

# **DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA CORRELACIONAR TÉCNICAS DE ANÁLISIS EN CONFIABILIDAD CON LOS CICLOS DE VIDA Y LA GESTIÓN DE ACTIVOS**

**CRISTINA CAÑAVERAL VARGAS  
DIANA MARCELA HEREDIA**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de de Ingeniera Electricista**

Director

**Phd. Mauricio Holguín Londoño**  
Profesor titular

FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA INGENIERÍA ELÉCTRICA  
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
PEREIRA  
2017

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

Director  
*Ingeniero Electricista Phd.*  
Mauricio Holguín

---

Director del programa de  
Ingeniería Eléctrica  
*Ingeniero Electricista*  
José Germán López Quintero

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi madre Gluvirían Vargas por el apoyo brindado durante todos estos años, a mi compañero Aimer Idarraga Z. por su apoyo incondicional y en general a toda mi familia por estar siempre a mi lado

Este trabajo conto con el apoyo de numerosas personas, sin las cuales no se hubiese llegado a una feliz culminación; este pequeño pero sincero reconocimiento está dirigido a cada una de ellas pero de una manera muy especial a la mejor hija que Dios me dio Salomé Herrera Heredia.

Gracias al Phd. Mauricio Holguín por su apoyo y colaboración incondicional al dirigir este proyecto y al programa de Ingeniería Eléctrica por haber puesto a nuestra disposición todo el talento humano que nos acompañó durante todo este proceso de aprendizaje.

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
PARTE I. INTRODUCCIÓN.....	8
1. DEFINICIÓN .....	8
2. PLANTEAMIENTO .....	9
3. OBJETIVOS.....	10
3.1. OBJETIVO GENERAL .....	10
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	10
PARTE II. MARCO TEÓRICO.....	11
4. GESTIÓN DE ACTIVOS Y CICLO DE VIDA .....	11
4.1. CICLO DE VIDA .....	11
4.2. GESTIÓN DE ACTIVOS.....	12
4.3. COSTOS DEL CICLO DE VIDA .....	16
5. PAS 55 e ISO55000 .....	18
5.1. PAS 55 .....	18
5.1.1. Metodología para evaluar el sistema de gestión de activos según PAS 55 19	
5.1.2. Principios claves y características de la gestión de activos bajo la PAS 55 19	
5.1.3. Estructura de la PAS 55.....	20
5.1.4. Implementación de la PAS 55.....	22
5.1.5. Análisis de brechas existentes.....	23
5.2. ISO 55000 .....	23
5.2.1. Evolución y alcance de la gestión de activos según la ISO 55000.....	25
5.2.2. Estructura de la ISO 55000 .....	26
6. CONFIABILIDAD .....	29
6.1. ANÁLISIS POR PROBABILIDAD .....	30
6.1.1. Árbol de probabilidad .....	30

6.1.2. Tiempo Medio Entre Fallos y Tiempo Medio Para Fallo .....	31
6.2. ANÁLISIS POR ÁRBOL DE FALLOS. ....	32
6.3. CONFIABILIDAD EN SISTEMAS REDUCIBLES .....	33
6.4. CONFIABILIDAD EN SISTEMAS COMPLEJOS.....	36
6.5. LEY DE WEIBULL FALLA .....	36
7. MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD (RCM) .....	38
8. ANÁLISIS DE MODOS DE FALLA Y SUS EFECTOS ( ) .....	40
9. OPTIMIZACIÓN .....	45
10. REEMPLAZO DE DISPOSICIÓN FINAL.....	47
PARTE III. METODOLOGÍA DE CORRELACIÓN.....	50
11. CORRELACIÓN DE LA GESTIÓN DE ACTIVOS DEL CICLO DE VIDA Y SUS TÉCNICAS DE ANÁLISIS.....	50
12. CONCLUSIONES.....	52
13. BIBLIOGRAFÍA.....	54

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Gestión de activos .....	11
Figura 2. Ciclo de vida.....	12
Figura 3. CapEX y OpEX .....	17
Figura 4. Mantenimiento óptimo. ....	17
Figura 5. Niveles de gestión de activos.....	20
Figura 6. Estructura del sistema de gestión de activos.....	21
Figura 7. Niveles de madurez alineados IIMM. ....	22
Figura 8. Relación entre los términos clave .....	24
Figura 9. Evolución de la gestión de activos.....	25
Figura 10. Balance de la gestión de activos. ....	26
Figura 11. Estructura de la ISO 55000. ....	27
Figura 12. Elementos de la ISO 55000.....	29
Figura 13. Ejemplo árbol de probabilidad.....	31
Figura 14. Representación gráfica del MTTF .....	31
Figura 15. Representación gráfica de MTBF para un solo ítem .....	32
Figura 16. Ejemplo de un árbol de falla. ....	33
Figura 17. Sistema en serie.....	34
Figura 18. Sistema en Paralelo.....	34
Figura 19. Serie de paralelos .....	35
Figura 20. Paralelo de Series.....	35
Figura 21. Sistema en Stand-by. ....	35
Figura 22. Función de Weibull.....	37
Figura 23. Capacidad inicial y funcionamiento deseado.....	39
Figura 24. Activos físicos mantenibles.....	40
Figura 25. Aumento de funcionamiento deseado. ....	41
Figura 26. Curva P-F. ....	44
Figura 27. Intervalo P-F.....	45
Figura 28. Modelo de gestión de materiales.....	46
Figura 29. Política de intervalo constante: tiempo de reemplazo óptimo.....	48

## RESUMEN

Este proyecto surge a partir de los cambios que ha experimentado el mantenimiento con los nuevos estándares de calidad que se han venido aplicando, surgiendo la necesidad de enfocar el mantenimiento en aspectos como el ciclo de vida y la gestión de activos los cuales plantean la necesidad de obtener un equilibrio entre rendimiento, riesgo y costo del activo, es decir, este nuevo enfoque sugiere pautas acordes a las necesidades y exigencias actuales a nivel mundial.

Para entender a mayor profundidad las necesidades mencionadas y la manera de enfrentarlas; el documento se desglosa en 7 capítulos, en donde se desarrollan temas como la gestión de activos y ciclo de vida, la PAS 55 e ISO 55000, Confiabilidad, Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, Análisis de modos de falla y sus efectos y Optimización. Con estos temas se busca que el lector aclare las necesidades actuales de la industria y la forma de solucionar y enfocar el mantenimiento independientemente de la empresa y sector en el que se encuentre.

## ABSTRACT

This project arises from the changes that maintenance has undergone with the new quality standards that have been applied, arising the need to focus the maintenance on aspects such as life cycle and the management of assets which raise the necessity to obtain a balance between performance, risk and cost of the asset, ergo, this new approach suggests guidelines according to the current needs and requirements at the global level.

To completely understand the needs mentioned and the way to face them; The document is wrote down into 7 chapters, where topics such as asset management and life cycle, PAS 55 and ISO 55000, Reliability, Reliability Centered Maintenance, Failure Mode Analysis and their effects, and Optimization are developed. With these topics, the reader is expected to clarify and undertand the current needs of the industry and how to solve issues and focus maintenance independently of the company and sector in which it is.

# PARTE I. INTRODUCCIÓN

## 1. DEFINICIÓN

Actualmente el enfoque que se tenía de mantenimiento ha cambiado, debido a los estándares de calidad que se han impuesto en la industria, ya que cada día se debe garantizar un óptimo funcionamiento de los activos para lograr una continua producción. Debido a esto surge la necesidad de llevar el mantenimiento a un enfoque diferente, pues anteriormente se reducía al mantenimiento correctivo, preventivo y predictivo. Hoy día, se habla de ciclo de vida y gestión de activos, que plantean la necesidad de obtener un equilibrio entre rendimiento, riesgo y costo del activo, es decir, este nuevo enfoque sugiere pautas acordes a las necesidades y exigencias actuales a nivel mundial [1].

En el caso Colombiano, el mantenimiento sigue siendo un sector problemático, por falta de tecnificación y formación de personal, además de los recursos limitados para el mantenimiento. Aunque en los últimos años se ha visto un avance en los sistemas de calidad y una mejor percepción sobre lo que representa la cultura del mantenimiento, aún hay gran presencia de falencias cuando se trata de hablar de gestión de activos y ciclo de vida en las empresas [2].

A nivel nacional y regional el problema se empieza a mostrar desde las bases educativas, donde todavía en algunas universidades y en particular para la Universidad Tecnológica de Pereira, en el programa de Ingeniería Eléctrica, la asignatura denominada Mantenimiento Eléctrico no está enfocada en el ciclo de vida y la gestión de activos, sino en la manera como anteriormente se visualizaba el mantenimiento.

Se puede hablar de la existencia de metodologías para detectar fallos en el desarrollo de alguna actividad de producción, Por ejemplo: árbol de fallos para análisis de riesgo, estudio de confiabilidad para análisis probabilidad de vida, las cadenas de Markov para análisis de esperanza de vida, etc. [3]. Las anteriores metodologías son comunes en las estrategias de mantenimiento y ya se han incorporado en la asignatura de mantenimiento de nuestra universidad, pero persiste el problema de relacionar estas metodologías con el ciclo de vida y la gestión de activos, ya que desde la academia y la industria se han evaluado por separado.

Por tal motivo, con el presente trabajo se desea buscar dar respuesta a la pregunta de cómo se deben relacionar el ciclo de vida y la gestión de activos con las diferentes metodologías y estrategias de análisis existentes en mantenimiento.

## 2. PLANTEAMIENTO

En general, la industria se está enfrentando a nuevos retos, y las exigencias del mercado están llevando a que las fallas en los procesos tiendan a ser nulas [4]. Por tal razón las áreas de mantenimiento deben estar a la vanguardia de los nuevos procesos y estrategias.

Hoy día el tema de la modernización del mantenimiento ha tomado fuerza a nivel mundial, y la numerosa documentación enfocada a este, ha demostrado que a través de la gestión de activos el mantenimiento se convierte no solo en la vida útil del equipo, si no en un esquema que involucra su ciclo de vida que contempla desde la necesidad de conseguir al activo hasta que se vuelve obsoleto [5].

El ciclo de vida está conformado por un conjunto de fases que incluyen la planificación, la instalación, el mantenimiento y la eliminación del activo. Adicionalmente se tiene que la gestión de activos es el equilibrio entre rendimiento, riesgo y costo para alcanzar una solución óptima [1]. Estos dos conceptos tienen una visión más amplia del activo desde la planificación, uso y deshecho, dando respuesta a las necesidades de la industria, que demanda producción más confiable, por tanto se necesitan técnicas que efectivamente aumenten la confiabilidad, es decir que relacionen el mantenimiento convencional con el ciclo de vida y la gestión de activos [6].

Todos los activos son poco fiables (poca confianza) en el sentido de que pueden llegar a fallar. Una falla puede ocurrir temprano en el tiempo de vida útil del objeto debido a defectos en el proceso de manufacturación o tarde debido a la degradación, esto depende del tiempo uso y de las buenas prácticas de manipulación que se tengan con los dispositivos [7].

Un sistema puede estar en dos estados: operando o en falla; y cuando falla debe ser reemplazado o reparado inmediatamente. Pero considerando que el mantenimiento de un sistema después de que falle puede ser muy costoso y quedar por un largo tiempo inoperativo es necesario determinar el tiempo prudente para hacer mantenimiento al sistema antes de que presente daños que puedan interrumpir los procesos de producción [7].

Generalmente el mantenimiento se divide en tres tipos: preventivo, correctivo y predictivo. El mantenimiento preventivo se realiza en intervalos predeterminados o de acuerdo a criterios prescritos y con el fin de reducir la probabilidad de falla o la degradación de la funcionalidad del ítem, caso contrario se presenta con el mantenimiento correctivo, pues se realiza luego del reconocimiento de una falla y con el fin de llevar el ítem a un estado en el cual pueda realizar una función requerida, mientras que el mantenimiento predictivo es basado en la condición que se efectúa realizando pronósticos derivado del análisis y la evaluación de los parámetros significativos de la degradación de un ítem [8].

Como se observa, cada tipo de mantenimiento actúa de forma independiente, desde la parte técnica como de la parte administrativa y esto trae como consecuencia que al desarrollar cualquier tipo de mantenimiento en donde se determine el cambio de alguna pieza, o donde incluya una nueva inversión, se esté sujeto a decisiones

administrativas para aprobar o no el costo de la nueva pieza o activo, ocasionando que los tiempos de reparación sean más largos. Es por ello que se hace indispensable que las empresas tengan una visión clara y precisa de lo que pretenden hacer con los activos adquiridos, para trabajar de una manera conjunta, basados en la estrategia y función de cada activo, sin olvidar el capital de la empresa, esta metodología es llamada gestión de activos, donde se incluye de manera directa el ciclo de vida.

Con base en lo expuesto, y apoyados en literatura relacionada con mantenimiento, con el presente trabajo se pretende relacionar la normatividad existente con relación a la gestión de activos y ciclo de vida de los mismos (como es el caso de las normas ISO 55000, PAS55, UNE EN 13306) con las metodologías tradicionales de análisis como son: árbol de fallos, mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) [9], gestión de proyectos, etc. Y de esta manera permitir tener una visión amplia de cómo se planifican los activos para utilizarlos, mantenerlos y en última instancia eliminarse [6].

Entre las normas mencionadas anteriormente se encuentra la norma ISO 55000, la cual asegura que los objetivos, en cuanto al desempeño de sus activos, serán alcanzados consistente y sosteniblemente en el tiempo, ofreciendo los métodos de control. Por tal razón es muy importante que las empresas al aplicar un sistema de gestión de activos, lo hagan bajo dicha norma [10].

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. OBJETIVO GENERAL**

Establecer una metodología que correlacione las técnicas de análisis en confiabilidad y mantenimiento con los ciclos de vida y la gestión de activos, tomando como base la norma ISO 55000.

#### **3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Indagar el estado del arte sobre las técnicas existentes para la gestión del mantenimiento de activos y la confiabilidad, especialmente enfocado en la industria.
- Presentar en qué consiste el estudio y análisis del ciclo de vida de un activo, involucrando etapas como: la planificación, diseño, comisionado, mantenimiento, optimización y disposición final.
- Introducir las diferentes norma internacionales para la gestión de activos y los ciclos de vida de los mismos, especialmente la ISO 55000.
- Proponer una metodología que permita correlacionar las técnicas de análisis en confiabilidad y gestión del mantenimiento con los ciclos de vida y gestión de activos.

## PARTE II. MARCO TEÓRICO

### 4. GESTIÓN DE ACTIVOS Y CICLO DE VIDA

#### 4.1. CICLO DE VIDA

Para lograr administrar de manera óptima y sostenible los activos que se adquieren es necesario hacer una planeación eficiente desde el momento de la obtención del mismo, para este propósito se debe contar con un plan estratégico que garantice el buen desempeño del activo durante su vida útil, es decir la gestión de activos, que no es más que un modelo sistemático y organizado que planea cada paso a seguir desde el momento en que se adquiere hasta su disposición o reemplazo.

La gestión de activos es un proceso de gestión global a través del cual se pueden tomar y ejecutar decisiones acerca del valor, el uso y cuidado de los bienes adquiridos el cual ha tomado cada vez más relevancia en las áreas de mantenimiento, revolucionando la dinámica en la industria, pues intenta optimizar los recursos, desde su adquisición hasta su disposición final.

Una adecuada gestión de activos permite varios beneficios a la empresa o entidad donde se aplique, como asegurar el retorno de la inversión, optimizar el uso de la capacidad instalada, incrementar su vida útil, optimizar los costos y maximizar el conocimiento de la organización alrededor de sus activos [11].

La gestión de activos tiene como propósito identificar, desarrollar o mejorar los procesos de negocio que se encuentran en todas las unidades de una empresa, además de identificar las áreas de negocio críticos que puedan aportar valor e ilustrar las posibilidades de éxito [12], es por esto, que maneja todo un ciclo para el activo, es decir se realiza todo un plan que va desde la adquisición del activo hasta su cambio o reparación. El modelo representado en la figura 1, es lo que se desea lograr al implementar este método, ya que reúne la parte administrativa, técnica y operativa de una empresa, para así lograr que haya un método eficaz para asegurar el máximo retorno del capital invertido.



Figura 1. Gestión de activos.

## 4.2. GESTIÓN DE ACTIVOS

Se habla de gestión de activos como toda una operación conjunta desde que se planea conseguir el bien hasta que se decide desechar o hacer algún tipo de disposición final del mismo. Anteriormente, se realizaban actividades separadas para la utilización de los activos, es decir, de la compra de los activos estaba encargada un área específica de la empresa, el mantenimiento por otro sector y la financiación y disposición final de los activos por otras áreas, esto provocaba o provoca todavía, no tener una visión completa de todo el ciclo de vida, lo que puede llevar a tener pérdidas económicas por poca comunicación entre las áreas. Por eso el ciclo de vida trae beneficios a la gestión de activos porque plantea criterios más rigurosos en la utilización de los bienes y hace en conjunto con la gestión de activos como se deben de planificar, utilizar, mantener y por último eliminarse un activo.



Figura 2. Ciclo de vida.

La figura 2, establece una estrategia para el uso y adquisición de los activos. A continuación se desglosa la figura 2.

### ❖ Estrategia de activos

Se debe establecer una estrategia de activos acorde a las necesidades de la organización a la que se le realizará el estudio, la cual consiste en una secuencia de actividades que pueden incluir la evaluación de las prácticas de gestión de activos, el desarrollo de una estrategia global de gestión de activos, y el desarrollo de un programa de medición con indicadores claves de rendimiento (KPI's).

### ❖ Planificación

Esta etapa define las políticas, las normas y los objetivos que se deben abarcar durante la aplicación del modelo de gestión de activos.

Inicialmente los objetivos son definidos como cuantificables, en otras palabras se implementa la estrategia bajo el enfoque de rendimiento sostenible, comunicación efectiva a los ejecutantes y consecución de mejoras a corto, medio y largo plazo. Esta fase es factible sólo si es complementada por las áreas de Gestión de Activos, Gestión de Proyectos, Capital Intangible entre otras áreas importantes, lo que le permite ser integral y alineada a los objetivos de la empresa [13].

#### ❖ **Evaluación y diseño**

Si el activo es comprado se debe evaluar, pero si necesita ser creado se debe diseñar. Mediante la integración de los planes de diseño de activos con el ciclo de vida del producto, las entidades serán capaces de comprender mejor su infraestructura en lo que respecta a la rentabilidad global del producto, así como para asegurar que las actividades de gestión de activos soporten los marcos de tiempo del lanzamiento del producto.

Si se desea diseñar un nuevo sistema de organización en producción y mantenimiento; antes se debe evaluar el sistema ya existente. Esta evaluación inicialmente debe guardar relación con aspectos de los costos de mantenimiento, la disponibilidad de los activos, tecnología de la información y del mantenimiento, recursos humanos, la organización del mantenimiento y soporte al mantenimiento [13].

#### ❖ **Crear y Procurar**

Esta fase consiste en la creación, la construcción o la adquisición de los activos previstos. Esta etapa es una de las que tiene mayor impacto, debido a que involucra una parte significativa de dinero gastado en gestión de activos. Las nuevas prácticas en esta área incluyen la gestión de capital del proyecto, automatización y materiales informatizados de optimización de recursos, así como nuevas estrategias de adquisición y entrega de proyectos.

#### ❖ **Operar**

En la operación de los activos es donde el rendimiento se ve más afectado. En esta fase se incluye el manejo formal de la gestión de activos, estrategias para rendimiento del activo y soluciones totales de visibilidad de activos. Los datos de operación tomados en esta etapa podrán ser utilizados en la planificación de nuevas adquisiciones de activos. En resumen, aquí deben operar los activos de acuerdo con la estrategia, utilizando las normas, políticas y procedimientos de retroalimentación en todo el ciclo de vida.

#### ❖ **Mantener**

Consiste en conservar los activos apoyando la estrategia y objetivos, a través del uso de normas, políticas y procedimientos de la gestión de activos. Los costos del mantenimiento pueden alterar enormemente el costo total del activo teniendo en

cuenta los costos de reparación o el tiempo de inactividad; es por esto que las nuevas prácticas en esta área incluyen la realización de talleres de mejora de procesos con personal multidisciplinario y la implementación de sistemas de software especializado, que permiten a los administradores controlar y administrar los activos en toda la empresa, con monitoreo centralizado. El mantenimiento predictivo se convierte también en una importante herramienta, pues basado en la comprensión del pasado (a través de las bases de datos de fallos y otras herramientas de seguimiento) permiten pronosticar su comportamiento y actuar oportunamente para prevenir reparaciones o inactividad. Otra importante herramienta que se puede implementar en esta etapa es el mantenimiento productivo total, que es una metodología para gestionar el mantenimiento y mejorar el tiempo de actividad y la confiabilidad de los activos críticos.

Actualmente la rentabilidad y el crecimiento de una compañía son profundamente influenciadas por las decisiones en las compras, por lo que el área de mantenimiento deberá apoyar estas decisiones a través de:

- **Información para toma de mejores decisiones:** Básicamente se trata de contar con información del diseñador o al fabricante del equipo, en aspectos como calidad, facilidad de adquisición de repuestos, asistencia técnica, y actualización tecnológica [14].
- **Colocar en la mira las decisiones estratégicas:** Los criterios de decisión de compras deben estar basados en aspectos como consumo de energía, stock de repuestos, tiempo de operación, facilidad de mantenimiento, capacitación de personal y vida residual [14].
- **Acompañamiento:** El seguimiento de los activos permite a las compañías aumentar la eficiencia operacional y contar con herramientas para reducir costos.
- **Localización y uso de los activos:** Se debe crear una base que permita identificar los ítems que se desean controlar, en donde se debe indicar, entre otros su finalidad, función, localización, áreas de competencia, referencias, fechas, costos y demás variables medibles de interés [14].

En esta fase entrar los distintos tipos de mantenimiento, los que se trataran en capítulos posteriores.

#### ❖ **Modificar**

Se deben modificar los activos cuando sea necesario. Asegurar que las modificaciones se reflejan en la estrategia, las políticas y procedimientos u otros aspectos. Muchas empresas están implementando estrategias que faciliten la modificación constante de los sistemas, tales como las arquitecturas orientadas a servicios. Otras prácticas incluyen el ciclo de vida total de costos y análisis de mejora del rendimiento. La modificación también puede ser fundamental para la extensión de

la vida de los activos, remodelación de las máquinas, instalaciones reutilizadas, y tecnología adaptada para facilitar los procesos nuevos.

### ❖ **Disposición final**

Esta fase consiste en la eliminación, retiro, liquidación o reutilización de los activos de acuerdo con la estrategia, políticas y procedimientos definidos. La evacuación también puede tener importantes implicaciones financieras más allá de reemplazo. Algunas iniciativas ofrecen soluciones globales de recuperación de activos y se centran en la restauración de piezas utilizables de los equipos dispuestos para reducir al mínimo los costes de su eliminación. En lugar de descartar, el activo podría venderse, y si se cuenta con la información exacta y confiable sobre este, se puede establecer fácilmente su valor de reventa, además si se conoce el valor residual de un equipo y su conservación; se puede definir el mejor momento para su cambio o reforma. Estableciendo el valor residual, no solo se puede llegar a conocer el precio de venta sino el costo que implica su salida de servicio. Si el equipo ha sido bien mantenido; con su venta se puede cubrir parte del costo de reposición o del desarrollo de nuevas tecnologías para el proceso.

Es importante resaltar que una nueva tendencia impulsada por la ola verde son las prácticas como la gestión sostenible de las instalaciones, la eliminación adecuada de activos, la reducción de la huella de carbono en las plantas de fabricación, y la reducción de las emisiones de carbono, convirtiéndose rápidamente en requisitos que el gestor de activos debe tener en cuenta. La manera como se eliminan los activos será sólo el comienzo de esta tendencia, ya que las prácticas verdes tendrán que moverse en todas las etapas del ciclo de vida total de los activos.

Con el fin de garantizar una adecuada gestión del activo en este y otros aspectos, se deben obtener ciertos parámetros los cuales servirán para la toma de decisiones en función de la situación de la empresa en el mercado. Algunos se destacan por la posibilidad de aplicación de sus resultados en la mejora del proceso, en la reducción de costos, en la mejora de calidad, en la preservación del medio ambiente y en la optimización de servicios. Algunos de estos parámetros son: Tiempo promedio entre fallas, Tiempo promedio para reparación, disponibilidad de equipos y Confiabilidad. En capítulos posteriores se explicará en detalles cada uno de estos.

### ❖ **Gestión Financiera**

Esta es la etapa en donde se administran y reportan los costos, las fuentes de financiación, disponibilidad de fondos, presupuestos, y el retorno de la inversión para los activos. Esta etapa del proceso involucra todas las fases del ciclo de vida del activo, logrando asegurar el cumplimiento de los objetivos y estrategias planteadas. Cada una de las fases afecta el rendimiento financiero y los requisitos de planificación. Generalmente es posible identificar dos estados financieros; el consciente y el capaz. El estado consciente, requiere la existencia de los procesos de información financiera y la infraestructura de apoyo de manera que los grupos y las personas encargadas de las responsabilidades financieras y contables pueden tener acceso a todos los datos

pertinentes, los costos de mantenimiento y los costos de reemplazo. Por el contrario, el estado “capaz”, requiere que las políticas de gestión financiera sean parte explícita de todos los procesos de gestión de activos y que los incidentes y cambios desencadenen efectos de informes financieros sin intervención adicional.

En conclusión, la gestión financiera asegura que los activos en servicio estén inventariados, y sean apropiadamente depreciados o eliminados de los libros cuando sean retirados, además vela por prácticas de mantenimiento preventivo que minimicen costos, para dar manejo prudente a los gastos de mantenimiento y operaciones y así, minimizar el impacto de sobrecostos en el cliente.

### ❖ **Tecnología**

En este caso, la tecnología es una herramienta de gestión de activo, no el propio activo (aunque el sistema de gestión de activos es de hecho un activo). La tecnología puede transformar la forma en que cada una de estas fases está prevista. El seguimiento y la medición de los activos se hacen a menudo en tiempo real, para ayudar a las acciones de reparación, para las decisiones de compra y el reemplazo rápido, y para supervisar el rendimiento. La tecnología también se utiliza para integrar el equipo con otros sistemas claves, tales como contabilidad, compras y gestión del rendimiento empresarial.

Operativamente, este marco debe ser formalizado y programático dentro de la organización. Esto significa aplicar un enfoque TLAM a los sistemas de gestión de activos, la integración del enfoque en los esfuerzos de planificación y estrategia, y utilizando el marco para establecer el seguimiento y métricas para medir el éxito y el rendimiento.

### **4.3. COSTOS DEL CICLO DE VIDA**

Los costos de ciclo de vida permiten establecer cuál es la vida remanente del activo desde el punto de vista técnico y económico, indicando el momento oportuno para el reemplazo de equipos y comparando diferentes opciones de disposición final. En este sentido se toma en consideración los costos totales de vida de los activos incluyendo el manejo del riesgo en términos financieros.

En la etapa inicial del activo se deben considerar los costos conocidos como CapEX (Capital Expenditures), los cuales son costos asociados a la investigación, desarrollo, adquisición y construcción de un sistema, es decir la inversión inicial necesaria para obtenerlo. El CapEX es la cantidad de capital que se gasta para adquirir o mejorar los activos productivos con el fin de aumentar la capacidad o eficiencia de una empresa. En términos de contabilidad, un gasto se considera como CAPEX cuando el activo o la inversión realizada mejora la capacidad productiva o aumenta la vida útil de un activo productivo ya existente. Se refiere así a un gasto que será capitalizado en el activo, y será distribuido durante la vida útil del activo mediante su amortización [15].

Adicionalmente se tiene el OpEX (Operational Expenditure), que se refiere a los costos permanentes para el funcionamiento de un activo. (Operación, mantenimiento,

modificación, disposición final). El OPEX (Operating Expenses), es un costo continuo para el funcionamiento de un producto, negocio o sistema. Su contraparte, un gasto de capital (CAPEX), es el costo de desarrollar o proveer partes no consumibles para el producto o sistema. La figura 3, es la explicación gráfica del comportamiento del costo del ciclo de vida con el modelo CapEX y OpEX.

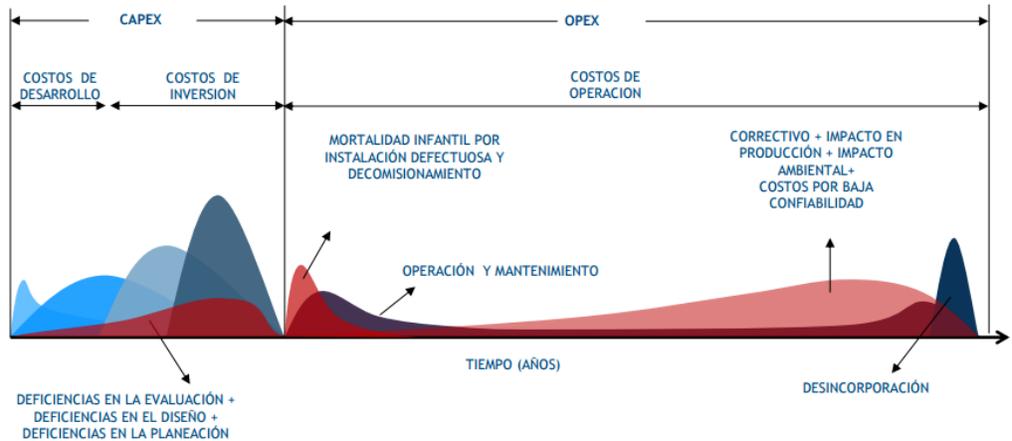


Figura 3. CapEX y OpEX [16]

Estos costos no son independientes, pues los costos del futuro y los beneficios de la operación son influenciados por los costos y desempeño logrados en el pasado. Así, entonces se debe considerar el impacto de las acciones y decisiones tomadas hoy en el futuro de los activos.

Cuando se desean analizar los costos del ciclo de vida, se debe buscar que estos sean lo más óptimos posible, por lo tanto, se debe implementar un método que permita conseguir la mejor relación de objetivos en conflicto. Estos objetivos en conflicto normalmente se dan cuando un sector o área de la empresa debe gastar dinero y la beneficiada es otra área, y se da en casi todas las decisiones de gestión de activos. Estos conflictos surgen al comparar el costo de hacer (acciones preventivas) con las consecuencias o el riesgo de no hacer. La figura 4, esquematiza el punto óptimo del ciclo de vida respecto a la exposición al riesgo y las acciones preventivas.

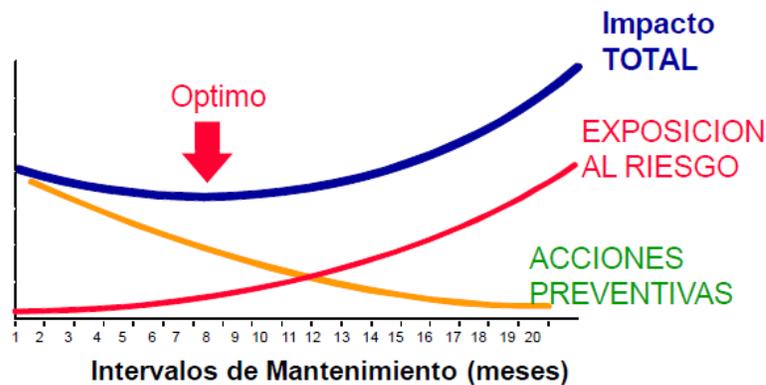


Figura 4. Mantenimiento óptimo [17].

## **5. PAS 55 e ISO55000**

A partir de la necesidad de mejorar los estándares de calidad y el nivel de competitividad de las empresas, en los años 90 aparece la gestión de activos como un concepto implementado en la producción petrolera que desde un principio les genera diversos beneficios. A partir de esto, se genera una gran variedad de interpretaciones posibles de la gestión de activos, de manera transversal, pasando por diferentes áreas como las finanzas, la informática, el mantenimiento entre otros.

Ante este panorama, surge la necesidad de generar una norma estándar en Gestión de Activos, y es así como desde un comité de expertos internacionales del British Standard Institute (BSi) se genera en el año 2002 la BSi PAS 55 ASSET MANAGEMENT, y posteriormente un sistema de certificación en el 2006. Fue tanto su aceptación que llegó a ser de índole obligatoria en los segmentos de energía y gas en el Reino Unido. En el año 2008 surge una nueva versión y posteriormente se publica en español en el 2009.

La ISO 55000 es la evolución de las especificaciones BSi PAS 55 y es el presente y futuro de la gestión de activos. Nace en el año 2008 debido a la gran aceptación de PAS 55 y busca considerar una forma más sistémica de hacer todo lo que se había venido haciendo hasta ese momento. En el año 2010 el comité técnico de ISO decide la creación de un Estándar Internacional para la gestión de activos basado en el documento de la PAS55.

La ISO 55000 y la PAS 55 proporcionan “la combinación óptima de los costos, los riesgos relacionados con los activos, el rendimiento y la situación de los activos y sistemas de activos a través de todo el ciclo de vida [18].”

### **5.1. PAS 55**

La PAS 55 es una norma británica que da las pautas tendientes a lograr una Gestión óptima de Activos físicos, proporcionando definiciones claras y especificando 28 requerimientos para establecer y auditar un sistema de gestión integrado y optimizado durante todo el ciclo de vida, para todo tipo de activo físico. La Gestión de Activos se define según PAS 55:2008 como “Conjunto de actividades y prácticas coordinadas y sistemáticas por medio de las cuales una organización maneja de manera óptima y sustentable sus activos y sistemas de activos, su desempeño, riesgo y gastos a lo largo de sus ciclos de vida, con el fin de lograr su plan estratégico organizacional”.

La optimización de gestión de activos afecta a todas las áreas de una empresa, por lo que La PAS 55 define qué es necesario hacer para la gestión óptima de activos, mas no cómo hay que hacerlo pues eso depende de cada caso en particular.

La BSi PAS 55 cubre todos los elementos de la gestión de activos en las diferentes etapas del ciclo de vida, por lo que su implementación en los procesos de mantenimiento al interior de las organizaciones es de gran interés, debido además a que cuenta con unos requerimientos claros y precisos en términos de gestión de riesgos, ciclos de vida, costos y desempeño de una manera óptima y porque establece un sistema sencillo de auditoría de cumplimiento y una evaluación comparativa interna

al generar una lista de requisitos que se deben cumplir en términos de optimización del manejo de ciclo de vida, costos, riesgos, información, etc., [18].

### **5.1.1. Metodología para evaluar el sistema de gestión de activos según PAS 55**

La PAS 55 logra especificar y controlar las prácticas requeridas para el debido cumplimiento de los planes organizacionales que generalmente están basados en el círculo de la calidad (Planificar, Hacer, Verificar y Actuar). Esta norma, convierte las políticas, estrategias, objetivos y finalmente planes en acciones específicas sobre las personas con las competencias, responsabilidades y autoridades requeridas [16].

Se puede evidenciar que de esta manera el sistema de gestión es un componente importante para garantizar que los principios de planificación total del ciclo de vida, gestión de riesgo, costo-beneficio, enfoque al cliente, sustentabilidad entre otros, sean realmente implementados durante la ejecución de proyectos de capital, operaciones, mantenimiento, y otros procesos que requieran un sistema de gestión de activos.

La PAS 55 responde claramente las siguientes 4 preguntas:

¿Qué se debe hacer?, ¿Cuándo se debe hacer?, ¿Cómo se debe hacer?, ¿Quién lo debe hacer?

Es importante aclarar que el estándar PAS 55 define buenas prácticas, no mejores prácticas, por último la PAS 55 es independiente del sector industrial, del tipo de activos y de la estructura de propiedad y no importa el tipo de activos, su ubicación o edad, lo que cuenta son los objetivos organizacionales y una buena alineación de objetivos sustentables de inversión, uso y mantenimiento para lograr las metas.

### **5.1.2. Principios claves y características de la gestión de activos bajo la PAS 55**

**Holístico:** el sistema debe ser multidisciplinario y enfocarse en todos los puntos de vista y valores [18].

**Sistemático:** debe aplicarse de manera rigurosa en un sistema de gestión estructurado. Los activos deben cuidarse desde un punto de vista global, observando todos los elementos que agregan o restan valor y no con visiones particulares [18].

**Basado en riesgo:** la evaluación de riesgos debe estar presente en todas las tomas de decisiones y planes.

**Óptimo:** métodos claros para obtener el mejor beneficio para la organización ante objetivos en conflicto. Según LA PAS 55 la optimización es lograr por medio de un método cuantitativo o cualitativo, según sea apropiado, la relación que proporcione el mejor valor entre los factores en conflicto tales como el desempeño, costos y riesgo admitido dentro de cualquier restricción no negociable [17].

En otras palabras se debe conseguir un método permita conseguir la mejor relación de objetivos en conflicto, estos objetivos en conflicto normalmente residen cuando un sector o área de la empresa debe gastar dinero y la beneficiada es normalmente otra área, y esto es común en casi todas las decisiones de gestión de activos, estos

conflictos surgen de la comparación del Costo de Hacer (acciones preventivas) con las consecuencias o el Riesgo de No Hacer [18].

**Sustentable:** la gestión debe cubrir el ciclo de vida total de los activo desde el diseño a la desincorporación, considerando la edad de los mismos, el deterioro con el tiempo, opciones de renovación, mejoramiento, etc.

**Integrado:** se deben integrar los intereses y obligaciones de todas las partes que juegan un papel en la gestión de los activos, esto cubre desde accionistas, trabajadores, clientes, reguladores, etc.

Además, en la gestión de activos hay diferentes niveles en los que los activos pueden ser identificados y gestionados, esta jerarquía plantea desafíos y oportunidades a diferentes niveles. En la figura 5, se observan los niveles bajo un sistema integrado de gestión de activos.



Figura 5. Niveles de gestión de activos [17].

### 5.1.3. Estructura de la PAS 55

Un sistema de gestión de activos está diseñado principalmente para apoyar la entrega de un plan estratégico con el fin de satisfacer las expectativas de los interesados. El plan estratégico de las empresas es el punto de partida para el desarrollo de políticas, estrategias, objetivos y planes de gestión de activos. La PAS 55 está estructurada como las diferentes normas ISO, es decir está basada en los círculos de mejora continua (planificar, verificar, hacer y actuar). En la figura 6 se muestran los pilares para dar satisfacción a dicho círculo, además, la figura destaca la importancia del monitoreo y las mejoras continuas dentro del sistema de administración de activos.

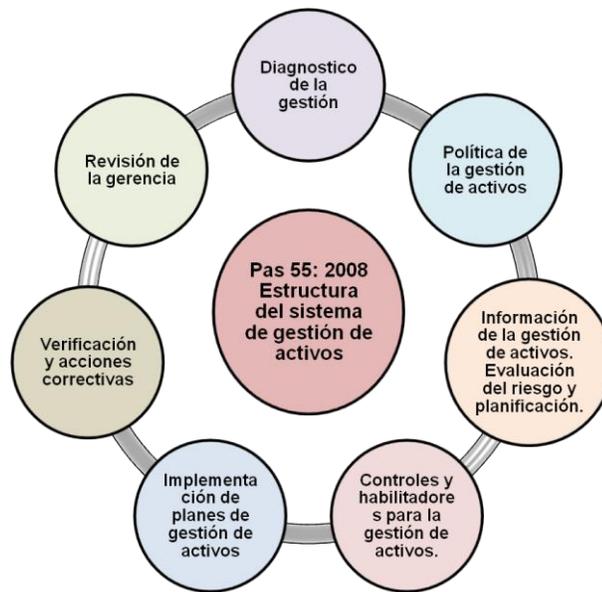


Figura 6. Estructura del sistema de gestión de activos.

Descripción de los pilares de la gestión de activos:

- ❖ **Diagnóstico de Gestión:** Define el nivel actual de madurez de la organización y cuáles son sus prácticas en la gestión de activos de ésta. También permite fijar la filosofía y misión de la empresa o unidad de negocio para evaluar el estado actual de los activos.
- ❖ **Políticas y Estrategias:** Establece objetivos a corto y largo plazo para lograr la misión de la empresa, que define las actividades de negocios presentes y futuras de una organización.
- ❖ **Información de la Gestión de Activos:** Formula diversas estrategias posibles para elegir la que será más adecuada para conseguir los objetivos establecidos en la misión de la empresa, desarrollando una estructura organizativa para conseguir la estrategia.
- ❖ **Implementación y operación:** Asegura las actividades necesarias para lograr que la estrategia se cumpla con efectividad.
- ❖ **Verificación y Acciones correctivas:** Evaluar y tomar las acciones necesarias corregir o controlar la eficacia de la estrategia para conseguir los objetivos de la organización [19].

#### 5.1.4. Implementación de la PAS 55

Para iniciar con la implementación de la gestión de activos según la PAS 55, se debe realizar inicialmente un diagnóstico con un equipo de trabajo multidisciplinario que defina la organización a realizar la ejecución de la norma. Con este diagnóstico se pretende identificar las áreas a fortalecer en corto, medio y largo plazo, esto bajo una metodología de evaluación denominada 3P (People, Process and People) que identifica y analiza las oportunidades de mejora en las 5 áreas claves de la gestión integral de activos físicos (recursos del mantenimiento y operaciones, tecnología de la Información, Mantenimiento Preventivo y Tecnología, Planificación y Programación, y Soporte al mantenimiento y Operaciones). Dicha metodología organiza por niveles de madurez los procesos que se llevan a cabo en las empresas acerca de la gestión de activos a través de las especificaciones de la PAS 55, dichos niveles de madurez están alineados con los principios del manual internacional de gestión de infraestructuras IIMM (International Infrastructure Management Manual) como se muestra en la figura 7.



Figura 7. Niveles de madurez alineados IIMM [19]

#### Descripción de los niveles de madurez:

- **Nivel cero:** Los elementos requeridos por la PAS 55 no están presentes, se está en proceso de desarrollo y estudio de la PAS 55. Es decir los procedimientos básicos no están documentados, no están los roles definidos, no hay orden de cobertura de la información, no hay capacidad de gestionar a los proveedores, entre otros elementos importantes.
- **Nivel uno:** Se tiene un conocimiento básico sobre los requerimientos de la PAS 55. La empresa u organización se encuentra en un momento de decisión sobre los factores que van y han comenzado a aplicar de la PAS 55. Es decir, es una etapa de decisión de los elementos de la normativa a emplear que serán implementados.
- **Nivel dos:** En este nivel se identifican los roles y responsabilidades, los procedimientos comienzan a ser documentados y definidos, hay cierto seguimiento de los activos mediante tecnologías de la información. La compañía tiene conocimiento amplio sobre la PAS 55 y toma decisiones de cómo aplicar los elementos de la norma y trabaja en la implementación de ellos.

- **Nivel tres:** Los elementos de la PAS 55 se encuentran integrados y aplicados en la compañía a excepción de algunas pequeñas inconsistencias. Los procedimientos están documentados y definidos de forma consecuente con los objetivos de la empresa.
- **Nivel cuatro:** Los procedimientos y aplicaciones se encuentran por encima de los requerimientos de la PAS 55. Hay incentivos sobre desarrollo de limitaciones de la gestión de activos con nuevas ideas, además la información es utilizada como apoyo para la toma de decisiones estratégicas, se emplean herramientas integradas con los sistemas empresariales y marco continuo para la gestión de activos. Esta etapa representa la capacidad de la compañía para crear, desarrollar e implementar nuevas ideas y conceptos en la gestión de activos [19].

Cada uno de los cinco niveles de madurez mencionados resume el camino hacia la búsqueda de la excelencia en cuanto a la gestión de activos. Estos niveles dan una amplia idea sobre los procesos actuales de las compañías y permiten identificar de manera clara las áreas a fortalecer en corto, medio y largo plazo, además, con esta metodología se identifican fortalezas y debilidades de las empresas lo que permite realizar un análisis de brechas existente según los requisitos de la PAS 55.

#### **5.1.5. Análisis de brechas existentes**

Las brechas de cumplimiento de requisitos de la PAS 55 se evalúan en términos de valor que puede agregar a una empresa, y los recursos requeridos para su implementación en términos económicos, humanos y financieros. Este análisis permite identificar diferentes sectores importantes dentro de los procesos de las empresas, tales como: eficiencia y efectividad, y estructuras que permitan planes de mejora de la capacidad de gestión de activos. Además permite hacer seguimiento de las mejoras en la capacidad de gestión de activos y poder comparar la capacidad de gestión de activos con otras compañías.

Se debe realizar una revisión que proporcione información que una organización pueda usar para identificar si hay alguna brecha existente en la gestión de activos que guiará a la entidad en la formulación de planes para implementar y priorizar las mejoras

## **5.2. ISO 55000**

ISO (Organización Internacional de Normalización) es una federación mundial de organismos nacionales de normalización. Esta Norma Internacional ofrece una visión general de los sistemas de gestión de activos y la cooperación internacional en la preparación de estas normas ha identificado prácticas comunes que pueden aplicarse a la más amplia gama de activos [20].

La norma ISO 55000, define a la gestión de activos como: “La coordinación de las actividades de una organización para crear valor a través de sus activos” [21]. Esta norma está dirigida principalmente a aquellos que están considerando cómo mejorar el desempeño de su organización desde su base de activos, para aquellos que participan en el establecimiento, implementación, mantenimiento y mejora de un sistema de gestión de activos y los que participan en la planificación, diseño, ejecución y revisión de las actividades de gestión de activos; junto con los proveedores de servicios. Además permite a las compañías alcanzar sus objetivos a través de la gestión eficaz y eficiente de sus activos.

Como se ha mencionado la gestión de activos es utilizada para dirigir, coordinar y controlar las actividades a realizar con los activos. Se puede proporcionar un mejor control de riesgos y asegurar que los objetivos se logren de manera consistente. Un sistema de gestión de activos es un conjunto de elementos que se relacionan e interactúan en una organización, cuya función es establecer la política, los objetivos y los procesos necesarios para alcanzar las metas propuestas. En este contexto, los elementos del sistema de gestión de activos deben ser vistos como un conjunto de herramientas, incluyendo políticas, planes, procesos de negocio e información para cumplir determinados objetivos, en la figura 8, se puede observar la relación entre algunos elementos claves para cumplir con ellos.

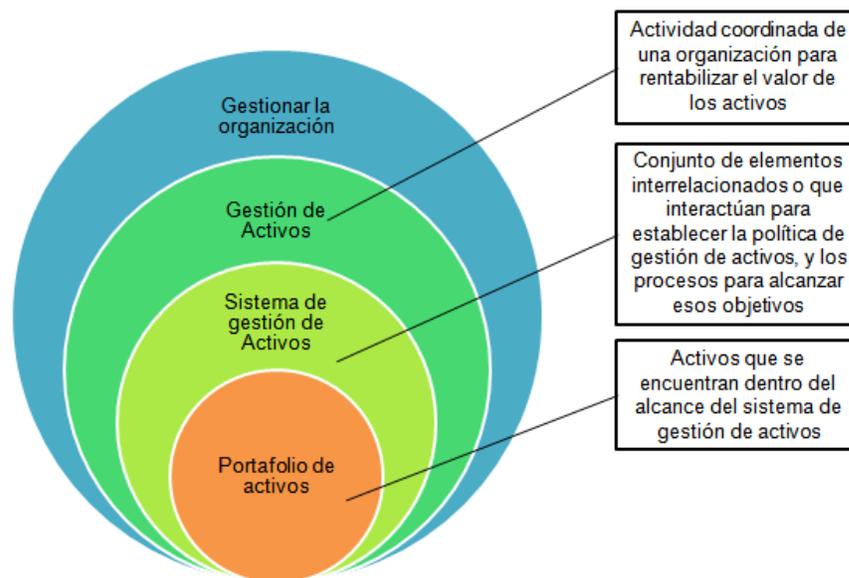


Figura 8. Relación entre los términos clave [20].

### 5.2.1. Evolución y alcance de la gestión de activos según la ISO 55000

Al establecer o revisar su sistema de gestión de activos, una empresa debe tener en cuenta sus contextos internos y externos. El contexto externo incluye los entornos sociales, culturales, económicos y físicos, así como las limitaciones regulatorias, financieras y de otro tipo. El contexto interno incluye la cultura organizacional y el medio ambiente, así como la misión, la visión y los valores de la organización.

Los insumos, preocupaciones y expectativas de las partes interesadas también forman parte del contexto de la empresa. Las influencias de las partes interesadas son fundamentales para establecer reglas para la toma de decisiones coherentes y también contribuyen al establecimiento de objetivos organizacionales que, a su vez, influyen en el diseño y alcance de su sistema de gestión de activos. En la figura 9 se puede observar de forma gráfica la evolución y alcance de la gestión de activos, donde se relaciona el tiempo de ejecución de las actividades con la confiabilidad.

La aplicación de un sistema de gestión de activos bajo los requerimientos establecidos en la ISO 55000 asegura que los objetivos se pueden lograr de manera consistente y sostenible a lo largo del tiempo, ofreciendo métodos de control pertinentes. La aplicación de esta norma como se puede apreciar en la figura 10, requiere un balance entre el costo, desempeño y riesgo a tomar con el fin de garantizar una buena gestión de los activos.



Figura 9. Evolución de la gestión de activos [15].



### 5.2.2. Estructura de la ISO 55000

Un sistema de gestión de activos afecta a toda la organización, incluyendo a sus partes interesadas y proveedores de servicios externos, y puede usar, vincular o integrar muchas de las actividades y funciones de una empresa, que de otro modo serían administradas u operadas aisladamente. El proceso de establecer un sistema de gestión de activos requiere un conocimiento profundo de cada uno de sus elementos y las políticas, planes y procedimientos que los integran. En la figura 11 se muestra la estructura que debe llevar la ISO 55000 cuando se desea aplicar de forma debida esta norma a las entidades.



Figura 11. Estructura de la ISO 55000.

La ISO 55000 contiene siete elementos fundamentales y de debido cumplimiento, los cuales se definen a continuación:

**Contexto de la organización:** El paso inicial en la implementación de la ISO 55000 es identificar y definir claramente los objetivos y requerimientos organizacionales de las partes interesadas. El primer paso es un elemento clave del estándar, ya que el sistema está diseñado de tal manera que todas las acciones deben centrarse en maximizar la probabilidad de que se cumplan estos objetivos.

**Planificación:** Este elemento es en el que la organización desarrolla un conjunto de objetivos de gestión de activos que se alinean con la estrategia de gestión de activos. Estos objetivos deben ser mensurables, monitoreados, comunicados y actualizados según sea necesario durante el ciclo de vida de los activos.

Un aspecto crucial de esta etapa es identificar y evaluar los riesgos para alcanzar los objetivos asociados con cada activo, y las medidas apropiadas de mitigación del riesgo que deban tomarse.

**Operación:** Este elemento representa la ejecución de los planes de gestión de activos. En este punto se requiere la evaluación o reevaluación de los riesgos asociados con los cambios, además en esta fase se define los requisitos para identificar, evaluar y gestionar los riesgos cuando las actividades son subcontratadas. Esto asegura que los recursos subcontratados cumplan los mismos requisitos fundamentales que los propios dentro de la organización.

**Evaluación del desempeño:** Define los requisitos para el monitoreo, la auditoría y la evaluación en curso del desempeño del activo, y el propio sistema de administración de activos. Se requieren descripciones específicas cuando se define la evaluación del desempeño, incluyendo qué, cómo y cuándo se evalúa el desempeño, así como la retención auditable de la documentación de evaluación. El cumplimiento general del sistema se evalúa mediante auditorías internas y revisiones periódicas de la gestión.

**Mejora:** Requiere que una organización identifique la no conformidad y la acción correctiva, y ejecute tales tareas para corregir estas áreas. Esto también incluye documentación apropiada, implementación y administración de un sistema para identificar, evaluar y actuar en las oportunidades preventivas y proactivas de mejorar, de manera que se pueda evitar el incumplimiento.

**Soporte:** Define los requisitos para el apoyo a toda la organización del sistema de gestión de activos. Esto incluye la provisión de recursos apropiados y la garantía de la competencia de esos recursos. También se definen los requisitos para desarrollar el conocimiento de la organización del sistema de gestión de activos y el papel de cada individuo, incluidos los requisitos para la comunicación. Se define la información necesaria para implementar y gestionar el sistema, así como la documentación necesaria para gestionar, verificar el cumplimiento y demostrar la eficacia del sistema.

**Liderazgo:** En este elemento, se define la forma en que el liderazgo de una organización apoya el sistema de gestión de activos. Esto incluye el patrocinio activo y la propiedad del sistema, el establecimiento de una política de gestión de activos y la asignación de roles, responsabilidades y autoridades para su gestión continua. La figura 12 representa el proceso de gestión de activos típico y cómo se alinean con él los siete elementos de la ISO 55000 anteriormente mencionados.

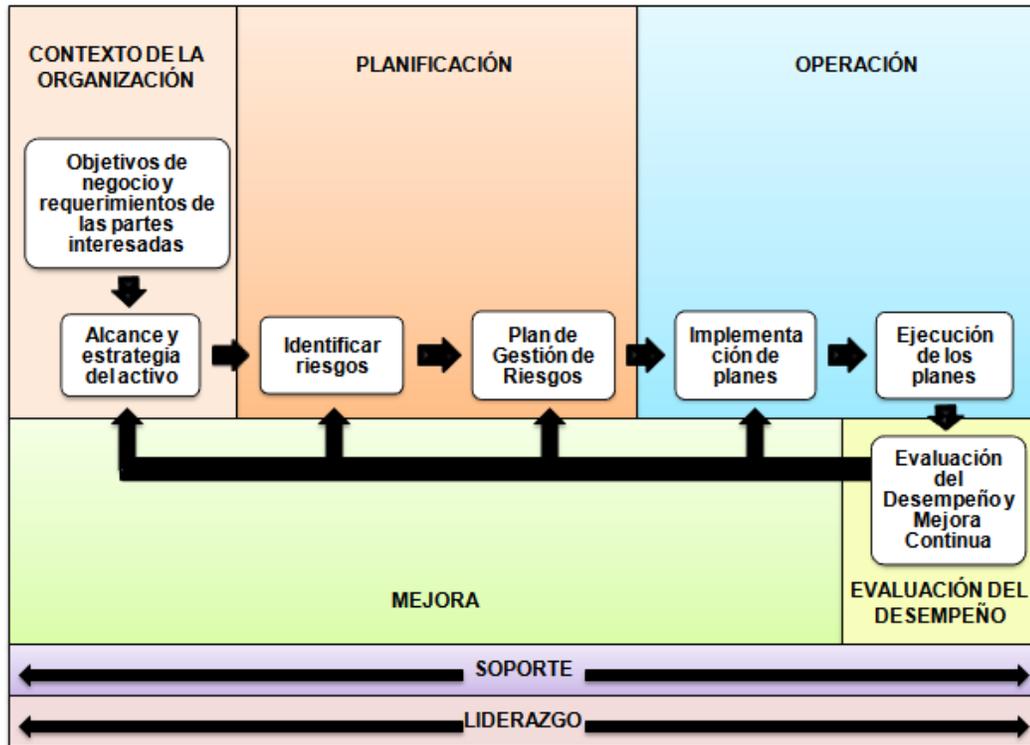


Figura 12. Elementos de la ISO 55000

## 6. CONFIABILIDAD

La confiabilidad de un elemento se define como "la frecuencia con la que se producen fallos durante un período de tiempo especificado", la confiabilidad se considera desde distintos puntos de vista, desde ciertos atributos de funcionalidad, componentes del diseño, requisitos operativos, criterios de diseño específicos, entre otros criterios. En resumen, la confiabilidad es la probabilidad de que un dispositivo realice adecuadamente sus funciones previstas a lo largo del tiempo respecto a las actividades que se le han asignado alrededor de su entorno de operación.

La confiabilidad se hace esencial para asegurar que los sistemas son capaces de funcionar a los niveles requeridos y especificados de desempeño, y para asegurar que se gastan menos recursos para alcanzar estos niveles de desempeño, es por esto, que el concepto de confiabilidad es cada vez más importante y determinante dentro de los procesos de una empresa.

De forma algebraica la confiabilidad se puede definir como:

$$R(t) = 1 - Q(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt$$

Para evaluar confiabilidad de los sistemas se tienen diferentes métodos entre los que está el análisis por probabilidad, análisis por árbol de fallos, teoría de redes, y modelo de espacio de estados.

## **6.1. ANÁLISIS POR PROBABILIDAD**

La probabilidad es una forma clásica de valorar la confiabilidad. Los resultados de este método corresponden en gran parte a promedios estadísticos o valores esperados que se denominan “índices de confiabilidad”.

### **6.1.1. Árbol de probabilidad**

Un árbol de probabilidad es una representación gráfica de eventos posibles en un sistema, este método parte desde un punto que representa el sistema, la representación gráfica también es denominada “árbol de eventos” porque cada evento se conecta a otros eventos como las ramas en un árbol.

El árbol de probabilidad se inicia desde determinada situación o evento; a partir de este punto, se desprenden posibles situaciones, las denominadas ramas del árbol, cada una de las ramas representa un sistema reducido que genera nuevos puntos desde los cuales parten ramas condicionales al sistema reducido hasta llegar a los resultados operativos para el sistema. Así, se parte de un evento y se llega a las situaciones operativas que resultan en el sistema. Los eventos se conectan entre sí, de acuerdo con la secuencia operativa que existe en el sistema.

Las probabilidades de los sucesos finales en el árbol de eventos se evalúan multiplicando las probabilidades en los diversos caminos que conforman las ramas del árbol, esto puede hacerse con los datos puntuales de probabilidad obteniendo una expresión booleana. Las probabilidades de los estados operativos de interés para el sistema se obtienen sumando las probabilidades de todos los caminos que llevan a dicha situación operativa.

En la figura 13 se ve el ejemplo del árbol de probabilidad, de la figura se puede observar el ejemplo con la posibilidad de colores a partir de la situación planteada o por funcionamiento a partir del evento.

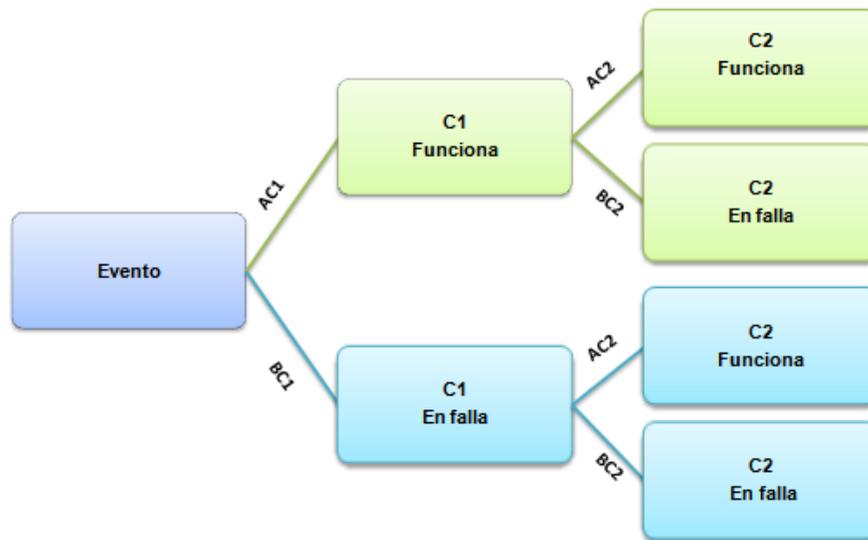


Figura 13. Ejemplo árbol de probabilidad.

### 6.1.2. Tiempo Medio Entre Fallos y Tiempo Medio Para Fallo

Estos tiempos están dados para equipos reparables y para no reparables, el tiempo medio entre fallos MTBF (mean time between failure), es la expresión matemática que estima el tiempo de operación entre fallos en activos reparables y el tiempo medio para fallos MTTF (mean time to failure) es la expresión que determina el tiempo de operación entre fallos pero para activos NO reparables.

En la figura 14 y 15 se observa la representación gráfica del MTTF y del MTBF. En la mayoría de las ocasiones el MTBF Y el MTTF son similares y se suelen usar de forma indistinta aunque sea incorrecta esta práctica.

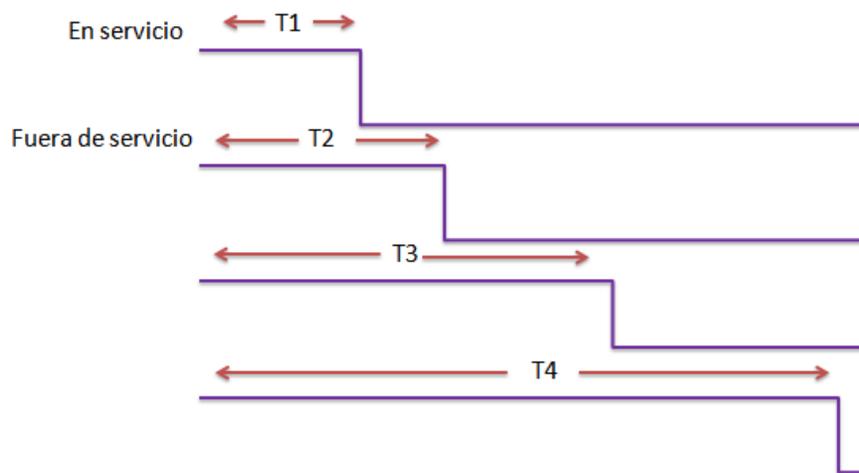


Figura 14. Representación gráfica del MTTF

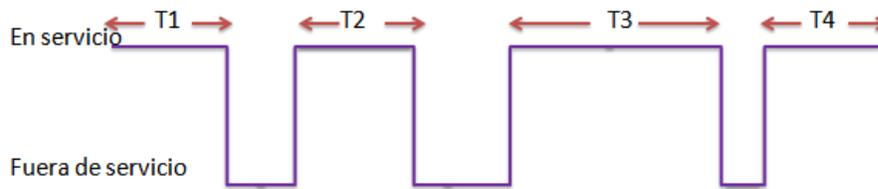


Figura 15. Representación gráfica de MTBF para un solo ítem

El MTTF y MTBF dan valores promedio y no una predicción de lo que sucederá con determinado activo, de forma algebraica se definen como:

$$MTTF = \frac{\text{Tiempo total cumulativo de operación}}{\text{Número de fallos en tiempo de observación}}$$

$$MTBF = \frac{\text{Tiempo total cumulativo de operación}}{\text{Número de fallos en tiempo de observación}}$$

## 6.2. ANÁLISIS POR ÁRBOL DE FALLOS.

El árbol de fallos o FTA por sus siglas en Ingles, (Fault Tree Analysis) es una representación gráfica organizada que describe la combinación de eventos para realizar análisis de confiabilidad en sistemas complejos. El árbol de fallos es una representación lógica de la interrelación de eventos primarios y básicos que conducen a un evento mayor indeseado, es un método deductivo que permiten realizar combinaciones de eventos a través de modelar rutas de ocurrencia de eventos simples de tal forma que se puede simular la forma en que el evento superior se ha desarrollado.

Los análisis de los árboles de fallo pueden ser cualitativos o cuantitativos. El análisis cualitativo es generalmente utilizado para investigar las causas potenciales que generaron el evento máximo, y se pueden describir los eventos como: “poco probable”, “Muy probable” o “Medianamente probable. El análisis cualitativos es la identificación del juego de corte mínimo para determinar el camino en que el evento básico afecta al evento máximo”

La estructura de un árbol de debe ser clara y fácil de entender y analizar, en la figura 16 se ve un ejemplo de él.

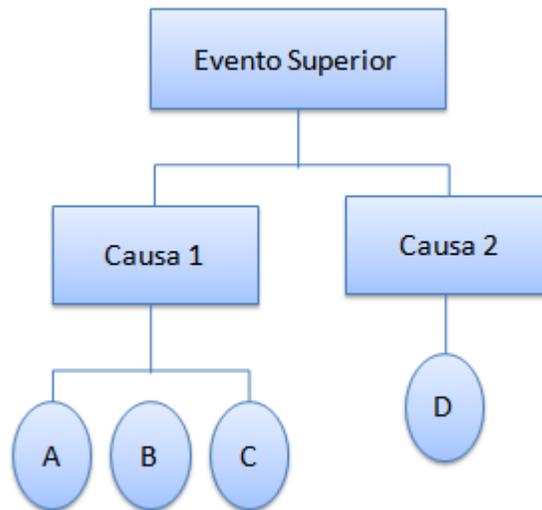


Figura 16. Ejemplo de un árbol de falla.

Los FTA son comúnmente utilizados para realizar análisis de seguridad de los sistemas y pueden ser utilizados para realizar análisis de confiabilidad y mantenimiento.

En un árbol de fallos se puede calcular mediante las fórmulas para la unión de eventos independientes no mutuamente excluyentes y para la intersección de eventos independientes para los modelos paralelo y serie:

Para el análisis de confiabilidad de los activos es necesario contar con algunos modelos matemáticos que analicen el comportamiento de los sistemas en su fase de diseño, estos modelos permiten analizar ciertas características que generan garantía y dan seguridad sobre la configuración adoptada para el sistema si va a responder a los requisitos que referentes a confiabilidad el usuario haya especificado. Lo referente a estos modelos se detallara en los próximos numerales.

### 6.3. CONFIABILIDAD EN SISTEMAS REDUCIBLES

**Sistemas en serie:** Un modelo serie es aquel en el que todos los componentes deben funcionar para que el sistema funcione, en caso de fallar uno de los elementos el sistema deja de funcionar. La figura 17 representa la configuración de un sistema en serie conformado por tres elementos.



Figura 17. Sistema en serie.

Teniendo en cuenta lo enunciado anteriormente, se define para este sistema en serie la siguiente expresión algebraica:

$$R = \prod_{i=1}^n R_i$$

### Sistemas en Redundancia

**Modelo paralelo:** Se habla de sistemas en paralelo cuando se requiere la falla simultánea de dos o más componentes para que el sistema falle. Este tipo de sistemas son denominados redundantes y son con frecuencia usados en operaciones críticas, donde un alto grado de confiabilidad es esencial. La figura 18 representa la configuración de un sistema en paralelo conformado por tres elementos.

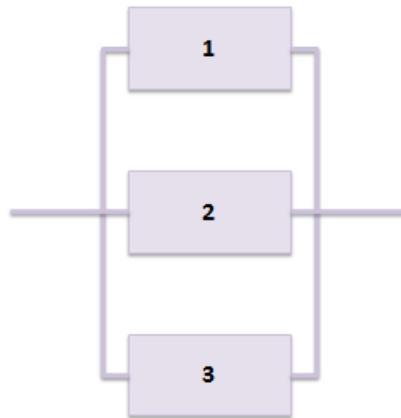


Figura 18. Sistema en Paralelo

Teniendo en cuenta lo enunciado anteriormente, se define para este sistema en paralelo la siguiente expresión algebraica:

$$R = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i)$$

En los sistemas reales se presentan sistemas mixtos para el cálculo de la confiabilidad en las máquinas, pero esto no debe generar inconvenientes para describir la parte en serie y la parte en paralelo.

**Sistemas mixtos:** Estos sistemas son los que están conformados por modelos serie y paralelo. Estos sistemas son la base para analizar configuraciones más complicadas conformadas por combinaciones de ellos.

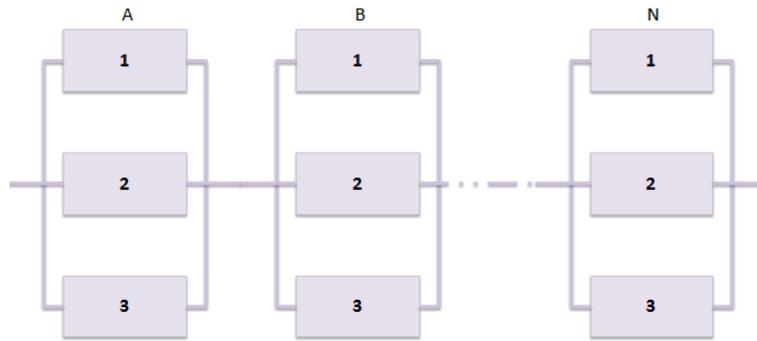


Figura 19. Serie de paralelos

Los paralelos de serie son considerados como redundancia de alto nivel, en la figura 20 se muestra su configuración:

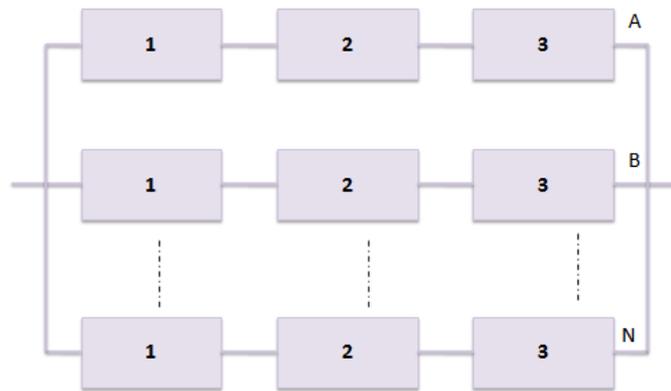


Figura 20. Paralelo de Series.

**Sistemas en Stand-by:** Conocido como redundancia positiva, estos sistemas parten de la idea de la “no falla”.

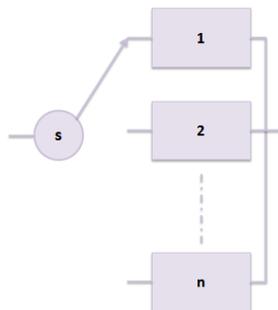
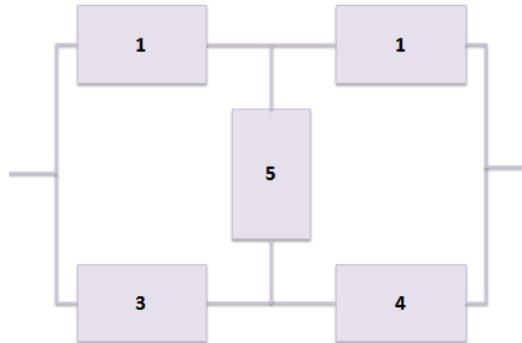


Figura 21. Sistema en Stand-by.

## 6.4. CONFIABILIDAD EN SISTEMAS COMPLEJOS

**Sistemas reducibles:** Estos son sistemas que tienen diferentes elementos y que permiten hacer subsistemas, de series, paralelos o stand-by. Cada subsistema se reemplaza en su equivalente hasta reducir a un circuito equivalente que permita realizar los cálculos matemáticos.

**Sistemas Irreducibles:** Estos sistemas tienen una forma que no se puede reducir de manera directa



Para dar solución al sistema de la figura, se utilizan los siguientes métodos:

- Método de la descomposición
- Método de caminos mínimos
- Método de cortes

## 6.5. LEY DE WEIBULL FALLA

El análisis de Weibull es una de las técnicas más utilizadas para estimar una probabilidad, este análisis se basa en datos medidos o asumidos.

El análisis por Weibull permite estudiar cómo se distribuyen los fallos en componentes claves, es decir, permite observar a través del registro de los fallos como varían estos a lo largo del tiempo y cuáles son las variables que influyen en la tasa de fallos.

Existen dos tipos de soluciones analíticas de la distribución de Weibull (método de los momentos y método de máxima verosimilitud), pero en la práctica es muy común usar el método gráfico puesto que tiene un nivel de complejidad menor. Este método determina un parámetro de origen  $t_0$ ; que se consigue gracias a un papel especial para gráficos, llamado papel de Weibull.

En la gráfica de Weibull los datos de falla se trazan en el papel, pero, gracias a los avances tecnológicos, existe un software que permite realizar el procedimiento de forma electrónica. Aunque la forma gráfica exige varios pasos, es relativamente directo y requiere álgebra sencilla como se muestra en la ecuación:

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right]$$

Donde:

$\eta$ : Vida característica

$\beta$ : Pendiente de la recta

Mediante el uso del papel probabilístico, se obtiene una línea recta ( $y = \beta x + \text{constante}$ ) cuando se trazan los datos de falla que se ajustan a la distribución de Weibull.

### Pasos de análisis de Weibull:

- Agrupar los datos en orden creciente de tiempo hasta el fallo
- Obtiene el rango mediano de las tablas para cada grupo de tiempo
- Parcelas en el diagrama de probabilidad de Weibull el rango mediano versus el tiempo de fracaso o cada observación
- 

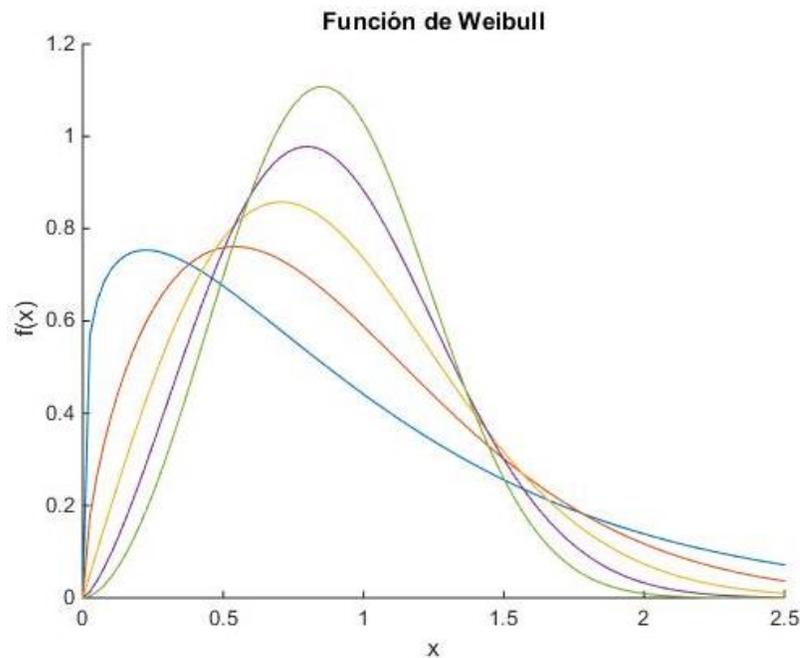


Figura 22. Función de Weibull

La distribución de Weibull es una función de dos parámetros: un parámetro de escala y un parámetro de forma, además es capaz de asumir varias formas con las cuales se

adapta a diferentes conjuntos de datos. Tiene las ventajas adicionales de tener una función de distribución acumulativa cerrada y una función de peligro de forma cerrada.

## **7. MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD (RCM)**

El mantenimiento centrado en la confiabilidad o RCM (Reliability Centered Maintenance) es un procedimiento metodológico que se implementa con el objetivo de mantener o conservar un activo físico, este proceso busca asegurar que cualquier activo físico continúe haciendo lo que el usuario necesita que haga en un contexto operacional, los requerimientos de los usuarios varían de acuerdo a este contexto [22]. El desarrollo del RCM formula siete preguntas básicas acerca del activo que se desea analizar, estas preguntas son:

1. ¿Cuáles son las funciones y los parámetros de funcionamiento asociados al activo en su actual contexto operacional?
2. ¿De qué manera se falla en satisfacer dichas funciones?
3. ¿Cuál es la causa de cada falla?
4. ¿Qué sucede cuando se producen estas fallas?
5. ¿Cuáles son las consecuencias que traen estas fallas?
6. ¿Cómo se pueden prevenir o predecir estas?
7. ¿Qué sucede si no se encuentra una tarea proactiva adecuada?

### **Respuesta a las siete preguntas básicas del RCM**

**Contexto operacional:** El contexto operacional se refiere a dónde y cómo está el equipo o sistema desarrollando su función primaria. Las personas que desarrollan los programas de mantenimiento de cualquier tipo de activo; deben contar con un amplio conocimiento del contexto operacional del mismo, antes de aplicar la metodología RCM. Para esto es de gran utilidad conocer claramente la respuesta a las siguientes preguntas: ¿Que activos son los que se van a mantener? ¿Bajo qué condiciones ambientales y físicas se encuentran? ¿En qué estado físico se encuentran? ¿Cuáles son las peores condiciones climáticas en el lugar dónde están? ¿Cuánta carga maneja y de qué tipo? El contexto operacional afecta las funciones y expectativas de funcionamiento, así como la naturaleza de los modos de falla, sus efectos, periodicidad, consecuencias, y lo que se debe hacer para manejarlos. De acuerdo al contexto operacional se diferencian planes de mantenimiento aplicados al mismo tipo de activos [23].

Para definir el contexto operacional, inicialmente se incluye:

- Condiciones físicas actuales del activo.
- Descripción del activo a mantener.
- Condiciones de operación.
- Estándares de calidad, estándares de medio ambiente y normatividad bajo la que se encuentra el activo.
- Riesgos para la seguridad.

**Funciones y parámetros de funcionamiento en el RCM:** Las funciones de los activos dentro de la metodología RCM se definen dando respuesta a la primera pregunta, usando cuestionamientos complementarios como: ¿qué es lo que el usuario desea que haga el sistema? y ¿si se puede asegurar que es posible realizar dicha función? En general, el estado que se requiere preservar debe ser aquel en la cual el activo continúe haciendo lo que los usuarios quieren que haga.

Lo que se espera del activo puede ser dividido en dos categorías, en funciones primarias y en funciones secundarias, las primarias cubren aspectos como velocidad, producción, capacidad de almacenamiento, calidad de producto y servicio al cliente; las secundarias abarcan aspectos sobre áreas de seguridad, control, contención, confort, integridad estructural, economía, eficiencia operacional, cumplimiento de regulaciones ambientales y hasta la apariencia del activo [22].

Cuando se desean definir las funciones, la principal consideración que se debe tener en cuenta es el deterioro de los activos físicos, por tal razón cuando estos se ponen en funcionamiento, deben rendir más que el estándar mínimo de funcionamiento deseado por el usuario. Lo que el activo físico es capaz de rendir en el momento que se pone a funcionar por primera vez, se conoce como capacidad inicial. En la figura 23 se aprecia la región donde se debe situar el funcionamiento deseado, de acuerdo a la capacidad inicial.

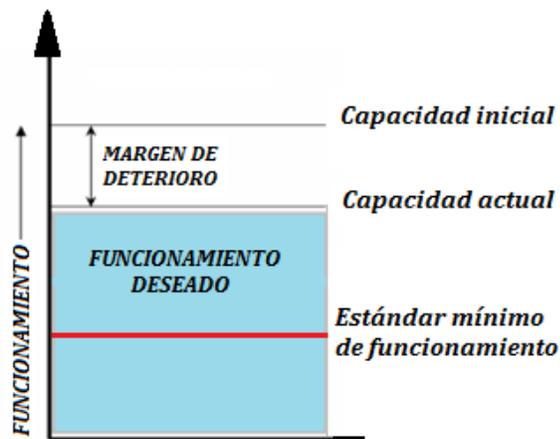


Figura 23. Capacidad inicial y funcionamiento deseado.

Cuando el funcionamiento deseado por el usuario excede la capacidad inicial del activo físico; se dice que es un activo no mantenible. Los principales parámetros que se deben conocer a la hora de definir las funciones son: la capacidad inicial del activo físico y cuál es exactamente el funcionamiento mínimo que el usuario está dispuesto a aceptar dentro del contexto donde se va a utilizar, de esta forma se logra definir el rango sobre el cual se mueven los procesos de mantenimiento a ejecutar sobre el activo, tal como se muestra en la Figura 24.

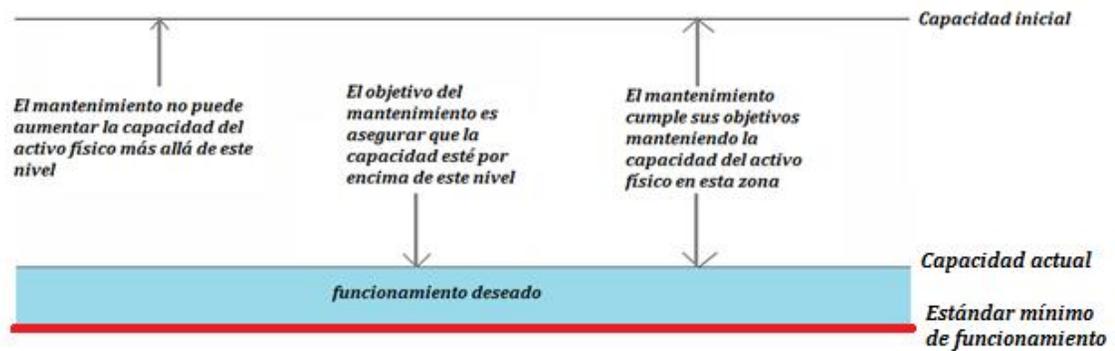


Figura 24. Activos físicos mantenibles.

**Fallas funcionales:** Si el activo no está en la capacidad de realizar lo que el usuario desea es porque ha fallado, y este comportamiento lleva a la definición básica de falla como la incapacidad de cualquier activo de hacer lo que sus usuarios quieren que haga [23]. Desde la mirada del RCM la definición se queda corta, puesto que no tiene en cuenta el hecho de que cada activo tiene más de una función y por lo general con más de un estándar de funcionamiento deseado, razón por la cual es más preciso definir una falla en términos de pérdida de una función específica. Por esto el proceso RCM maneja el término “falla funcional” porque ocurre cuando el activo no puede cumplir una función de acuerdo a los parámetros de funcionamiento preestablecidos por el usuario.

Por lo anterior se puede definir la falla funcional como la incapacidad de un activo para satisfacer un estándar de funcionamiento deseado. Con esta definición se da respuesta a la segunda pregunta del RCM. Además, Se vuelve necesario definir las fallas funcionales que se puedan presentar en el sistema a mantener, asociadas a cada función.

## 8. ANÁLISIS DE MODOS DE FALLA Y SUS EFECTOS (AMFE)

**Modo de falla:** Se puede definir modo de falla como cualquier evento que causa una falla funcional. Los modos de falla generalmente posibles se dan en equipos iguales o similares operando en contextos iguales, fallas que estén siendo prevenidas por el **AMFE** área de mantenimiento y fallas que aún no han ocurrido, pero son altamente posibles según el contexto de operación.

Existen varias herramientas y recursos que permiten definir los modos de fallo de una manera correcta; en la mayoría de los casos, los modos de falla son discutidos, registrados y manejados luego de haber ocurrido. Sin embargo, tratar las fallas después de que hayan ocurrido, es hacer mantenimiento correctivo y en la mayoría de los casos este no es el tipo de mantenimiento que se desea implementar dentro de la metodología RCM, teniendo en cuenta que esta se basa principalmente en lo que se denomina mantenimiento proactivo que significa manejar los eventos antes de que ocurran, o al menos decidir cómo deberían ser manejados si llegaran a ocurrir.

## Clasificación de los modos de fallo:

**Reducción de la capacidad:** Se presenta cuando la capacidad del activo puesto en servicio, queda por debajo del funcionamiento deseado. Las principales causas de pérdida de capacidad son: deterioro, fallas de lubricación, polvo o suciedad, desarme, y errores humanos

**Aumento del esfuerzo aplicado:** Cuando la capacidad del activo físico aumenta hasta quedar fuera de su capacidad tal como se muestra en la figura 25; el activo falla de una de las siguientes maneras:

- El funcionamiento deseado aumenta hasta que el activo físico no pueda responder a él.
- El aumento del esfuerzo causa que se acelere el deterioro hasta el punto en el que el activo se torna tan poco confiable que deja de ser útil.

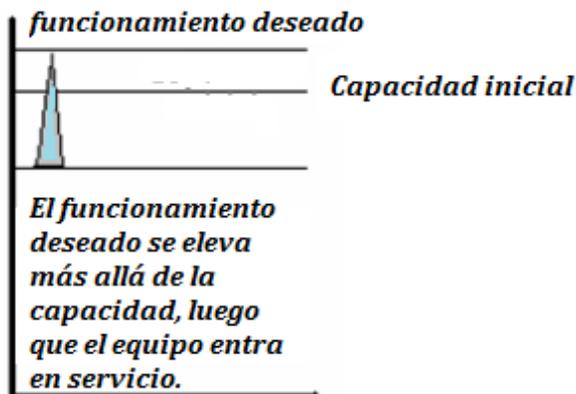


Figura 25. Aumento de funcionamiento deseado.

**Capacidad inicial insuficiente:** Se presenta cuando el funcionamiento deseado del activo físico se ubica por encima del rango de capacidad inicial desde el instante que se pone por primera vez a funcionar. Generalmente este problema afecta solo una o dos funciones, sin embargo se debe enlistar como modo de falla.

**Nivel de detalle:** Si se hace poco detalle o pocos modos de falla pueden llevar a un análisis superficial y hasta peligroso. Por el contrario, demasiados modos de falla o demasiado detalle hacen que el proceso RCM lleve mucho más tiempo que el necesario.

**Análisis de causa raíz:** En algunas ocasiones las causas de una falla funcional se pueden resumir como: "falla la máquina". En otras tal vez sea necesario considerar qué ocurre a nivel molecular. Mientras más profundo sea el análisis de modo de falla, más cantidad de modos de falla se pueden incluir. Se enfatiza que el nivel al que debería ser identificado un modo de falla es aquel en el cual es posible identificar una

política adecuada para el manejo de la falla, esto tiene validez tanto si se está llevando un AMEF antes de que ocurra la falla como si se hace un análisis causa raíz después de que ocurrió la falla.

**Probabilidad:** Algunos modos de fallo ocurren con más frecuencia que otros, incluso algunos pueden ser improbables. Por esta razón cuando se realiza un análisis de modo de falla y sus efectos, se debe decidir acerca de qué modos de falla se pueden ignorar, por tener una muy poca probabilidad de ocurrencia. Los modos de falla más probable son los que se enlistan a continuación:

- Fallas ocurridas antes en el mismo activo físico o activos similares.
- Modos de falla que actualmente se deseen evitar incluyendo ciertas rutinas de mantenimiento proactivo.
- Aquellos modos de fallo que aunque nunca han ocurrido, tienen posibilidades reales de ocurrir.

**Efectos de falla:** Es la descripción de lo que ocurre cuando se produce cada modo de falla. Es importante distinguir entre efecto de falla y consecuencia de falla, pues un efecto de falla responde a la pregunta ¿Qué ocurre?, mientras que una consecuencia de falla responde la pregunta ¿Qué importancia tiene? Al describir los efectos de falla, debería hacerse constar lo siguiente:

- La evidencia de que se ha producido la falla.
- Las formas en que el ambiente o la seguridad se ven afectados por la falla.
- Las maneras en que la producción se ve afectada por la falla.
- Los efectos físicos que provoca la falla.

Los efectos de falla deben ser descritos como si actualmente no se estuviera haciendo nada para impedirlos y uno de los objetivos de esta descripción es determinar si se necesita hacer mantenimiento proactivo.

**Consecuencias de falla:** Las consecuencias de las fallas varían de acuerdo a la importancia que le den los dueños o usuarios a los efectos de las fallas y dependerá de la gravedad y naturaleza de estas. Si una falla tiene graves consecuencias, entonces se harán todos los esfuerzos posibles para evitarla, mientras que si sus consecuencias son mínimas; probablemente simplemente se repare cuando ocurra. Un aspecto importante del RCM es que pone por encima conocer la consecuencia de la falla más que la característica técnica de la misma, el RCM reconoce que la única razón para hacer cualquier tipo de mantenimiento proactivo no es evitar las fallas si no evitar o reducir las consecuencias de las fallas. El proceso de RCM clasifica estas consecuencias de la siguiente manera:

**Consecuencia de falla oculta:** Es aquella que cuando presenta falla por sí sola; no es evidente para los operarios en condiciones normales.

**Consecuencias para la seguridad y medio ambiente:** Un modo de falla tiene consecuencias para la seguridad si causa una pérdida de función u otros daños que pudieran lesionar o causar la muerte de alguien y tiene consecuencias ambientales si causa una pérdida de función u otros daños que pudieran conducir a la infracción de cualquier normativa o reglamento ambiental conocido.

**Consecuencias operacionales:** En general, las fallas pueden afectar las operaciones de cuatro maneras: Afectación del volumen de producción, Afectación la calidad del producto, Afectación del servicio al cliente e Incremento del costo operacional sumado al costo directo de la reparación

Una falla tiene consecuencias operacionales si tiene un efecto adverso directo sobre la capacidad operacional.

**Consecuencias no operacionales.** Son aquellas que no ejercen un efecto adverso directo para la seguridad, el medio ambiente, o la capacidad operacional. Las consecuencias asociadas con estas fallas son los costos directos de reparación, por lo tanto, para modos de falla con consecuencias no operacionales, se justifica realizar tareas proactivas, si, en un periodo de tiempo, cuesta menos que el costo de reparar las fallas que se pretenden prevenir.

**Tareas Proactivas:** Estas tareas responden las últimas dos preguntas del RCM: ¿Qué puede hacerse para predecir o prevenir cada falla?, ¿Qué sucede si no puede encontrarse una tarea predictiva o preventiva apropiada?

En este punto se combinan el mantenimiento preventivo y el predictivo, y el RCM los denomina de la siguiente forma:

- Reacondicionamiento cíclico.
- Sustitución cíclica.
- Mantenimiento a condición.

El mantenimiento preventivo se relaciona con las tareas de reacondicionamiento y sustitución cíclicos y el mantenimiento predictivo con el mantenimiento a condición.

**Reacondicionamiento cíclico:** Consiste en reacondicionar la capacidad de un elemento o componente antes o en el límite de edad definido, independientemente de su condición en ese momento. Son revisiones o cambios completos hechos a intervalos preestablecidos para prevenir modos de falla específicos relacionados con la edad.

Las siguientes condiciones son necesarias para que una tarea de reacondicionamiento físico sea factible: El elemento debe contar con una vida útil y estar razonablemente seguro acerca de la duración de esta vida útil.

A través del reacondicionamiento cíclico, se busca restaurar el activo físico a su condición inicial de resistencia a la falla, o aproximarse lo máximo posible a esta condición.

**Sustitución cíclica:** La sustitución cíclica consiste en descartar un elemento o componente antes, o en el límite de edad definida, sin tener en cuenta su condición en ese momento. Aunque el reacondicionamiento cíclico de un elemento sea técnicamente posible; en ocasiones se prefiere esta opción, por la relación costo-beneficio de dicho reacondicionamiento, en otros casos simplemente es imposible recuperar la capacidad inicial del elemento una vez que ha alcanzado el fin de su vida útil.

**Mantenimiento a condición:** La mayoría de modos de fallo dan algún tipo de advertencia de que están por ocurrir, por tanto si se puede encontrar evidencia de que una fallase va a presentar; podría ser posible actuar para prevenir que falle completamente y evitar las consecuencias. En la figura 26 se presenta la curva P-F que muestra como comienza la falla, el deterioro que sufre al punto en que puede ser detectada (punto "P") y luego, si no es detectada y corregida, continúa deteriorándose, generalmente a una tasa acelerada hasta que llega al punto de falla funcional ("F").

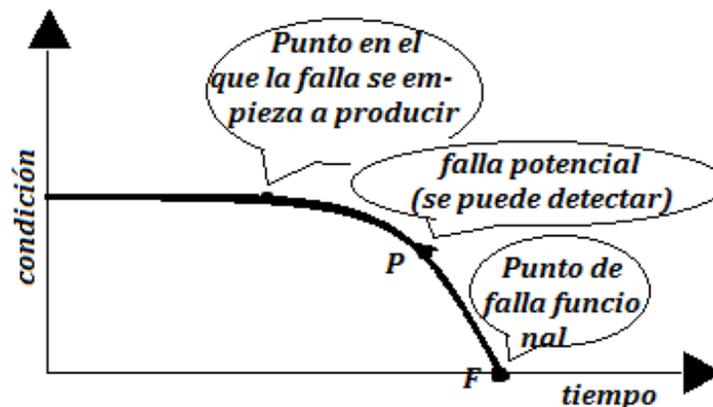


Figura 26. Curva P-F.

Las tareas realizadas para evitar las consecuencias de la falla funcional se conocen como tareas a condición y consisten en chequear si hay fallas potenciales, y de este modo prevenir la falla funcional o evitar sus consecuencias.

La falla potencial y la funcional se pueden ubicar dentro del intervalo P-F como se muestra en la figura 27. Este intervalo es una referencia para conocer el momento en el que se deben realizar las tareas a condición, si lo que se quiere es detectar la falla potencial antes de que se convierta en falla funcional, por tanto las tareas a condición se deben realizar a intervalos menores al intervalo P-F.

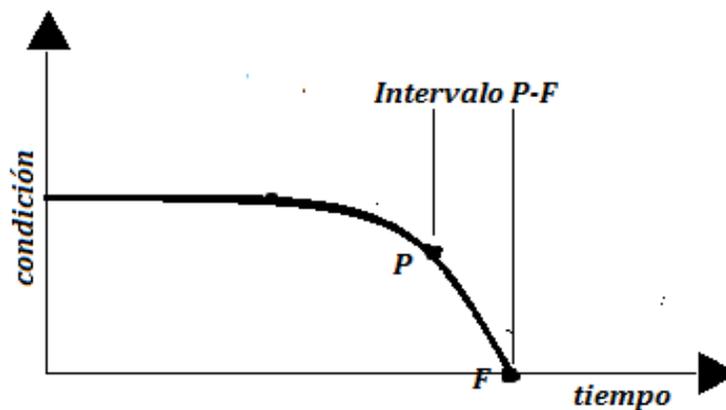


Figura 27. Intervalo P-F

## ACCIONES A “FALTA DE”

Si no es posible encontrar una tarea proactiva, “las acciones a falta de” entran a desempeñar su rol dentro del proceso RCM, y se seleccionan de acuerdo a si el modo de falla es evidente o no, y de las consecuencias del mismo, respondiendo a la última pregunta del proceso RCM: ¿Qué debería hacerse si no puede encontrarse una tarea proactiva adecuada? Las acciones a “falta de” se clasifican en tres grupos:

**Búsqueda de falla:** son las encargadas de chequear si los activos todavía funcionan y no forman parte de ninguno de los tres grandes grupos de mantenimiento (correctivo, preventivo y predictivo).

**Ningún mantenimiento programado:** Hasta ahora se tiene que la búsqueda de falla es la primera acción “a falta de” en caso de no encontrarse una tarea proactiva apropiada para una falla, pero si la falla es evidente, y no afecta la seguridad ni el medio ambiente, entonces la acción “a falta de” es no realizar ningún mantenimiento programado, es decir dejar los elementos en servicio hasta que ocurra una falla funcional, y en ese momento repararlos o reemplazarlos.

**Rediseño:** El rediseño es la opción que debe ser implementada si una falla evidente u oculta constituye una amenaza para la seguridad o el medio ambiente y no puede encontrarse ninguna tarea proactiva que reduzca el riesgo de la falla a un nivel tolerable, es decir no puede ser adecuadamente prevenida.

## 9. OPTIMIZACIÓN

El cambio de visión sobre el uso de los activos ha dado lugar en la industria al concepto de optimización, permitiendo que ciertas técnicas de optimización se apliquen en los problemas prácticos de confiabilidad durante la gestión de activos. Así entonces, si sabemos que el momento ideal en el ciclo de vida es la administración de activos; para desarrollar una estrategia de abastecimiento y almacenamiento (que se

da justo en la etapa de planificación de activos), si se saben cuáles son las expectativas funcionales del activo y las características de mantenimiento, se puede diseñar un sistema óptimo que permita la operación, el mantenimiento y la reparación de los activos en los momentos precisos, es decir, que permita que estén disponibles cuando y donde se requieran.

Cuando se habla de optimización se deben hacer las siguientes preguntas: ¿Qué implica en ingeniería tener la solución óptima? ¿Es razonable que quién dirige solicite una solución que optimice la confiabilidad y el costo?, además de otros interrogantes importantes al momento de hacer un sistema de optimización, pues el uso de técnicas adecuadas, pueden producir resultados que favorezcan directamente los recursos a utilizar, lo que se traduce directamente en costo.

La optimización en gestión de activos, se puede resumir en tres pasos: análisis, evaluación y mejoramiento. La figura 28 describe la gestión de activos desde una visión óptima y se enfoca en lo siguiente:

- Principales indicadores de desempeño para la administración de activos
- Política de gestión de inventario que soporta todas las áreas de gestión de activos y puede garantizar que las métricas de rendimiento clave se rastreen y seguimiento al plan
- Gestión de activos físicos, conjunto de actividades que gestionan la recepción, el almacenamiento físico y la distribución de elementos.
- Adquisición de activos para inventario y soporte de órdenes de trabajo así como la reparación de elementos rotatorios designados como activos reparables que van al inventario una vez reparadas.

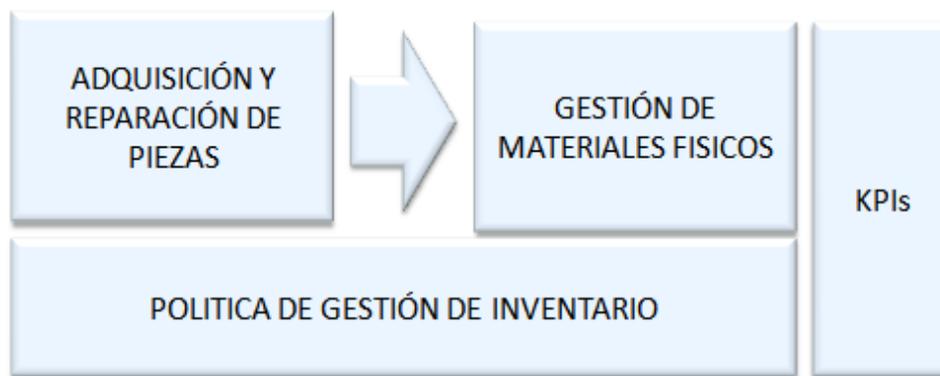


Figura 28. Modelo de gestión de materiales

La optimización minimiza una función objetivo sin violar ninguna limitación, para eso se deben seguir los siguientes pasos:

- a. Definir una función objetivo: La función objetivo puede ser cualquier combinación de fórmulas, algoritmos o procesos, siempre que devuelva un valor único para cada posible combinación de parámetros.
- b. Identificar todas las restricciones del problema
- c. Definir el método matemático para resolver el problema

Se debe tener en cuenta que la función objetivo debe ser computable y todas las restricciones deben ser probables para todas las posibles soluciones, que se caracterizan por un conjunto de variables controlables. Los problemas de optimización se expresan matemáticamente y existen diferentes métodos para resolverlos, los cuáles pueden ser estudiados por el lector en libros dedicados a dichos análisis.

La optimización de la confiabilidad normalmente se ocupa del costo y las interrupciones, que son generalmente más deseables a medida que disminuyen en magnitud. Las soluciones factibles se definen como soluciones que satisfacen todas las restricciones de igualdad y no violan ninguna restricción de desigualdad [26].

## **10. REEMPLAZO DE DISPOSICIÓN FINAL**

Cuando se habla de disposición final, hay que remitirse al ciclo de vida del activo, en donde las compañías deben tomar la decisión de desechar el equipo o seguir disponiendo de él después, según el informe de los mantenimientos realizados al mismo

Una compañía se puede ver enfrentada a gastos repentinos debido a daños accidentales en los equipos, y debe decidir si está en la capacidad de prolongar la vida del activo a través de una revisión general o disponer del activo y suplirlo por uno nuevo. Reemplazar un activo en mal estado por envejecimiento o por daños accidentales por uno nuevo, se vuelve económicamente justificable debido a que los años entre reemplazos no son pocos respecto a la cantidad de mantenimientos que se le deben hacer en cuestión de semanas o meses a activos que no estén en las mejores condiciones.

Es importante tener en cuenta cuando se decide desechar un activo para conseguir otro, que el dinero cambia de valor en el tiempo y es necesario hacer un análisis de flujo de efectivo descontado, es decir, se debe determinar si el valor actual (VA) de los flujos futuros esperados, justifica el desembolso original (A). Si el VA es mayor o igual que el A, el proyecto propuesto se acepta, en caso contrario, se rechaza [27]

## REEMPLAZO PREVENTIVO

Siempre se quiere que los sistemas sean más confiables y el reemplazo preventivo es una opción para aumentar los índices de confiabilidad, esto, aprendiendo a reemplazar los componentes críticos en el momento óptimo, antes de que se produzca un fallo.

Antes de disponer de los activos necesita obtener y analizar datos para identificar el mejor tiempo de reemplazo preventivo.

### Política de reemplazo basada en la edad

El tiempo de reemplazo preventivo depende de la edad del componente. Si se produce un reemplazo de fallo, el reloj de tiempo del componente se restablece a cero, a diferencia de la política de reemplazo de bloques, donde los reemplazos preventivos se producen a intervalos fijos independientemente de la edad del componente de operación. En este caso, el componente sólo se reemplaza una vez que alcanza la edad especificada.

### Política de reemplazo de bloques

La política de reemplazo de bloques se denomina a veces política de intervalos de grupo o de intervalos constantes, ya que el reemplazo preventivo ocurre en horarios fijos y reemplazo de fallos cuando es necesario. La política se ilustra en la figura 29,  $C_p$  es el costo total de un reemplazo preventivo,  $C_f$  es el costo total de un reemplazo de falla, y  $t_p$  es el intervalo entre reemplazos preventivos.

Se puede ver que a medida que disminuye el intervalo entre los reemplazos preventivos, habrá menos fallos intermedios.

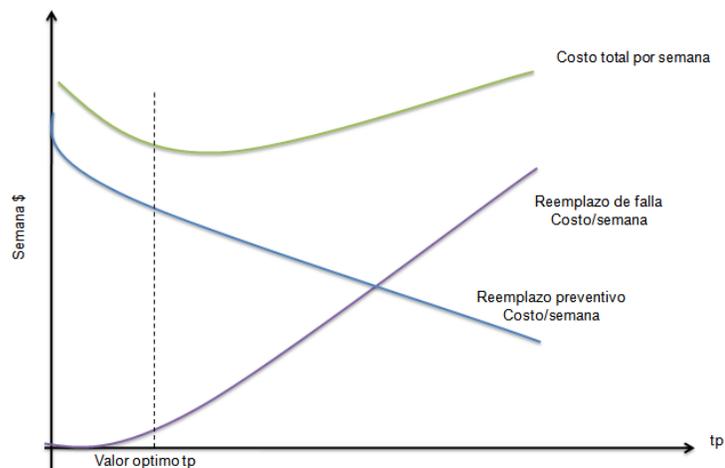


Figura 29. Política de intervalo constante: tiempo de reemplazo óptimo.

A primera vista, la sustitución de la edad parece ser la única opción razonable debido a que el componente siempre permanece en servicio hasta su edad programada de reemplazo preventivo. Sin embargo, para implementar una política de reemplazo basada en la edad, debe mantener un registro en curso de la edad actual del componente y cambiar el tiempo de reemplazo planificado si falla. Claramente, el costo de esto se justifica para componentes caros, pero para uno barato, la política de reemplazo de bloques fácilmente implementada suele ser más rentable.

## PARTE III. METODOLOGÍA DE CORRELACIÓN

### 11. CORRELACIÓN DE LA GESTIÓN DE ACTIVOS DEL CICLO DE VIDA Y SUS TÉCNICAS DE ANÁLISIS

Como se mencionó en capítulos anteriores, el ciclo de vida de los activos pasa por diferentes etapas, verificación, planeación, diseño, compra, instalación, prueba, operación, mantenimiento y por último su disposición final.

En esas etapas, se deben tomar decisiones y consideraciones en diferentes ámbitos para definir la forma más óptima que permitirá maximizar el retorno sobre los activos y minimizar el costo de ciclo de vida, así como lograr las adecuadas tasas de retorno sobre inversiones que viabilicen los proyectos a ejecutar en la gestión de activos.

Lograr encontrar una metodología que abarque los conceptos de la gestión activos, es de primera y vital importancia para un aprovechamiento de los recursos en cualquier empresa.

A continuación se desglosan las etapas del ciclo de vida con el fin de recordar lo que pretende cada una de ellas:

**Estrategia:** Secuencia de actividades para desarrollar de la manera más óptima posible el desarrollo de la gestión de activos.

**Planteamiento:** Etapa que define las políticas, las normas y los objetivos que se deben abarcar durante la aplicación del modelo de gestión de activos.

**Evaluación y desempeño:** Etapa donde se decide si se debe diseñar o comprar un activo, dependiendo de las necesidades existentes de la compañía.

**Crear y procurar:** Esta fase consiste en la creación, la construcción o la adquisición de los activos previstos.

**Operar:** En esta fase se incluye el manejo formal de la gestión de activos, estrategias para rendimiento del activo y soluciones totales de visibilidad de activos

**Mantener:** En esta etapa se busca conservar de la mejor manera los activos a través del uso de normas, políticas y métodos de mantenimiento.

**Modificar:** En esta etapa se busca acondicionar los activos según las necesidades que vayan surgiendo con el fin de prolongar la vida útil de los mismos.

**Disposición final:** Esta fase consiste en la eliminación, retiro, liquidación o reutilización de los activos de acuerdo con la estrategia, políticas y procedimientos definidos.

Durante el documento se mencionaron diferentes herramientas claves en el desarrollo de una adecuada Gestión de Activos, en el cuadro se hace una relación de la metodología adecuada según la etapa en la que se esté del ciclo de vida.

	ESTRATEGIA	PLANTEAMIENTO	EVALUACIÓN Y DISEÑO	CREAR Y PROCURAR	OPERAR	MANTENER	MODIFICAR	DISPOSICIÓN FINAL
NORMA	PAS 55 E ISO 55000	PAS 55 E ISO 55000	PAS 55 E ISO 55000	PAS 55 E ISO 55000	PAS 55 E ISO 55000	PAS 55 E ISO 55000	PAS 55 E ISO 55000	PAS 55 E ISO 55000
METODOLOGÍA	Optimización	Optimización	Árbol de probabilidad de fallos Análisis por árbol de fallos	Análisis por árbol de fallos	Tempo Medio Entre Fallos y Tempo Medio Para Fallo AMFE Ley de Weibull de falla RCM	Confiableidad en sistema reducibles. AMFE	Reemplazo de disposición final	Reemplazo de disposición final

Tabla 1. Correlación de la gestión de activos del ciclo de vida y sus técnicas de análisis.

## 12. CONCLUSIONES

- La implementación de un sistema de gestión de activos ayuda a que los procesos sean integrales y se maximice la productividad en las empresas, es decir, las labores a realizar tienden a ser más eficientes y los negocios más competentes en el mercado.
- La gestión de activos enmarca todo un plan estratégico que debe estar alineado con todas las áreas de la compañía, de tal forma que constituya una visión amplia sobre el uso de los activos y que no se limite al mantenimiento y desecho de ellos.
- Mejorar la productividad y la competitividad sin dañar estándares de calidad, es un aspecto primordial respecto a las exigencias que el mundo actual pone, por eso es necesario auditar el desempeño mediante sistemas de gestión de activos, que ayuden a identificar brechas existentes para así implementar planes de mejora.
- El cumplimiento de la PAS 55 reúne una metodología sistemática e interdisciplinaria que combina los objetivos de corto y largo plazo para garantizar a todos los participantes de un negocio el buen desarrollo de las actividades.
- La PAS 55 se enfoca en diversos aspectos que ayudan a evaluar el nivel de madurez en la que se encuentran las organizaciones respecto a los requisitos que cumplan de ella.
- La gestión de activos va más allá de hablar sobre activos tangibles; es la integración de aspectos como capital humano, procesos, métodos, tecnologías y el activo como tal. Es la integración de un grupo de componentes que debe estar bajo un esquema en donde se comprenda e identifique la metodología a utilizar a partir de las necesidades de la empresa.
- En general, La confiabilidad abarca los cuatro pilares de la gestión de activos (planificar, verificar, hacer y actuar) sin dejar a un lado el valor de la gestión humana en los procesos.
- La confiabilidad se ha convertido en un tema de vital importancia para las compañías, debido a su estrecha relación con la seguridad y productividad de estas.

- El método del un RCM es un proceso estratégico para el manejo de fallas, debido a que clasifica las fallas basándose en sus consecuencias. Gracias a esto, provee una base para decidir si el caso merece mantenimiento proactivo, además, sugiere una posible decisión en caso de no encontrarse una tarea proactiva adecuada al problema.
- El Análisis de Modo y Efecto de Fallos es un conjunto de lineamientos que logran identificar problemas y sus posibles efectos en un sistema para priorizarlos y poder concentrar los recursos en planes de prevención, supervisión y respuesta.
- Disponer de los activos en el momento adecuado es la consecuencia de un buen plan de mantenimiento, que está rodeado de toda una estrategia de gestión de activos que permite hacer de los activos al final de su vida útil elementos con posible rentabilidad o con poca pérdida al final de de su ciclo.
- Toda la teoría del mantenimiento correlacionada con la gestión de activos y sus técnicas de análisis, permiten tener modelos sostenibles y practicas confiables durante los procesos de producción de una empresa.

### 13. BIBLIOGRAFÍA

- [1] John D. Campbell, Andrew K.S. Jardine, Joel MacGlynn. “Asset management excellence”: Taylor & Francis Group.
- [2] Alfonso e Jesús Quintero Bueno, Modelo para implementar y auditar un sistema de gestión de activos, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga 2011.
- [3] Control estadístico de la calidad y seis sigma. Humberto Gutiérrez pulido, Román de la Vara Salazar 2º edición.
- [4] Life cycle reliability engineering. Guangbin Yang, Ford MotorCompany.2007, John Wiley & Sons. ISBN-13: 978-0-471-71529-0
- [5] Pham. Hoang.“Handbook of Reliability Engineering” Rutgers University, New Jersey, USA.ISBN 1852334533
- [6] COMITÉ TÉCNICO DE NORMALIZACIÓN. Norma UNE: Terminología del mantenimiento. Madrid: CTN, 2002. 27p. (EN-13306)
- [7] Gestión de activos aporte MTTO 2014
- [8] Mark, H and Melinda Hodkiewicz., “*Glossary of Reliability and Maintenance Terms and definitions for mining Assets*”, University of Western Australia, Perth.Australia, 6009 and CRC Mining, Australia.
- [9] Estándar PAS 55:2088 Gestión de Activos
- [10] Halevi. Gioden. “A Handbook of Production Management Methods”. Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP: (2001)
- [11] BEDOYA, Carlos Mario “ISO 55000 Gestión de activos. Una mirada hacia el futuro desde el área de mantenimiento” Cementos Argos. {En línea}. Disponible en: [//docplayer.es/4917217-Iso-55000-gestion-deactivos-una-mirada-hacia-el-futuro-esde-el-area-de-mantenimientocarlos-mario-bedoya-rios-cementos](http://docplayer.es/4917217-Iso-55000-gestion-deactivos-una-mirada-hacia-el-futuro-esde-el-area-de-mantenimientocarlos-mario-bedoya-rios-cementos)
- [12] Society for Maintenance & Reliability Professionals “Asset Management vs Equipment Maintenance Plan”. R. Keith Mobley, CMRP, MBB. Principal, Life Cycle Engineering, Inc.
- [13] Aplicación de un Modelo de Gestión Integral de Activos en un entorno industrial. “Documento de consulta”. {En línea}. {16 Octubre de 2016}. Disponible en: ([http://www.aec.es/c/document\\_library/get\\_file?p\\_l\\_id=33948&folderId=195586&name=DLFE-7202.pdf](http://www.aec.es/c/document_library/get_file?p_l_id=33948&folderId=195586&name=DLFE-7202.pdf)).

- [14] Tavares, Lourival Augusto. Gestion de activos para el mantenimiento “Documento de consulta”. {En línea}. {17 de octubre de 2016}. Disponible en: (<http://www.mantenimientomundial.com/sites/mmnew/bib/notas/gestionactivos.pdf>)
- [15] Enciclopedia financiera “Consulta”. {En línea}. {17 Octubre de 2016}. Disponible en:(<http://www.encyclopediainanciera.com/definicion-capex.html>).
- [16] HOLGUÍN, Mauricio. Mantenimiento Eléctrico “Documentos de consulta”. {En línea}. {25 de octubre de 2016}. Disponible en: (<https://sites.google.com/a/utp.edu.co/mauricioholguin/docs-mantenimiento>)
- [17] Duran Jose, Sojo Luis “Implementando un Plan de Gestión de Activos en el Tiempo de Vida, con el estándar PAS 55”. The woodhouse Partnership Ltd. Pag. 7,16,17.
- [18] Durán, José Bernardo. Gestión de Mantenimiento bajo estándares Internacionales como PAS 55 Asset Management. The Woodhouse Partnership Ltd.
- [19] Amendola. L. , Depool. T Contreras. R. “La madurez como factor de éxito en la gestión integral de activos físicos “asset management PAS 55”. Universidad Politécnica de Valencia Departamento de Proyectos de Ingeniería e Innovación, PMM Institute for Learning.
- [20] Asset management -Overview, principles and terminology. “INTERNATIONAL STANDARD ISO 55000”. First edition 2014-01-15
- [21] Amendola, Luis “La planificación: pilar para alcanzar los objetivos de la gestión de activos: ISO 55000”, CEO & Managing Director, PMM Institute for Learning, España, Research Universidad Politécnica de Valencia, España, Departamento de Proyectos de Ingeniería e Innovación
- [22] MOUBRAY, John M. “MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD”. Edición en español 2004. United Kingdom.2000.
- [23] STANLEY Nowlan, HOWARD F. Heap. Reliability Centered Maintenance. Cap2 San Francisco, Ca 1980.
- [24] GUTIERREZ, Jaime Andrés, “Desarrollo de una metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) para líneas de transmisión en alta tensión”, Pereira, 2008, 94p, Tesis de pregrado, Universidad Tecnológica de Pereira, Programa de ingeniería eléctrica.

- [25] ZAPATA, Carlos J., "Confiabilidad en Ingeniería". Primera edición, Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Colombia 2011.
- [26] Richard E. Brown "Electric Power Distribution Reliability" Second edition, University of west Florida. Pensacola, Florida.
- [27] Federico Anzil. Flujo de efectivo descontado. Econlink.com.ar, Octubre Del 2009) {7 de marzo de 2017}. Disponible en: (<http://www.econlink.com.ar/flujo-de-efectivo-descontado9>)