañado (ingreso de partículas / elementos contaminantes).*
- ✓ *Válvula de aceite trabada (daños en las superficies de contacto deslizante).*
- ✓ *Rodamientos con juego excesivo (mal contacto deslizante entre partes).*
- ✓ *Cañerías de aceite obstruidas (lubricación insuficiente).*
- ✓ *Alarma por baja presión de aceite en estado de falla (lubricación insuficiente).*
- ✓ *Presostato dañado (daños en la superficie de contacto deslizante).*
- ✓ *etc.*

¹ Para el diseño o mejora de Planes de Mantenimiento se recomienda la implementación de procesos de análisis FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) o RCM (Reliability Centred Maintenance). Ver Capítulos 5 y 7.

Si analizamos más profundamente cada uno de los modos de falla enumerados, tal vez se descubra que hay una causa aún *más raíz* a la descrita, y que sea la razón verdadera de la falla. Por ejemplo, la baja presión o caudal de aceite sobre los engranajes del reductor no es en rigor un modo de falla, es en realidad un efecto que se manifiesta como consecuencia de la actuación de otro modo de falla primario, por ejemplo, en la bomba de lubricación.

También deben ser considerados los modos de falla producidos por la acción negligente del personal, pero únicamente con el fin de tomar las acciones correctivas necesarias, enriquecer la experiencia y evitar su reiteración.

Ejemplo 1.2.4

Se enumeran a continuación algunos **modos de falla** vinculados a falencias en la operación de un equipo, o durante tareas de mantenimiento. (Estos modos de falla no guardan relación con los ejemplos anteriores).

1. *El retén queda dañado a consecuencia de un mal armado.*
2. *Exceso de ajuste en el rodamiento durante el montaje.*
3. *Válvula de vapor cerrada por omitir maniobra de apertura durante la operación.*
4. *Aceite contaminado con combustible durante el trabajo de reemplazo.*
5. *Se quema la fuente de alimentación por negligencia durante la puesta en marcha.*

1.2.2 Tipos de Fallas

Las fallas se agrupan conforme al siguiente criterio.

Falla Funcional

Ocurre una **falla funcional** (también conocida como *falla operacional*) cuando el componente deja de satisfacer completamente la función requerida como resultado de manifestarse uno o más modos de falla¹.

Ejemplo: Rotura del eje de un transportador; se detiene el transporte y la producción.

*Ejemplo: Un ventilador impulsa menos aire que el necesario para la función de transporte. Suele catalogarse equivocadamente a este fallo como un potencial defecto, debido a que el ventilador sigue funcionando. Sin embargo, esto no es cierto porque, habiéndose establecido un nivel mínimo de aire, la merma en el caudal es una **falla funcional** (no se satisface el estándar de operación especificado para la función).*

Falla Simultánea²

En los sistemas con redundancias o protecciones, se da una **falla funcional simultánea** cuando ocurre una falla en el equipo cargado o solicitado, mientras la protección o redundancia se encuentra también en estado de falla funcional ó avería (no disponible).

Ejemplo: Si el sensor de una alarma por alta temperatura se encuentra dañado al momento en que el sistema al que protege sufre efectivamente un exceso de temperatura, estamos en presencia de una falla simultánea.

Falla Sintomática o Potencial

Una **falla sintomática** es una condición de estado verificable (defecto o desviación incipiente) en los componentes o sus propiedades, que indica que una falla funcional está en proceso de ocurrencia, aunque el componente no haya dejado de cumplir completamente sus funciones. De no mediar acción alguna, la falla sintomática (irreversible) conducirá de cualquier modo a una falla funcional. Por regla general, la acción remediadora incluirá el reemplazo o restauración del componente.

Ejemplo: Vibración excesiva (falla sintomática) por daño en la pista interior de un rodamiento (modo de falla) sobre el que va montado un ventilador. La impulsión de aire todavía no se detuvo (ni disminuyó el caudal necesario) pero, de persistir la falla sintomática, derivará inevitablemente en la falla funcional del equipo. (Proceso Irreversible).

Cabe destacar que algunas fallas sintomáticas (dependiendo de la condición de estado) pueden ser reversibles.

¹ Los modos de falla (y el efecto asociado) se analizan generalmente en forma independiente, lo que es correcto cuando la dependencia modal no es significativa. Sin embargo, en algunas ocasiones es necesario realizar un árbol de eventos (Ver Capítulo 5, punto 5.2.4.4).

² También conocidas como Fallas Múltiples (punto 3.8 Sección 3 de la Norma SAE JA 1011 y página 9 de la norma MIL-2173 AS).

En ocasiones es factible aplicar técnicas de monitoreo que permiten tomar medidas correctoras desviando la tendencia, que de lo contrario, acabaría primero en una falla sintomática irreversible y luego en la falla funcional. Ejemplo: El recuento de partículas en un aceite (ISO 4406) se utiliza para monitorear el nivel de limpieza del lubricante. El tamaño y cantidad de partículas es un síntoma muy prematuro de futuras fallas en mecanismos. Con una acción de filtrado / cambio, se pueden evitar daños irreversibles sobre las superficies de fricción. (Proceso Reversible).

Falla Recurrente

Categoría de fallas funcionales repetitivas fuera de la frecuencia de ocurrencia establecida como aceptable. También se denominan crónicas y pueden ser causadas por un mismo modo de falla o por diferentes actuando simultáneamente.

Ejemplo: La falta de indicación de algún parámetro operativo en un sistema de control, puede ocurrir con mayor frecuencia que la esperada, lo que perjudica la operación.

El criterio de recurrencia también es válido para los modos de falla.

1.2.3 Tipos de Modos de Falla

Los modos de falla (fallos) se agrupan conforme a los siguientes dos criterios. El primero los estratifica en función del estado paramétrico en que se presentan, o bien de acuerdo al nivel de evidencia que manifiestan durante la operación.

Fallo Evidente¹

Es un modo de falla que se pone de manifiesto (a través de la falla funcional) en forma evidente y bajo circunstancias normales de operación cuando ocurre por sí solo.

Ejemplo: Desbalanceo del eje de un transportador (modo de falla) y rotura final (falla funcional).

Fallo Oculto

Normalmente asociado a los perjuicios que ocasiona en las funciones que desempeñan los dispositivos redundantes o de protección (funciones ocultas). La falla funcional provocada por un modo de falla oculto, no es detectable en condiciones normales de trabajo. (Ver Mantenimiento Detectivo, Capítulo 5).

Ejemplo: El sensor dañado en una alarma por alta temperatura.

Fallo Recurrente

Caben las mismas consideraciones que en el caso de Falla Recurrente.

Fallo Dominante

Un modo de falla se llama dominante si provoca la mayor cantidad de fallas funcionales en el componente. Algunos elementos pueden fallar por una o dos razones principales y así definen el patrón de fallas del elemento. Por el contrario, cuando un componente puede presentar una falla como consecuencia de una gran cantidad de modos de falla con similares probabilidades de ocurrencia, se dice que el mismo no posee un modo de falla dominante.

Ejemplo: Desgaste del recubrimiento interior de una tolva de descarga de producto terminado. El proceso de abrasión sobre la superficie interior es una condición de deterioro dominante respecto al resto de los posibles modos de falla.

Fallo Común

Un modo de falla es común cuando puede afectar a más de un componente o equipo. Se debe prestar especial atención cuando se tienen equipos redundantes, en los que su ocurrencia puede producir la indisponibilidad tanto del equipo a resguardar como del instalado en stand-by. Se manifiesta en redundancias activas o pasivas. Ejemplo: En el sistema de encendido redundante activo de los motores de combustión interna aeronáuticos, un modo de falla por desconexión eléctrica podría afectar simultáneamente a los dos circuitos en paralelo. (Ver Redundancia Activa Plena, sección 5.1.1 Capítulo 5).

¹ Concepto basado en el punto 3.7, Sección 3 de la Norma SAE JA 1011.

Oportunamente se verá que, de acuerdo al modo de falla (y su patrón de fallas), puede ser más conveniente la aplicación de alguna acción de mantenimiento por sobre otra.

El segundo criterio agrupa a los modos de falla de acuerdo al **origen**, y se conoce como **agrupación por causa**.

De diseño

Son modos de falla debidos al mal diseño, errores en la estimación del contexto operativo o errores de cálculo tanto técnicos como de capacidad. Generalmente provocan fallas recurrentes de acuerdo a la categorización anterior.

Ejemplo: Corte frecuente en el cable de accionamiento del embrague de un camión por mal diseño en la cremallera de regulación. Este error de diseño provoca una tensión excesiva en el cable y su rotura frecuente. (Se trata, además, de un modo de falla recurrente y dominante).

De fabricación

Todo proceso productivo es factible de incurrir en errores de fabricación. Los sistemas de control de calidad buscan detectar las piezas defectuosas que impactan en la tasa de fallas del equipo, principalmente en el inicio de su vida operativa.

Ejemplo: Defectos en la fundición por inclusión durante la fabricación de piezas estructurales.

De traslado y montaje

Durante las tareas de montaje e instalación, o durante el traslado, suelen suceder daños sobre las partes componentes.

Ejemplo: Problemas en la operación de llenado en una máquina embotelladora de gaseosas debidas a un mal reglaje o ajuste incorrecto en el montaje (modo de falla).

De uso u operación

La falta de idoneidad en el uso u operación de equipos (generalmente por falta de capacitación), es una causa importante de falla en la actividad industrial.

Ejemplo: Se quema el motor eléctrico por caída de agua (modo de falla) durante la operación de limpieza.

Por eventos aleatorios de contexto

Muchas piezas no responden a un patrón de fallas tal que a partir de un determinado momento aumentan rápidamente su probabilidad de falla, sino que pueden fallar como consecuencia de una gran cantidad de modos de falla cuya posibilidad de ocurrencia es totalmente aleatoria. Bajo esta aleatoriedad pueden mencionarse las inherentes al equipo, las ambientales o las debidas al cambio repentino del contexto operativo.

Ejemplo: Rotura de los vidrios en una nave industrial causada por la caída de granizo (modo de falla completamente aleatorio).

Por desgaste natural o envejecimiento

También llamados paramétricos, son modos de falla que tienen una vinculación directa con la vida operativa del elemento.

Ejemplo: El mismo ejemplo de la tolva de descarga de producto terminado.

Falla	
Funcional	Se presenta una falla funcional cuando un componente deja de satisfacer, parcial o totalmente, la función requerida.
Sintomática o Potencial	Una falla sintomática es una condición de estado verificable (defecto o desviación incipiente) en un componente o sus propiedades, que indica que una falla funcional está en proceso de ocurrencia aunque dicho componente no haya dejado, aún, de cumplir completamente sus funciones.
Simultánea	En sistemas funcionales con redundancias o protecciones, se presenta una falla simultánea cuando ocurre una falla en el equipo (o función) a proteger, mientras la protección o redundancia se encuentra también en estado de falla o avería (seguridad no disponible).
Recurrente	Falla funcional repetitiva fuera de la frecuencia aceptable de ocurrencia. También llamada crónica, puede ser causada por un mismo modo de falla o por diferentes, actuando simultáneamente.

Modo de falla			
(Según el estado paramétrico)		(Según el origen)	
Evidente	Modo de falla que se pone de manifiesto a través de la falla funcional, en forma evidente bajo las condiciones normales de funcionamiento, suponiendo que es el único que sucede en el sistema.	De diseño	Modo de falla ocasionado por un mal diseño (errores de estimación de contexto operativo, errores de cálculo, etc.).
Oculto	Modo de falla que ocurre en los dispositivos redundantes o de protección (funciones ocultas) no dotados de seguridad inherente. La falla funcional provocada por un modo de falla oculto no es detectable en condiciones normales de trabajo.	De fabricación	Modo de falla ocasionado durante el proceso de transformación o fabricación.
		De traslado y montaje	Modo de falla ocasionado durante las tareas de montaje e instalación, o durante el traslado del componente.
Recurrente	Las mismas consideraciones que en "falla recurrente".	De uso u operación	Modo de falla ocasionado por la falta de idoneidad en el uso u operación del equipo.
Dominante	Modo de falla que provoca la mayor cantidad de fallas funcionales en un componente.	Por eventos aleatorios	Modo de falla cuya probabilidad de ocurrencia es totalmente aleatoria (causas inherentes al equipo, ambientales, debidas al cambio repentino de contexto de funcionamiento, etc.).
Común	Modo de falla que puede afectar a más de un componente simultáneamente.	Por desgaste natural o envejecimiento	Modo de falla que tiene una vinculación directa con la vida operativa del elemento. También denominado paramétrico.

Figura 1.2.2 Resumen de tipos de fallas y modos de falla.

Los parámetros que se describen a continuación se denominan **Índices de Clase Mundial**¹.

1.2.4 Tiempo Medio entre Fallas (MTBF)

Este parámetro establece el *período promedio entre dos fallas* de un elemento en un contexto de funcionamiento dado; las letras MTBF corresponden a *meantime between failures*.

Cuando nos referimos a un elemento, éste puede ser un equipo o un sistema complejo, con la condición que se repara luego de la ocurrencia de la falla.

Si se trata sólo de un ítem, matemáticamente puede expresarse como el tiempo establecido para operar (T_o), menos el tiempo por paradas no programadas (T_{np}), dividido el número total de fallas (Cf) detectadas durante el tiempo de operación.

$$MTBF = \frac{T_o - T_{np}}{Cf} \tag{1.2.1}$$

En algunos casos suele aplicarse para analizar un conjunto de ítems independientes:

$$MTBF = \frac{(T_o \cdot n) - \sum_{i=1}^n T_{np(i)}}{\sum_{i=1}^n Cf_{(i)}} \tag{1.2.2}$$

Siendo n la cantidad de equipos considerados y T_o el mismo para todos los ítems.

¹ Expresión utilizada por Lourival Tavares en su libro: *Administración Moderna de Mantenimiento*, Capítulo 4 sección 2.