

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA



**“METODOLOGÍA PARA ANALISIS DE RIESGOS EN EQUIPOS  
ESTABLECIENDO ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO”**

***INFORME DE COMPETENCIA PROFESIONAL***

***PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE***

***INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA***

**ROBERTO JESÚS MONTALVO CARO**

PROMOCIÓN 95 II

LIMA – PERÚ

2007

# **CONTENIDO**

Página

Prologo

## **CAPITULO 1.**

### **INTRODUCCIÓN**

1.1	Antecedentes	3
1.2	Objetivos	3
1.3	Limitaciones	4
1.4	Alcances	4
1.5	Justificación	5

## **CAPITULO 2.**

### **GENERALIDADES DE LOS CONCEPTOS DE MANTENIMIENTO, ANÁLISIS Y GESTIÓN DE RIESGOS**

2.1	Evolución del concepto de Mantenimiento	6
2.1.1	Primera Generación	7
2.1.2	Segunda Generación	7
2.1.3	Tercera Generación	8
2.1.4	Nuevas tendencias del mantenimiento. La Cuarta Generación	8

### III

2.1.5	La gestión del Riesgo	9
2.1.6	Patrones de Fallo	13
2.2	Introducción al análisis de riesgos	19
2.2.1	Definición de riesgo	19
2.2.2	El riesgo en la empresa	20
2.2.3	Definición matemática de riesgo	26
2.2.4	Probabilidad de Falla	27
2.2.5	Consecuencias de Falla	29
2.2.6	Evaluación del Riesgo	32
2.2.7	La Matriz de Riesgos	34
2.3	Actividades de Mantenimiento y reducción de Riesgos	43
2.4	Optimización del Mantenimiento	46
2.4.1	Optimización del mantenimiento para componentes activos	49
2.4.2	Tasa de Fallos después de la reparación y de las actividades de Inspección y Mantenimiento.	51
2.5	Diseño del mantenimiento	56
2.5.1	Estrategia del mantenimiento	56
2.5.2	Plan del mantenimiento	57
2.5.3	Optimización de la estrategia	58

**CAPITULO 3.****DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA**

3.1	Diagrama de flujo de la metodología para el análisis de riesgos	61
3.2	Identificación y desglose del sistema a evaluar	63
3.3	Establecer parámetros de referencia	64
3.3.1	Tabla de ocurrencias o frecuencias	64
3.3.2	Tablas de consecuencias o severidad	67
3.4	Medida del riesgo	70
3.4.1	Valoración de los riesgos	71
3.4.2	Valores posibles de riesgo	72
3.4.3	Organización y análisis de los resultados	73
3.4.4	Priorizar los niveles de riesgos por factor de cada equipo	74
3.5	Criterios de aceptabilidad	74
3.5.1	Matriz de aceptabilidad	76
3.5.2	Perfil de los riesgos	76
3.6	Administración de los riesgos	77
3.6.1	Principios básicos de la toma de decisiones	77
3.6.2	Intervención de los riesgos	78
3.6.3	Medidas de intervención	78

## **CAPITULO 4.**

### **APLICACIÓN DE METODOLOGÍA A UNA OPERACIÓN MINERA CONVENCIONAL**

4.1	Análisis preliminar	80
	4.1.1 Sistema de equipos de una operación minera convencional	81
4.2	Recogida y validación de datos	83
	4.2.1 Determinación del valor de consecuencias	84
	4.2.2 Determinación del valor de la probabilidad	84
	4.2.3 Cálculo del riesgo	84
4.3	Desarrollo del estudio	85
	4.3.1 Subsistema generación de energía casa fuerza	85
	4.3.2 Subsistema generación de aire comprimido	86
	4.3.3 Subsistema equipos mina: acarreo, carguío y transporte	88
	4.3.4 Subsistema equipos superficie: equipos pesados, unidades de transporte	90
	4.3.5 Subsistema equipos auxiliares	91

## **CAPITULO 5.**

### **ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA METODOLOGIA**

5.1	Reportes de resultados de niveles de riesgo	92
-----	---	----

## VI

5.2	Valores de riesgo asociados a cada subsistema	95
5.3	Toma de decisiones e implementación de la estrategia de mantenimiento.	99

### **CAPITULO 6.**

#### **IMPACTO ECONOMICO**

6.1	Valoración, evaluación de eficiencia	101
6.1.1	Costo de mantenimiento preventivo	101
6.1.2	Costos de mantenimiento predictivo	102
6.1.3	Cuadro comparativo de costos	103
6.1.4	Retorno de inversión (ROI)	104
	CONCLUSIONES	105
	BIBLIOGRAFÍA	107
	ANEXOS	109

## VII

- Anexo N° 1 Descripción general de una operación minera convencional, Minas Arirahua S.A.
- Anexo N° 2 Técnicas de Mantenimiento
- Anexo N° 3 Estrategias de mantenimiento
- Anexo N° 4 Análisis histórico de accidentes
- Anexo N° 5 El mantenimiento basado en el riesgo

### RELACIÓN DE FIGURAS

- FIGURA 2.1 Nuevos patrones de tasas de fallas.
- FIGURA 2.2 Principales riesgos inherentes a la empresa
- FIGURA 2.3 Elementos para determinar las probabilidades de falla
- FIGURA 2.4 Diagrama de riesgo
- FIGURA 2.5 Criterios de aceptación del riesgo
- FIGURA 2.6 Diagrama de decisión
- FIGURA 2.7 Formas de reducir el riesgo
- FIGURA 2.8 Marco de decisión para reducción de riesgos
- FIGURA 2.9 Relaciones entre fiabilidad y los programas de sustitución
- FIGURA 2.10 Variación de la tasa de fallas  $\lambda$  (m) según estrategias de mantenimiento (m1, m2, m3)
- FIGURA 2.11 Curva del costo total esperado
- FIGURA 2.12 Fiabilidad vs mantenimiento
- FIGURA 2.13 El modelo del ciclo de mantenimiento

## VIII

FIGURA 3.1 Esquema para una metodología de análisis de riesgo

FIGURA 3.2 Esquema de evaluación de riesgos

FIGURA 4.1 Esquema del sistema de equipos en una operación minera convencional

FIGURA 4.2 Subsistema generación de energía casa fuerza

FIGURA 4.3 Subsistema generación de aire comprimido

FIGURA 4.4 Subsistema equipos mina: acarreo, carguío y transporte

FIGURA 4.5 Subsistema equipos superficie: equipos pesados, unidades de transporte

FIGURA 4.6 Subsistema equipos auxiliares

FIGURA 5.1 Gráfico ordenado de ranking de riesgos de fallas en equipos

FIGURA 5.2 Gráfico de ranking de riesgos de fallas en equipos

FIGURA 5.3 Riesgo acumulado (%) y ranking de riesgos de fallas en equipos

FIGURA 5.4 Gráfico ordenado del ranking de riesgos en familia de equipos

FIGURA 5.5 Contribución de los subsistemas al riesgo global

FIGURA 5.6 Matriz de riesgos aplicada al sistema de equipos de una operación minera convencional.

### **RELACIÓN DE TABLAS**

TABLA 2.1 Objetivos del mantenimiento

TABLA 2.2 Evolución de las técnicas de mantenimiento

TABLA 2.3 Principales riesgos inherentes al tipo de empresa

TABLA 2.4 Fuentes de información para la evolución de las CdF

TABLA 2.5 Matriz de riesgos

TABLA 2.6 Niveles de consecuencias de falla

TABLA 2.7 Niveles de probabilidades de falla

TABLA 2.8 Cuantificación de la matriz de riesgos

TABLA 3.1 Tabla para valoración de frecuencias

TABLA 3.2 Valores de riesgo para el sistema

TABLA 4.1 Subsistemas a estudiar

TABLA 4.2 Hoja de análisis para el subsistema casa fuerza

TABLA 4.3 Hoja de análisis para el subsistema de generación de aire comprimido

TABLA 4.4 Hoja de análisis para el subsistema de equipos mina

TABLA 4.5 Hoja de análisis para el subsistema de equipos superficie

TABLA 4.6 Hoja de análisis para el subsistema de equipos auxiliares

TABLA 5.1 Ranking de riesgos de fallas en equipos

TABLA 5.2 Familia de equipos del sistema de una operación minera convencional

TABLA 6.1 Cuadro de costos de mantenimiento preventivo

TABLA 6.2 Cuadro de costos de mantenimiento predictivo

TABLA 6.3 Cuadro de costos comparativo

**GLOSARIO DE TERMINOS**

## PRÓLOGO

El primer paso para la definición de medidas de prevención de fallas en equipos, frente a una posible interrupción del proceso productivo, es el de identificar, conocer, evaluar y valorar plenamente, tanto los posibles riesgos de fallas potenciales a que pueden estar sometidos los equipos en el proceso productivo, así como sus consecuencias, es decir, haber realizado un análisis de riesgo.

**En el capítulo 1** se presenta la alternativa metodológica que permite definir criterios (valorar) de las posibles fallas en equipos que puedan afectar el proceso productivo, como el momento de establecer la estrategia de mantenimiento de tal manera que se disminuya el grado inherente de falla de los mismos a un costo aceptable. Se dan los objetivos, limitaciones, alcances y justificación de la metodología presentada.

**En el capítulo 2** se desarrolla la evolución de los conceptos de mantenimiento, análisis de riesgos y las actividades de mantenimiento que conlleven a la optimización de las estrategias.

En el **capítulo 3**, presentaré el desarrollo de la metodología, el diagrama de flujo de la metodología a seguir.

En el **capítulo 4** se desarrolla la metodología aplicada a equipos de una operación minera convencional, dividiendo la funcionabilidad de los equipos principales que intervienen en el proceso productivo en subsistemas.

En el **capítulo 5**, se realiza el análisis de los resultados de la aplicación de la metodología mediante reportes de niveles de riesgo, valores de riesgo y su representación en la matriz de riesgos donde se definirán la criticidad de intervención o desarrollo de la estrategia adecuada de mantenimiento de los equipos.

En el **capítulo 6**, se estima el impacto económico de la aplicación de la metodología al establecer las estrategias adecuadas de mantenimiento en función al grado de criticidad de los niveles de riesgo de afectación al proceso productivo.

# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUCCIÓN**

### **1.1 ANTECEDENTES**

La historia de gestión de mantenimiento durante los últimos 25 años, ha cambiado más que cualquier otra disciplina de gestión. Los cambios son debido a un aumento grande en el número y variedad de recursos físicos (planta, equipos y edificios), las limitaciones de los sistemas de mantenimiento aumentaron claramente, no importa cuan informatizados están.

Actualmente la Gestión de Mantenimiento está saliendo cada vez más en las discusiones serias de la productividad.

La metodología para análisis presentado, brinda los conceptos y herramientas básicas del nuevo enfoque que a nivel mundial se está dando en el área de mantenimiento.

### **1.2 OBJETIVO**

Desarrollar una alternativa metodológica para el análisis de riesgos que permita priorizar las prevenciones de fallas en equipos y asegurar el proceso productivo con

niveles adecuados de disponibilidad, confiabilidad y operatividad a un costo aceptable, determinando la estrategia adecuada de mantenimiento de tal manera que se disminuya el riesgo de falla que afectaría al proceso productivo; por otro lado, permite definir criterios de valoración al momento de evaluar los riesgos en fallas de equipos.

### **1.3 LIMITACIONES**

La metodología solo aplica para riesgos de fallas en equipos de tipo técnico sobre el proceso de gestión de mantenimiento y sólo considera la afectación propia a la operación dentro de las posibles consecuencias. Es decir que no se consideran agentes generadores de riesgo de tipo natural, ni factores de vulnerabilidad como víctimas, daño al medio ambiente, y otros. Lo anterior, debido a que se asume el criterio de que, ante una posible falla del equipo, la preocupación del área de mantenimiento, debe definir las medidas preventivas y de mitigación que le permitan evitar un alto impacto sobre el proceso productivo, o la rápida rehabilitación del mismo en caso de ser afectado.

### **1.4 ALCANCES**

La metodología es aplicable a toda la industria en general orientada en el servicio de mantenimiento a equipos y maquinarias con niveles de riesgo de tipo técnico como un ente proveedor que debe apoyar al proceso productivo garantizando niveles óptimos de disponibilidad, confiabilidad, operatividad.

## **1.5 JUSTIFICACION**

Se justifica el uso de la metodología para análisis de riesgos, ya que nos permitirá priorizar las prevenciones de fallas en equipos optimizando los costos de mantenimiento al establecer una adecuada estructura de gestión, programación, planificación y control efectivo en la preservación de los equipos.

Esta estructura de la metodología acompañada de un buen liderazgo y un buen equipo de mantenimiento estará en condiciones de garantizar y obtener los logros previstos en las empresas, también es importante destacar el soporte gerencial y logístico.

## **CAPITULO 2**

### **GENERALIDADES DE LOS CONCEPTOS DE MANTENIMIENTO, ANÁLISIS Y GESTIÓN DE RIESGOS**

#### **2.1 EVOLUCION DEL CONCEPTO DE MANTENIMIENTO**

Podemos encontrar infinidad de definiciones diferentes para el concepto de mantenimiento según los criterios de cada autor. Intentando uniformizar diferentes criterios, podemos definir el mantenimiento como el conjunto de actividades que se realizan sobre un componente, equipo o sistema para asegurar que continúe desempeñando las funciones que se esperan de él, dentro de su contexto operacional.

El objetivo fundamental del mantenimiento, por tanto, es preservar la función y la operatividad, optimizar el rendimiento y aumentar la vida útil de los activos, procurando una inversión óptima de los recursos.

Este enfoque del mantenimiento es resultado de una evolución importante a través del tiempo.

John Moubray (1997) en su libro RCM II distingue entre tres generaciones diferentes de mantenimiento. Cada una de las cuales representa las mejores prácticas utilizadas en una época determinada.

### **2.1.1 Primera Generación**

La primera generación cubre el período entre 1930 y la Segunda Guerra Mundial. En esta época la industria estaba poco mecanizada y por tanto los tiempos fuera de servicio no eran críticos, lo que llevaba a no dedicar esfuerzos en la prevención de fallos de equipos. Además, al ser maquinaria muy simple y normalmente sobredimensionada, los equipos eran muy fiables y fáciles de reparar, por lo que no se hacían revisiones sistemáticas, salvo las rutinarias de limpieza y lubricación, el único mantenimiento que se realizaba era el de "reparar cuando falla", es decir, mantenimiento correctivo.

### **2.1.2 Segunda Generación**

La Segunda Guerra Mundial provocó un fuerte aumento de la demanda de toda clase de bienes. Este cambio unido al acusado descenso en la oferta de mano de obra que causó la guerra, aceleró el proceso de mecanización de la industria. Conforme aumentaba la mecanización, la industria comenzaba a depender de manera crítica del buen funcionamiento de la maquinaria. Esta dependencia provocó que el mantenimiento se centrara en buscar formas de prevenir los fallos y por tanto de evitar o reducir los tiempos de parada forzada de las máquinas. Con este nuevo enfoque del mantenimiento, apareció el concepto de mantenimiento preventivo. En la década de los 60, éste consistía fundamentalmente en realizar revisiones periódicas a la maquinaria a intervalos fijos.

Además se comenzaron a implementar sistemas de control y planificación del mantenimiento con el objetivo de controlar el aumento de los costes de mantenimiento y planificar las revisiones a intervalos fijos.

### **2.1.3 Tercera Generación**

Se inició a mediados de la década de los setenta, cuando se aceleraron los cambios a raíz del avance tecnológico y de las nuevas investigaciones. La mecanización y la automatización siguieron aumentando, se operaba con volúmenes de producción muy elevados, cobraban mucha importancia los tiempos de parada debido a los costos por pérdidas de producción. Alcanzó mayor complejidad la maquinaria y aumentaba nuestra dependencia de ellas, se exigían productos y servicios de calidad, considerando aspectos de seguridad y medio ambiente y se consolidó el desarrollo del mantenimiento preventivo.

### **2.1.4 Nuevas tendencias del mantenimiento. La Cuarta Generación**

En los últimos años hemos vivido un crecimiento muy importante de nuevos conceptos y metodologías aplicadas a la gestión del mantenimiento. Hasta finales de la década de los 90, los desarrollos alcanzados en la 3ª generación del mantenimiento incluían:

- Herramientas de ayuda a la decisión, como estudios de riesgo, modos de fallo y análisis de causas de fallo.
- Nuevas técnicas de mantenimiento, como el monitoreo de condición.
- Equipos de diseño, dando mucha relevancia a la fiabilidad y mantenibilidad.

- Un cambio importante en pensamiento de la organización hacia la participación, el trabajo en equipo y la flexibilidad.

A estos usos, se han ido añadiendo nuevas tendencias, técnicas y filosofías de mantenimiento hasta nuestros días, de tal forma que actualmente podemos hablar de una cuarta generación del mantenimiento.

El nuevo enfoque se centra en la eliminación de fallos utilizando técnicas proactivas. Ya no basta con eliminar las consecuencias del fallo, sino que se debe encontrar la causa de ese fallo para eliminarlo y evitar así que se repita.

Asimismo, existe una preocupación creciente en la importancia de la mantenibilidad y fiabilidad de los equipos, de manera que resulta clave tomar en cuenta estos valores desde la fase de diseño del proyecto.

Otro punto importante es la tendencia a implantar sistemas de mejora continua de los planes de mantenimiento preventivo y predictivo, de la organización y ejecución del mantenimiento.

#### **2.1.5 La Gestión del Riesgo**

Cada día cobra más importancia la identificación y control de los posibles sucesos que presentan una baja probabilidad pero consecuencias graves, sobretodo en organizaciones que operan en industrias con riesgo. El mantenimiento se está viendo como un participante clave en este proceso. En el pasado, este tipo de sucesos se controlaban simplemente con una extensión

de los Sistemas de Gestión de Seguridad y Medio Ambiente implantados en cada empresa. Sin embargo, existe una creciente percepción de que la aplicación de estos sistemas de gestión a los sucesos de “baja probabilidad / consecuencias graves” no es efectiva, por lo que es necesario desarrollar otras metodologías.

Se identifican los siguientes problemas asociados a este tipo de metodologías:

- Dificultad para identificar todos los factores potenciales de riesgo.
- Problemas con las incertidumbres en los modelados de los sistemas, especialmente para obtener datos probabilísticos realistas para eventos de baja frecuencia.
- Problemas para determinar las relaciones causa-efecto. A menudo éstas no son demostrables.
- La incertidumbre provocada por el factor humano, a menudo no se puede modelar.
- Problemas de complejidad y acoplamiento. El acoplamiento y la complejidad interactiva entre los componentes de un sistema anulan cualquier modelo completo de fallos potenciales de un sistema.

El valor de la vida. El problema moral de asignar un valor monetario a la vida humana.

En otros estudios, el problema fundamental es que las probabilidades que se asignan a los modos de fallo individuales están basadas en análisis no corroborados experimentalmente. Esto es especialmente cierto para las

incertidumbres que aparecen debido a relaciones causa-efecto ocultas o desconocidas.

Con el objetivo de superar estas debilidades, las “Organizaciones Altamente Confiables” han desarrollado una serie de puntos culturales clave dentro de la organización a tener en cuenta:

- Preocupación ante los fallos. Cualquier fallo debe ser tenido en cuenta, por pequeño que sea, ya que la coincidencia de pequeños fallos en un mismo punto puede traer consecuencias graves.

Reticencia a simplificar interpretaciones, teniendo en cuenta que el mundo real es complejo e impredecible.

Sensibilidad en las operaciones. Se debe asegurar que los operarios de primera línea, donde se realiza el trabajo, sean conscientes de la situación y avisen cuando algo no va bien.

Compromiso de resistencia. Se deben desarrollar capacidades para recuperarse ante los errores que ocurran.

Respeto de la experiencia. Las decisiones se toman en la primera línea de producción y la autoridad recae sobre la persona con más experiencia, independientemente de su lugar o nivel dentro de la organización.

Asimismo podemos indicar una serie de funciones que utilizan las organizaciones para defenderse de los eventos de baja probabilidad y consecuencias graves:

- Crear una conciencia y un conocimiento del riesgo.
- Proporcionar una guía clara de cómo operar de manera que se evite el riesgo.

- Utilizar advertencias y alarmas cuando el peligro es inminente.
- Restablecer el sistema a una situación estable cuando este se encuentra en una situación anormal.

Interponer barreras de seguridad entre el accidente y las pérdidas potenciales.

- Contener y eliminar el accidente, si sobrepasa la barrera.
- Proporcionar vías de escape y rescate por si el accidente no es contenible.

Algunas vías para intentar paliar las consecuencias graves de este tipo de eventos pueden ser:

• **Medidas severas**

Elementos automáticos de seguridad

Barreras físicas

Avisadores y alarmas

Elementos de corte

Equipos de Protección Personal, Etc.

• **Medidas suaves**

Legislación

Reglas y procedimientos

Programas de mantenimiento

Entrenamiento

Informes y ejercicios

Controles Administrativos

Supervisión

Para conseguir un control efectivo de los sucesos de baja frecuencia y graves consecuencias desde el punto de vista del mantenimiento se necesita establecer una extensa capa de defensas contra el riesgo de manera efectiva. Para ello, no basta simplemente con la utilización de una herramienta simple de manejo del riesgo como RCM (Reliability-Centered Maintenance), PMO (Plant Maintenance Optimization), QRA (Quantitative Risk Analysis), PSA (Probabilistic Safety Assessment) y otras, sino que habrá que complementarlas con estudios específicos para cada caso.

#### **2.1.6 Patrones de Fallo**

Las nuevas investigaciones están cambiando muchas de las tradicionales creencias sobre la relación existente en una máquina entre el envejecimiento y el fallo. En particular, se ha demostrado que para muchos equipos existe muy poca relación entre el tiempo de operación y la probabilidad de fallo.

El enfoque inicial del mantenimiento suponía que la probabilidad de que una máquina falle aumenta según el tiempo de operación, siendo mayor la probabilidad de fallo en la "vejez" de la máquina (patrón de fallo B en la figura 2.5).

La segunda generación de mantenimiento introdujo el concepto de "mortalidad infantil". De esta forma la tasa de fallos de una máquina puede ser representada con una curva de bañera, existiendo, por tanto, más probabilidad de fallo durante el principio y el final de su vida útil (patrón de fallo A en la figura

2.5). Sin embargo, en el mantenimiento actual se ha demostrado que podemos definir seis patrones diferentes de tasa de fallos, según el tipo de máquina que estemos utilizando. Tener en cuenta el patrón al que se ajusta cada elemento es fundamental si se quiere conseguir una óptima planificación del mantenimiento.

Debemos estar seguros de que el mantenimiento que ha sido planificado es el adecuado, ya que de nada sirve realizar el trabajo planificado de manera correcta, si éste no es el más adecuado.

### NUEVOS PATRONES DE TASA DE FALLOS

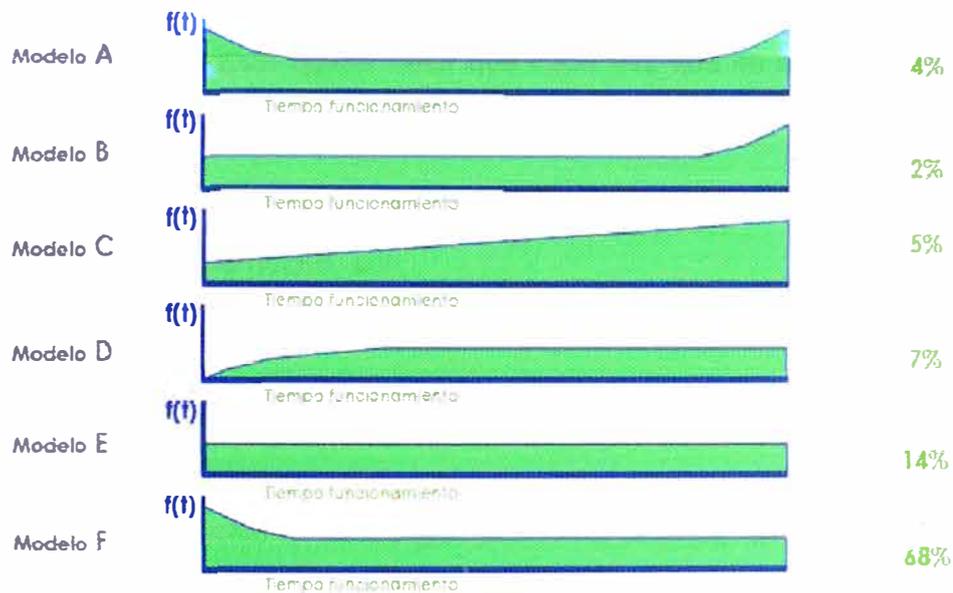


Figura 2.1 - Nuevos Patrones de Tasas de Fallas

Para los patrones de Fallo "A", "B" y "C", la probabilidad de fallo aumenta con la edad hasta alcanzar un punto en el que es conveniente reemplazar el componente antes de que falle y así reducir su probabilidad de fallo. En el caso de los componentes que presentan una probabilidad de fallo del "modelo E", reemplazar el componente no mejorará en ningún caso su fiabilidad, ya que el nuevo elemento tendrá la misma probabilidad de fallo que el antiguo. Si el patrón de fallo al que se ajusta el componente es el "F", reemplazar el elemento a intervalos fijos por un componente nuevo, no sólo no mejorará la fiabilidad, sino que aumentará la probabilidad de fallo, ya que en la "infancia" presenta más mortalidad que en la vejez.

En el gráfico se observa que más del 50% de los componentes presentan fallos en la "infancia". Esto quiere decir que cada vez que se repara o reemplaza un equipo, las posibilidades de fallo prematuro debido a esa operación de mantenimiento son muy elevadas. Algunas de las posibles explicaciones que se pueden dar a este hecho, son:

- *Errores humanos.* La tarea de reemplazo o reparación no se completa de manera adecuada por falta de experiencia o conocimiento del personal de mantenimiento.
- *Errores del sistema.* El equipo se vuelve a poner en servicio tras haberle realizado una operación de mantenimiento de alto riesgo y no haber revisado dicha operación.

- *Errores de diseño.* La capacidad de diseño del componente está demasiado cerca del rendimiento que se espera de él, por lo que las piezas de menos calidad pueden fallar cuando se le exige dicho rendimiento.
- *Errores de piezas.* Se suministran piezas incorrectas o de baja calidad.

Por lo visto anteriormente, está claro que el mantenimiento actual debe centrarse en reducir las operaciones de mantenimiento provocadas por fallos que se ajustan al “modelo F”. Es decir, fallos ocurridos en la “infancia” de los equipos. Para los elementos que ajusten su tasa de fallos a este patrón “F”, un mantenimiento planificado a intervalos fijos aumentará las posibilidades de fallo, ya que el equipo nuevo presentará más probabilidad de fallo que el antiguo. Por ese motivo existe una tendencia generalizada a “mantener lo mínimo posible”, debido a que cualquier operación de mantenimiento realizada puede aumentar la probabilidad de fallo.

Otra posibilidad, es centrarse en reducir de manera global las probabilidades de fallo sobre todos los modelos. La forma de realizar esto, es mediante la utilización de un Mantenimiento Proactivo, es decir buscar la forma de eliminar los fallos, más que eliminar sus consecuencias. Para eliminar los fallos, hay que eliminar sus causas, lo que implica conocerlas. Existen herramientas como el Análisis Causa-Raíz que ayudan a identificar y eliminar las causas de los fallos, aunque en muchas ocasiones se utiliza como una herramienta reactiva más que proactiva.

La eliminación proactiva de las causas de fallo implica la utilización de metodologías y herramientas que proporcionen:

- Asegurar que los equipos utilizados han sido adecuadamente diseñados para la operación requerida y que a la hora de su adquisición se han tenido en cuenta su mantenibilidad, y coste de ciclo de vida, más que minimizar la inversión. Esto requiere una interacción importante entre los ingenieros y el personal de mantenimiento.
- Asegurar que los equipos están operando dentro de sus condiciones de diseño. Esto requiere un aumento en la disciplina del personal de producción a la hora de ajustarse a los estándares, documentos y procedimientos de operación.
- Asegurar un correcto funcionamiento de la gestión de los repuestos e inventarios.
- Asegurar que los procesos de reparación funcionan correctamente, de tal forma que se asegure que los equipos son reparados correctamente a la primera. Esto requiere un alto grado de atención en los detalles y una mayor disciplina en la organización.

A modo de resumen, en las siguientes gráficas se presenta como han ido evolucionando las expectativas y técnicas del mantenimiento durante el último siglo:

	Primera Generación	Segunda Generación	Tercera Generación	Cuarta Generación
<b>OBJETIVOS</b>	Realizarlo cuando se produzca una falla	Mayor disponibilidad	Mayor disponibilidad y fiabilidad	Mayor disponibilidad y fiabilidad
		Mayor vida de operación	Mayor seguridad	Mayor seguridad
		Menores costos	Mayor calidad de servicio	Mayor calidad del producto
			Respeto al Medio Ambiente	Respeto al Medio Ambiente
			Mayor vida de operación	Mayor vida de los equipos
			Menores costos	Mayor mantenibilidad
				Eficiencia de costos
				Patrones de fallas
			Eliminación de las fallas	
	<b>1940 - 1960</b>	<b>1960 - 1980</b>	<b>1990</b>	<b>200 - 2006</b>

Tabla 2.1 - Objetivos del mantenimiento

	Primera Generación	Segunda Generación	Tercera Generación	Cuarta Generación
<b>TÉCNICAS DE MANTENIMIENTO</b>	Mantenimiento correctivo	Revisiones periódicas	Monitoreo de condición	Monitoreo de condición
		Utilización de grandes ordenadores	Basado en fiabilidad y mantenibilidad	Modos de falla y causas de falla
		Sistemas de control y planificación del mantenimiento	Estudios de riesgo	Polivalencia y trabajo en equipo / Mant. Autónomo
			Utilización de pequeños y rápidos ordenadores	Estudio fiabilidad y mantenibilidad durante el proyecto
			Modos de fallas y causas de fallas	Mantenimiento preventivo
			Sistemas expertos	Gestión del riesgo
			Polivalencia y trabajo en equipo	Sistemas de mejora continua
				Mantenimiento predictivo
				Mantenimiento proactivo
			Grupos de mejora y seguimiento de acciones	
	<b>1940 - 1960</b>	<b>1960 - 1980</b>	<b>1990</b>	<b>200 - 2006</b>

Tabla 2.2 - Evolución de las técnicas de mantenimiento

## **2.2 INTRODUCCION AL ANALISIS DE RIESGOS**

El concepto del riesgo ha tomado mucha importancia en los últimos años, siendo común el uso de términos como “exposición al riesgo”, “gestión de riesgos”, “análisis de riesgos”, etc. Parece que cuanto más conocemos sobre el mundo en el que vivimos, más aprendemos sobre los peligros existentes. Los avances tecnológicos nos permiten ser conscientes de los posibles desastres que podrían ocurrir.

Esta mayor conciencia del riesgo provoca que cada vez haya más interés en mitigarlo o gestionarlo mediante diferentes tipos de análisis. Aún así, una única cosa es segura, es imposible eliminar todos los riesgos por completo y en muchos casos no sería ni aconsejable.

Un ejemplo claro, serían las empresas. Una empresa es una organización que toma riesgos para obtener una ventaja competitiva respecto a sus competidores y un

**Mantenimiento Basado en el Riesgo**

### **2.2.1 Definición de Riesgo**

Toda actividad conlleva un riesgo, y una actividad exenta de él representa inmovilidad total. Pero aún así, si todos nos quedáramos en casa sin hacer nada y se detuviera toda actividad productiva y de servicios, aún existirían riesgos, no cabe duda que menores, pero existirían. El riesgo cero no existe.

Podemos definir el riesgo como: La probabilidad de que un peligro (causa inminente de pérdida) asociado a una actividad determinada, ocasione un incidente con consecuencias factibles de ser estimadas.

La Real Academia de la Lengua nos proporciona una definición más genérica:

1. Contingencia o proximidad de un daño.
2. Cada una de las contingencias que pueden ser objeto de un contrato de seguro.

De forma subjetiva, el riesgo se puede describir como la percepción de un peligro. La forma de percepción que tienen las personas de los peligros influye en la percepción que tienen del riesgo asociado. Así, las personas están dispuestas a aceptar riesgos más elevados cuando ellas mismas tienen control sobre el proceso. De esta forma, las personas se sienten mucho más seguras conduciendo un automóvil que viviendo cerca de una central nuclear aunque la tasa de mortalidad sea mucho mayor en el caso de los accidentes de automóviles. Esto ocurre porque la conducción del automóvil es algo que pueden controlar.

### **2.2.2 El Riesgo en la Empresa**

Dentro de la actividad empresarial podemos hacer una clasificación de los principales tipos de riesgos que podemos encontrar:

- **Estratégicos.** Son riesgos relacionados con las decisiones estratégicas de la organización (adaptación a cambios de entorno, gestión de alianzas, decisiones sobre los negocios en los que se quiere entrar...)
- **De mercado.** Influencia de variables de mercado del negocio en resultados futuros (demanda, competencia, costo de factores....)
- **Financieros.** Impacto sobre el rendimiento financiero de la empresa producto de su apalancamiento financiero, su posición con respecto al tipo de cambio y a los valores (Riesgo por apalancamiento, riesgo cambiario, riesgo por posición en valores, riesgo por liquidez y riesgo crediticio).
- **Operativos.** Derivados del desarrollo práctico del negocio (fallos técnicos/humanos, infrautilización de recursos, sistemas de información/control, tecnología). Este riesgo de pérdida causado por fallas en procesos, personas, sistemas internos y eventos externos se puede minimizar con una estrategia de administración de riesgo.
- **Regulatorios/Legales.** Relacionados con la inestabilidad de las reglas del juego en la regulación, fiscalidad y contabilidad.
- **Crédito.** Incumplimiento de compromisos de cobro.

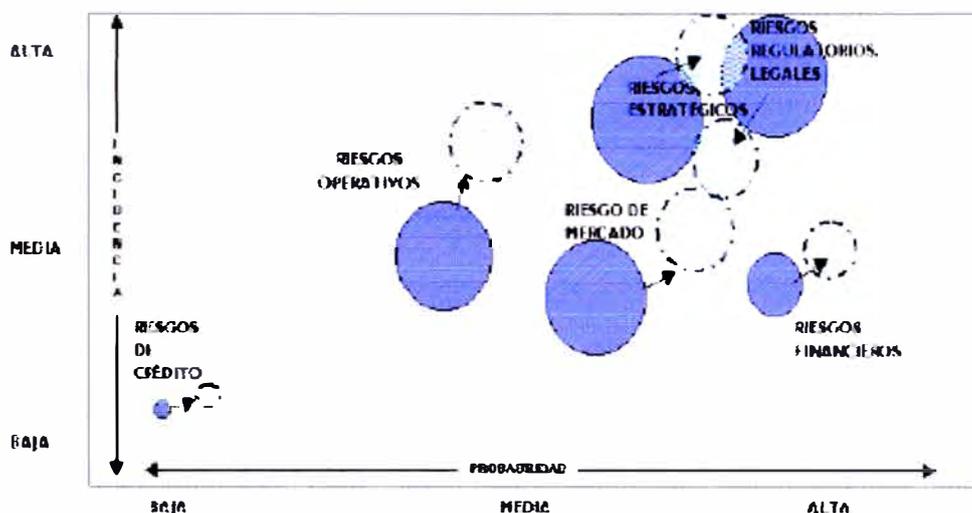


Figura 2.2 - Principales riesgos inherentes a la empresa.

Una empresa tomará diferentes actitudes ante el riesgo según este afecte a su negocio. De esta forma se pueden diferenciar diferentes niveles de riesgo:

- **Riesgos a eliminar** (el riesgo como "peligro"). Son riesgos que llevan asociado un peligro importante, siendo ajenos a las competencias esenciales de la empresa. Estos riesgos pueden amenazar la viabilidad de la empresa (baja probabilidad y alta incidencia). Tal como este riesgo a que se produzca una catástrofe en una planta de generación de electricidad.
- **Riesgos a gestionar** (el riesgo como "oportunidad"). Riesgos que están vinculados a las actividades de la empresa. Presentan una media/alta probabilidad y muy diferente incidencia. Tal como este tipo de riesgo es el asociado al costo de la energía en el pool o los tipos de interés. Esta clase de riesgo se debe gestionar con el objetivo de sacar el máximo beneficio para la empresa.

- **Riesgos a asumir** (*el riesgo como negocio*). Son riesgos inherentes a las actividades de la empresa, son consecuencia del tipo de negocio y de su regulación. Tal como esta clase de riesgo es el asociado a las decisiones estratégicas (entrada en determinados negocios).

El sistema empresa está compuesto por cuatro subsistemas que son: Personas, Equipos, Material, Entorno.

Estos subsistemas, bien interrelacionados e interactuando de manera armoniosa dan lugar a los resultados operacionales y financieros que la empresa ha planeado obtener.

La empresa necesita de estos cuatro elementos o subsistemas por lo que siempre requieren especial atención y cuando un riesgo no es controlado, puede dañar a alguno de los subsistemas o a todos ellos, como por ejemplo, un incendio o una demanda judicial.

En los cuatro elementos mencionados existen riesgos específicos que se deben controlar en forma efectiva para que estos no produzcan pérdidas.

Estos tienen relación con la actividad específica de cada empresa, ya que los riesgos de una empresa de transporte son diferentes a una empresa eléctrica, minera, de servicios, metalmeccánica, etc. Aunque por supuesto existen riesgos comunes en todas las actividades. Estos riesgos específicos a cada actividad se llaman riesgos inherentes.

Los riesgos en general, se pueden clasificar en riesgo puro y riesgo especulativo.

El riesgo especulativo es aquel riesgo en el cual, existe la posibilidad de ganar o perder, como por ejemplo, las apuestas o los juegos de azar. En cambio el riesgo puro es el que se da en la empresa y existe la posibilidad de perder o no perder pero jamás de ganar.

El riesgo puro en la empresa a su vez se clasifica en:

- *Riesgo inherente*
- *Riesgo incorporado*

El *riesgo inherente* es aquel riesgo

que por su naturaleza no se puede separar de la situación donde existe. Es propio del trabajo a realizar. Es el riesgo propio de cada empresa de acuerdo a su actividad.

En la siguiente tabla se muestran riesgos inherentes en las empresas:

<b>TIPO DE EMPRESA</b>	<b>PRINCIPALES RESGOS INHERENTES</b>
Transporte	Choques, colisiones, volcadura
Metalmecánica	Quemaduras, golpes, cortes
Construcción	Caída distinto nivel, golpes, atrapamiento
Minería	Derrumbres, explosiones, caídas, atrapamiento
Servicios	Choque, colisiones, lumbago, caídas

**Tabla 2.3 - Principales riesgos inherentes al tipo de empresa.**

El *riesgo incorporado* es aquel riesgo que no es propio de la actividad, sino que es producto de conductas poco responsables de un trabajador, el cual asume otros riesgos con objeto de conseguir algo que cree que es bueno para el y/o

para la empresa, como por ejemplo ganar tiempo, terminar antes el trabajo para destacar, demostrar a sus compañeros que es mejor, etc.

Los siguientes son ejemplos de riesgos incorporados:

- Clavar con un alicate o llave y no con un martillo
- Subir a un andamio sin amarrarse
- Sacar la protección a un esmeril angular
- Levantar o transportar sobrepeso
- Transitar a exceso de velocidad
- No reparar un fallo mecánico de inmediato
- Trabajar en una máquina sin protección en las partes móviles

Los riesgos inherentes en una empresa se deben controlar y/o eliminar siempre que sea posible, ya que al estar en directa relación con la actividad de la empresa, si ésta no los asume no puede existir. Los riesgos incorporados se deben eliminar de inmediato. Cuando se sale de nuestro control produce accidentes que provocan muertes, lesiones incapacitantes, daños a los equipos, materiales y/o medio ambiente, todo esto, provoca pérdidas para la empresa, ya que ocurrido un accidente, la empresa debe:

1. Contratar un nuevo trabajador y prepararlo para esa actividad.
2. Redistribuir los trabajadores en el área.
3. Pérdidas de tiempo
4. Aumentos de seguro
5. Comprar o reparar la maquinaria y/o equipos

6. Pago de indemnizaciones

7. Perdida de tiempo de los trabajadores involucrados en el accidente

### **2.2.3 Definición matemática de riesgo**

*Se define el riesgo, como la esperanza matemática de la pérdida.*

Si consideramos un suceso con una probabilidad de ocurrencia “P” y un daño o consecuencia “C”, el riesgo vendrá definido por el producto de esta probabilidad por el efecto o magnitud del daño.

$$\text{Riesgo} = P \times C \text{ Siendo } 0 \leq P \leq 1$$

Una definición equivalente se obtiene sustituyendo la probabilidad por la frecuencia y la consecuencia por la severidad:

$$\text{Riesgo} = F \times S$$

En este caso, “F” representa la esperanza matemática de la pérdida en un determinado periodo de tiempo o lo que es lo mismo, la probabilidad de ocurrencia de la pérdida en dicho periodo.

Estos efectos se pueden medir en distintas unidades: en términos económicos, en pérdida de vidas humanas, en daños personales, etc. Así si un accidente se produce con una frecuencia de una vez cada 5 años y provoca en cada ocasión quince muertos, el riesgo será de:

$$\text{Riesgo} = 1/5 \times 15 = 3 \text{ muertos / año}$$

Si para este mismo accidente, las pérdidas económicas ascienden a 300 millones de dólares, el riesgo será:

$$\text{Riesgo} = 1/5 \times 300 = 60 \text{ millones de dólares / año}$$

Obviamente, para reducir el riesgo se puede actuar sobre las dos variables, bien reduciendo las probabilidades de ocurrencia, bien reduciendo la magnitud esperable del daño, bien actuando sobre las dos. Disminuir la probabilidad es PREVENCIÓN y disminuir la gravedad de los efectos es PROTECCIÓN.

En primer lugar, es preciso identificar todos y cada uno de los peligros presentes en una instalación industrial y después conocer la frecuencia con la que ocurrirá un evento (en el contexto del análisis de riesgos será siempre un evento no deseado), y la magnitud del daño que se producirá. Esta tarea es muy costosa en términos de tiempo y recursos a emplear. De hecho, algo tan aparentemente simple como conocer estas dos magnitudes ha obligado al desarrollo de un sinfín de metodologías encaminadas a su estimación más o menos precisa.

#### **2.2.4 Probabilidad de Falla**

En instalaciones en las que se quiere optimizar la confiabilidad del proceso productivo y evitar accidentes de graves consecuencias, se hace hoy imprescindible conocer la probabilidad de que éstos acontezcan durante la vida del sistema. Ello obliga a la aplicación de técnicas de cuantificación del riesgo, como los árboles de sucesos y los árboles de fallos, los cuales precisan en último término del conocimiento probabilístico de fallos y errores de sucesos básicos, a fin de poder establecer la adecuación e idoneidad de las medidas preventivas.

Por estos motivos, los estudios de fiabilidad adquieren cada vez mayor relevancia en la actividad de prevención de los técnicos de seguridad y en general de los responsables de procesos u operaciones que puedan desencadenar situaciones críticas.

En este subcapítulo se exponen los métodos más comunes para la evaluación de las probabilidades de fallos, así como sus debilidades y fortalezas.

También se describe como aplicar los métodos propuestos para la evaluación práctica de la PdF durante el análisis.

La probabilidad de falla se define como la probabilidad de que ocurra el fallo en un intervalo de tiempo definido T.

El intervalo de tiempo deberá ser fijo durante todo el análisis (si no se hace así, los riesgos no podrán ser comparados entre ellos o según algún otro criterio de aceptación).

Se pueden utilizar varios métodos para calcular la PdF:

- 1. Enfoque analítico:** Consiste en estimar la PdF utilizando modelos matemáticos y/o datos estadísticos para los procesos de degradación.
- 2. Solicitación experta:** Consiste en dejar al equipo de expertos en RBM (compuesto por personal clave de la planta con conocimiento experto de los equipos) evaluar la PdF.

En la mayoría de los casos prácticos se utiliza una combinación de ambos métodos. La Figura 2.9 muestra como la información histórica se combina con previsiones para obtener la probabilidad de fallo.

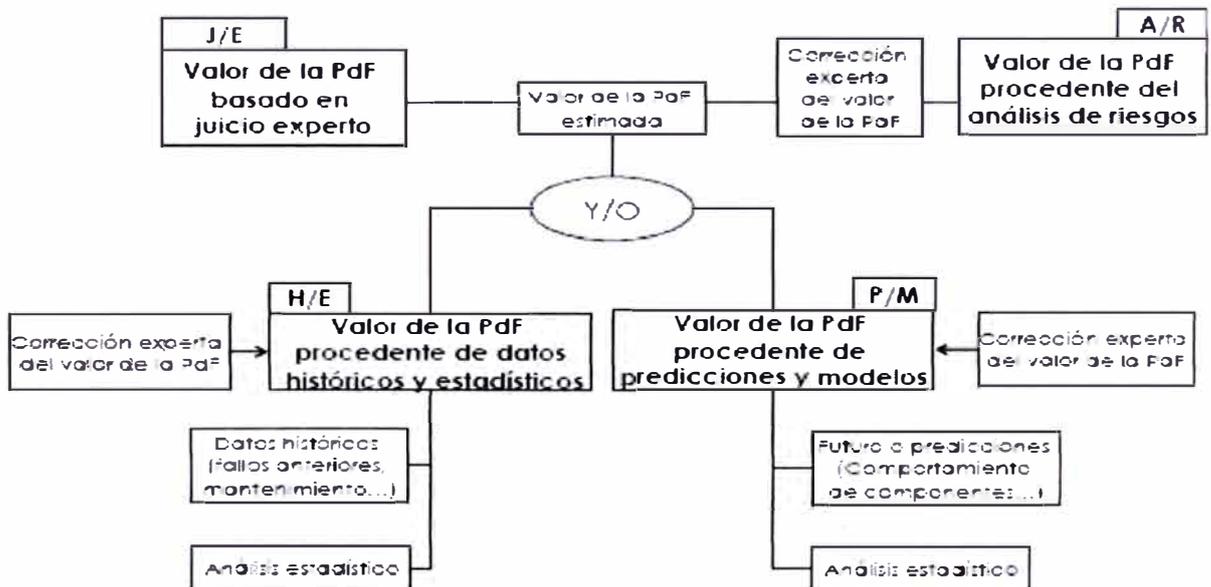


Figura 2.3 - Elementos para determinar las probabilidades de falla

### 2.2.5 Consecuencias de Falla

La valoración de las consecuencias de fallo (CdF) tiene como objetivo principal evaluar el impacto de los fallos. Si la ocurrencia de un fallo tiene consecuencias importantes, se realizarán esfuerzos muy considerables para eliminar o minimizar dichas consecuencias. Esto es importante en el caso de que el fallo pueda provocar interrupción en la producción o que pueden causar daños

secundarios. Por otro lado, si el fallo únicamente tiene unas consecuencias menores, puede ser que no se realice ninguna acción proactiva y simplemente se corrija el fallo cada vez que ocurre.

Este enfoque en las consecuencias conlleva la aplicación de una serie de etapas:

1. Evaluar primeramente los efectos de cada fallo y clasificarlos en diferentes categorías de consecuencias.
2. El segundo paso será descubrir si se puede realizar tareas proactivas que reduzcan las consecuencias del fallo hasta unos niveles que sean aceptadas (acción técnicamente factible).
3. Si la acción es técnicamente factible, entonces se debe evaluar si aplicándola se consigue reducir las consecuencias del fallo asociado hasta un nivel que justifique el coste directo e indirecto de realizar la acción proactiva.

Al igual que para las probabilidades de fallo, el análisis de las consecuencias de fallo se puede basar en modelos físicos, métodos estadísticos, valoración experta o una combinación de todos ellos.

Para el desarrollo de esta metodología, vamos a evaluar las consecuencias de fallo en la categoría de negocio de acuerdo con el efecto del fallo:

Impacto económico que ocasiona el fallo. Pueden ser costes directos como interrupción de la producción, horas hombre requeridas para la producción, piezas de repuesto, etc. o costes indirectos.

Por tanto, para cada modo de fallo se deben evaluar las consecuencias económicas o de interrupción al proceso productivo.

Si tenemos como objetivo, realizar una optimización de los costes de mantenimiento resulta imprescindible evaluar las consecuencias que el fallo provoca en el negocio (consecuencias económicas).

El método a utilizar para calcular las consecuencias del fallo (modelos físicos, métodos estadísticos o valoración experta) depende de las herramientas disponibles.

Hemos visto anteriormente que las probabilidades de fallo (PdF) pueden ser calculadas basándose en datos de otras compañías. Sin embargo, este método no suele ser adecuado para evaluar las consecuencias de fallo (CdF), debido a que las consecuencias económicas dependen de las condiciones de operación, de la distribución y situación de la planta, etc. Por lo tanto no existen modelos o datos genéricos para realizar valoraciones de CdF, sino que depende más del conocimiento interno que se tenga de la planta y del asesoramiento experto.

A continuación se muestra una tabla que describe como pueden obtenerse los datos necesarios para evaluar las consecuencias de un fallo:

<p><b>1. Datos históricos</b></p>	<p>Los fallos y accidentes ocurridos en el pasado pueden ser analizados para obtener históricos de datos.</p> <p><b>Dichos datos en general pueden ser:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Genéricos (agrupados en bases de datos)</li> <li>✓ Estadísticas de la compañía (datos provenientes de la instalación)</li> <li>✓ Resultados de un "benchmarking"</li> <li>✓ Datos provenientes de prácticas recomendadas.</li> </ul> <p><b>Los datos históricos se pueden utilizar para:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Determinar directamente las CdF</li> <li>❖ Para determinar parámetros para los modelos físicos de CdF</li> <li>❖ Para calibrar los modelos de CdF (atributo o físicos)</li> </ul>
<p><b>2. Juicios expertos</b></p>	<p>Las CdF son evaluadas en cooperación con expertos (Pueden ser expertos de la propia compañía o de fuera de la compañía).</p> <p>Los expertos pueden evaluar directamente las CdF o proporcionar los input a necesarios para un árbol de sucesos.</p>
<p><b>3. Modelos</b></p>	<p>Desarrollo de un modelo determinado para determinar las CdF.</p>

**Tabla 2.4 - Fuentes de información para la evaluación de las CdF**

### **2.2.6 Evaluación del Riesgo**

Consideramos el riesgo como la combinación de la probabilidad y la consecuencia de fallo. Una vez establecidos los fallos en los equipos, el riesgo se puede evaluar fácilmente. Una definición de riesgo puede ser:

$$\text{Riesgo} = \text{Probabilidad del fallo (PdF)} * \text{Consecuencias del fallo (CdF)}$$

El riesgo se puede representar de forma gráfica mediante un diagrama de riesgo, según se muestra en la Figura 2.10 o mediante una matriz de riesgos (descrita posteriormente).

Diagrama de riesgos:

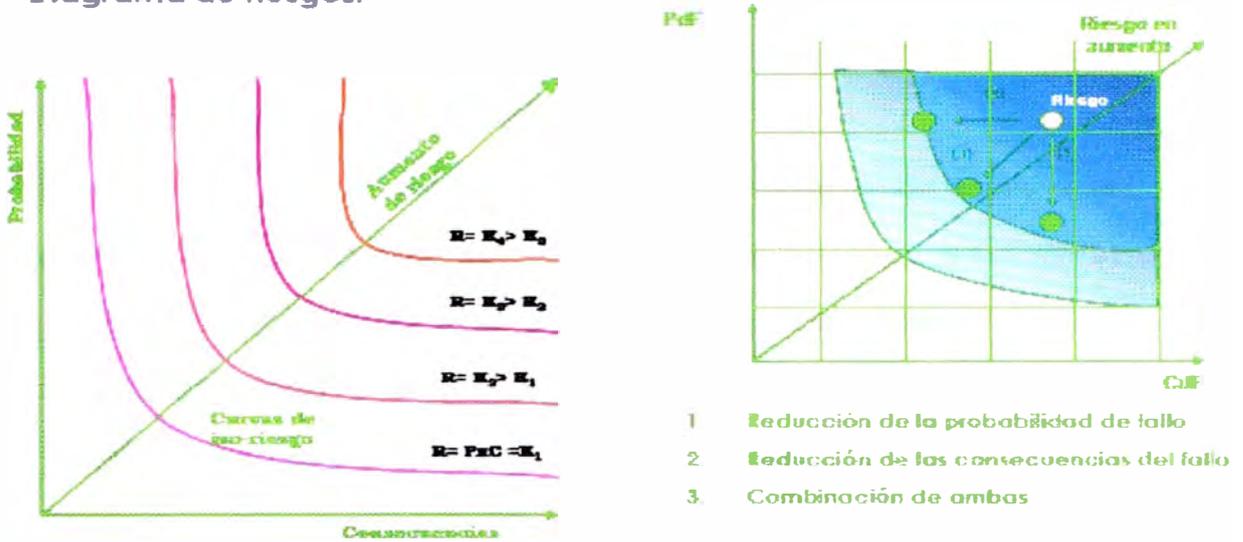
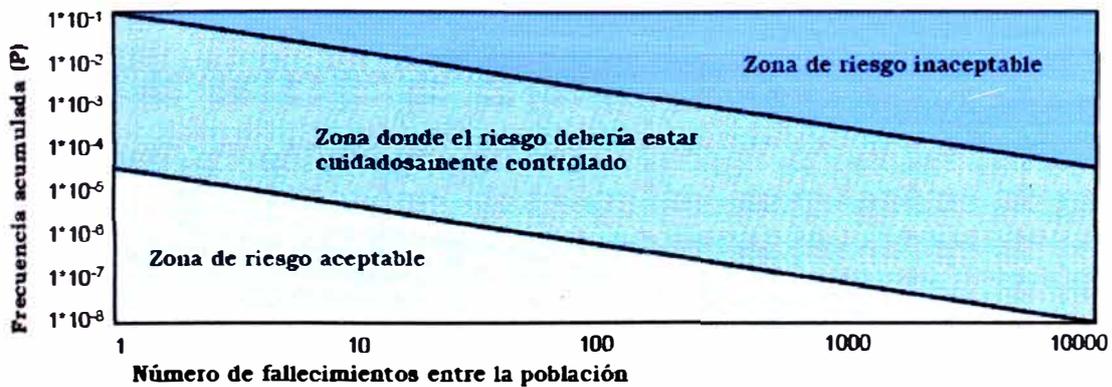


Figura 2.4 - Diagrama de riesgo

En un gráfico o en una matriz de riesgo las líneas de "iso-riesgo" representan un mismo nivel de riesgo. Normalmente el riesgo representado se asocia a un tipo de consecuencias representado en el eje horizontal.

Para la utilización de la matriz de riesgo, se hace necesario definir un nivel de riesgo que sirva como criterio de aceptación. Dicho nivel, separa las áreas de riesgo aceptable e inaceptable.



## Figura 2.5 - Criterios de aceptación del riesgo

### 2.2.7 La Matriz de Riesgos

El diagrama de riesgo se puede utilizar como herramienta de apoyo a la decisión cuando se analiza el riesgo asociado a los diferentes fallos. En el diagrama de riesgo, la PdF se dibuja en el eje de ordenadas y la CdF en el eje de abscisas. Si dividimos el diagrama de riesgo en una red mayada, obtenemos una matriz de riesgos con niveles de frecuencias de fallos, en el eje de ordenadas y niveles de consecuencias, en el eje de abscisas. La escala de probabilidades abarca cinco niveles, clasificados de "Muy baja" a "Muy alta". Dichos niveles se clasifican según dos categorías fundamentales, tiempo medio entre fallos (MTBF) y probabilidad (f). El valor del MTBF representa la frecuencia de fallos técnicos y (f) indica la probabilidad de que ocurra un fallo con consecuencias en afectación al proceso productivo.

La escala de severidad permite clasificar los fallos según sus consecuencias (desde las que no tienen ninguna consecuencia más que su reparación, a las que tienen consecuencias catastróficas). Esta escala tiene en cuenta las consecuencias económicas de los fallos.

PROBABILIDAD	Muy alta: la falla es casi inevitable	S	S	H	H	H
	Alta: Fallas repetidas	M	S	S	H	H
	Moderada: Fallas ocasionales	M	M	S	S	H
	Baja: Relativamente pocas fallas	L	M	M	S	S
	Remota: La falla es improbable	L	L	M	M	S
		Muy baja	Baja	Moderada	Alta	Extrema
CONSECUENCIAS						

**Tabla 2.5 - Matriz de Riesgos**

Sobre la matriz de riesgos, debemos definir el perfil de riesgos que estamos dispuestos a aceptar, trazando una línea que marcará el límite de aceptación. Dicho perfil quedará definido por la frontera entre las consecuencias que estamos dispuestos a aceptar y las que no, en función de una probabilidad determinada para su ocurrencia.

Tras haber trazado el perfil de riesgo, trazamos también el perfil formado por las líneas inferiores de las casillas adyacentes a la línea de riesgo.

Con ello, la matriz de riesgo queda dividida en cuatro zonas:

- **La zona H:** Situada en la parte superior derecha de la matriz.

Corresponde a los fallos que tienen consecuencias inadmisibles, bien por la severidad de las mismas o bien por la probabilidad que tengan de ocurrir. No podemos admitir un fallo cuyo riesgo quede en esta zona, por eso esta zona es la de mayor prioridad de actuación. Hemos de eliminar o disminuir sus consecuencias o frecuencia de aparición.

- **La zona S:** Corresponde a fallos con un riesgo no deseable y solamente tolerable si no se puede realizar ninguna acción para reducir el riesgo o si el coste de hacerlo es muy desproporcionado en relación a la reducción que se conseguiría.

- **La zona M:** Corresponde a los fallos con riesgo aceptable. El óptimo sería que todos los fallos tuviesen sus consecuencias dentro de esta zona, pues representa la relación óptima desde el punto de vista riesgo-coste.

- **La zona L:** Situada en la parte inferior izquierda de la matriz. Esta zona corresponde a fallos con riesgo aceptable, aunque estaríamos dispuestos a aceptar riesgos mayores.

Si estamos realizando algún tipo de tarea de prevención para conseguir que el riesgo se sitúe en esta zona, podríamos plantearnos gastar menos en dichas tareas, pues estaríamos dispuestos a aceptar una severidad mayor (desplazándose hacia la derecha de la matriz), o una probabilidad de ocurrencia mayor (desplazándose hacia arriba en la matriz de riesgo), o ambas cosas al mismo tiempo.

Esta división de la matriz de riesgos servirá para establecer prioridades a la hora de aplicar metodologías de mantenimiento y para la optimización de

puntos débiles (para determinar los rediseños a realizar para eliminar consecuencias inaceptables).

Se puede apreciar en la matriz de riesgos que la situación óptima sería que todos los sucesos se situaran en la zona M o L. Sin embargo, no debemos olvidar que el proceso es dinámico y que se ha de adaptar a las circunstancias cambiantes del entorno. Por ello, cuando el entorno cambia puede también cambiar el perfil de riesgo y desplazarse hacia un lado u otro. Ante estos cambios, las políticas de mantenimiento que antes eran adecuadas pueden ahora dejar de serlo.

Los niveles de las consecuencias de fallo se tabulan según la Tabla 2.6:

CONSECUENCIAS	DEFINICION	PTOS
INSIGNIFICANTE	Los defectos pueden ser retrabajados en el lugar. Defecto menor identificado por un cliente observador. Sin efectos	5
BAJA	Defecto menor identificado por los operadores. El producto requiere clasificación y retrabajo. Ajuste y acabado, artículo con chillido o ruido	10
MODERADA	Interrupción menor en la producción, algo de desperdicio, pérdida del desempeño de la función secundaria. 100% de retrabajo.	20
ALTA	Interrupción mayor en la producción, pérdida o reducción de la función primaria, 100% de desperdicio, el producto requiere clasificación.	50
EXTREMA	Interrupción mayor en la producción con daño al equipo o al operador, peligro potencial	100

**Tabla 2.6 - Niveles de consecuencias de falla**

Los niveles de las probabilidades de fallo se tabulan según la Tabla 2.7

NIVEL	DEFINICIÓN	FRECUENCIA
CONSTANTE	Ocurre varias veces al año en esta planta	Mas de 10 caso al año
FRECUENTE	Ocurre al menos una vez cada año en esta planta	Entre 1 y 10 casos año
MODERADA	Ha ocurrido alguna vez en esta planta	Una vez entre 1 y 5 años
OCASIONAL	Baja posibilidad de ocurrencia en esta planta, pero es probable que ocurra según la experiencia en esta industria	Una vez entre 5 y 20 años
REMOTO	Muy difícil que ocurra en esta planta, y es improbable que ocurra según la experiencia en esta industria	Menos de 1 vez cada 20 años

**Tabla 2.7 - Niveles de probabilidades de falla**

### **Cuantificación del riesgo**

Para dar un valor numérico a las consecuencias se presenta la escala "Semi-Geométrica", con el fin de darle mayor peso a las consecuencias en la evaluación. Se recomienda valores enteros y pequeños: 1, 2, 5, 10, 20, 50, etc. A razón de que las consecuencias de las ocurrencias no se distribuyen de forma lineal. A cada nivel se le asigna un **nombre** que facilite su aplicación. Adicionalmente se le establecen **criterios** de valoración para cada uno de los niveles de severidad, basados en unidades relacionadas con el factor (tipo y número de víctimas; soles, dólares, días de paro o volúmenes de producción afectados, etc.).

Este proceso no tiene influencia en el ranking de riesgos que obtendremos pero sí, modifica la contribución que cada modo de fallo aporta al riesgo total de la planta.

El riesgo para cada modo de fallo lo evaluamos de la siguiente manera:

$$\text{Riesgo} = \frac{\text{Consecuencia}}{\text{MTBF(años)} \cdot 12}$$

De tal forma que las escalas podrían quedar de la siguiente manera:

		CONSECUENCIAS				
		0 - 5	6 - 10	11 - 20	21 - 50	51 - 100
PROBABILIDAD (f: fallos/año)	$f > 10$	S	S	H	H	H
	$1 \leq f \leq 10$	M	S	S	H	H
	$0.2 \leq f < 1.0$	M	M	S	S	H
	$0.05 \leq f < 0.2$	L	M	M	S	S
	$f < 0.05$	L	L	M	M	S
		Muy baja	Baja	Moderada	Alta	Extrema

Tabla 2.8 - Cuantificación de la Matriz de Riesgos

### Interpretación

La matriz de riesgos se utiliza para identificar en la fase de evaluación los equipos de alto riesgo y realizar una evaluación detallada de los programas de inspección y mantenimiento. A partir de ella se puede:

- Obtener valoraciones de riesgo para los principales fallos funcionales. (este es un método muy útil para documentar los riesgos identificados).
- Identificar los equipos más críticos, sobre los cuales, se deberán tomar acciones de reducción de riesgos.
- Evaluar los programas actuales de inspección y mantenimiento y sugerir la implantación de nuevos programas.
- Evaluar la frecuencia con que se realizan las tareas de inspección y mantenimiento y sugerir nuevas frecuencias.

Descubrir áreas con exceso o falta de mantenimiento.

Indicar los cambios en el diseño que serían necesarios.

Realizar Benchmarking con otras instalaciones parecidas.

Todo ello conduce al análisis de riesgos para conseguir una optimización del mantenimiento. Es decir reducir el gasto en mantenimiento, sin que la confiabilidad (fiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y seguridad) de la planta no sólo no se vea afectada, sino que incluso sea mejorada.

A partir de los resultados obtenidos en la matriz de riesgo podemos proponer el tipo de mantenimiento que se debe aplicar al componente asociado al modo de fallo correspondiente, según se muestra en el esquema desarrollado en la Figura 2.6:

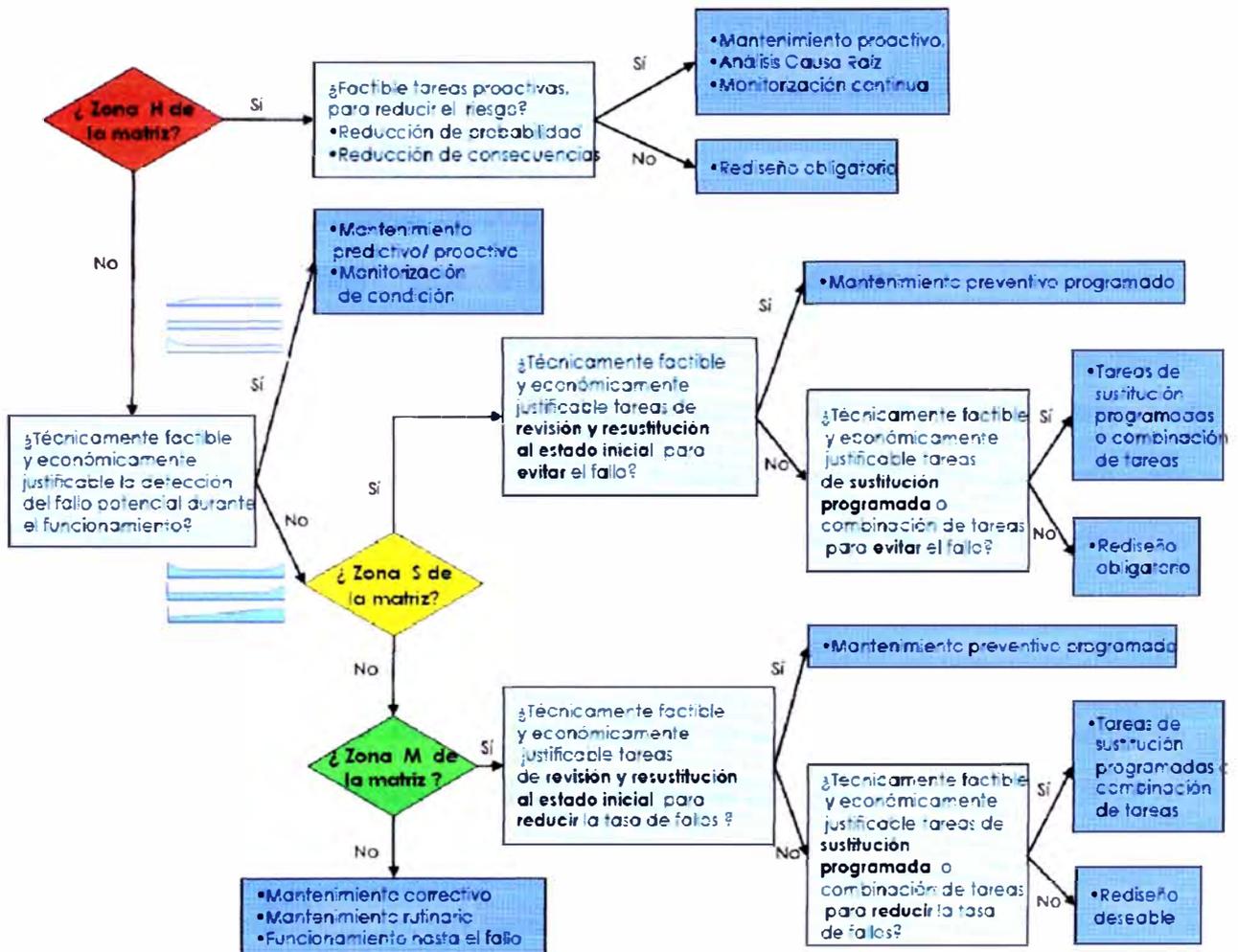


Figura 2.6 - Diagrama de decisión

Este marco de decisión cubre tres propósitos importantes:

- Asegura una evaluación sistemática de las necesidades de las actividades de mantenimiento preventivo.
- Asegura una evaluación consistente a través de todo el análisis.
- Simplifica la documentación de las conclusiones alcanzadas.

El programa de inspección y mantenimiento resultante se establece para evitar fallos en los equipos y para satisfacer requerimientos estatutarios.

### **Criterio de aceptación**

Una vez que los planes de inspección y mantenimiento han sido implantados, se debe comprobar que la planta o las instalaciones satisfacen unos requerimientos de confiabilidad operacional conocidos como criterios de aceptación. Estos criterios corresponden con la política concreta de la empresa y con las regulaciones nacionales e internacionales. En principio, los requerimientos internos de la propia compañía deberían ser más estrictos que la legislación.

Los criterios de aceptación suelen venir impuestos a nivel de toda la instalación o toda la compañía. En la planificación de la inspección y mantenimiento se deben analizar los criterios en cada nivel de los equipos.

Esto se puede hacer de dos formas diferentes:

1. Realizar un análisis detallado a cada elemento de los riesgos relacionados con la afectación operacional y evaluar como las actividades de inspección y mantenimiento afectan al riesgo de dichos elementos. Este método es muy minucioso y riguroso pero caro, sobre todo si se tienen que analizar muchos elementos.
2. Repartir los riesgos relacionados con la seguridad, salud y medio ambiente entre los elementos. Este método es relativamente simple pero menos riguroso que el anterior. La estimación se puede mejorar teniendo en cuenta aspectos como los tiempos de exposición.

La responsabilidad de definir unos criterios globales de aceptación debe ser de las autoridades o del equipo de gestión de la planta y no del equipo de planificación de mantenimiento.

### 2.3 ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO Y REDUCCION DE RIESGOS

Un objetivo fundamental del análisis de riesgos es la identificación de actividades que reduzcan los niveles de riesgo. La reducción del riesgo se consigue mediante:

- Reducción de la probabilidad del fallo (1).
- Reducción de las consecuencias del fallo (2).
- Una combinación de ambas (3).

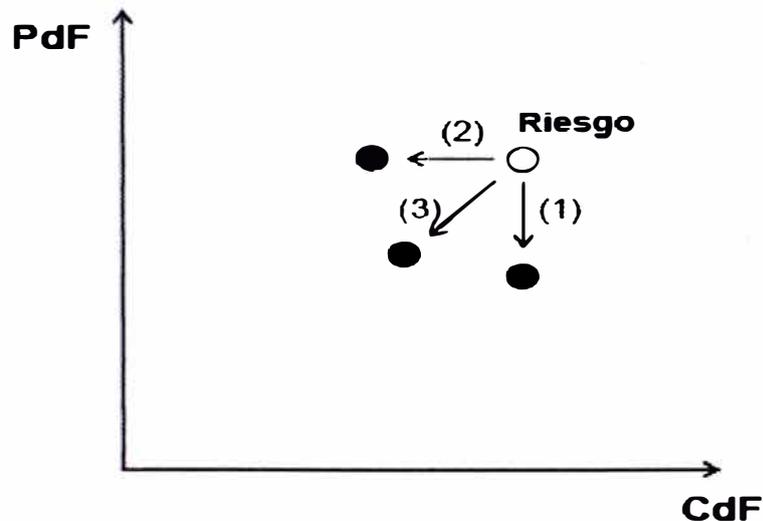


Figura 2.7 - Formas de reducir el riesgo

Las actividades de mantenimiento e inspección influyen fundamentalmente en la probabilidad de fallo. Sin embargo, conseguir modificar las consecuencias del fallo normalmente implica realizar cambios de diseño, lo cual no se consigue fácilmente en

la fase operacional. Las actividades de reducción de riesgos se basan en encontrar tareas de prevención o rediseño que desplacen los fallos correspondientes a la zona “H” de la matriz, hacia la zona “S” o “M” (reduciendo así, su severidad o su probabilidad).

Asimismo, se puede plantear reducir el gasto en las tareas correspondientes a fallos de la zona “L”, tratando de llevarlas a la zona “M” (estamos dispuestos a aceptar una probabilidad y/o un riesgo mayor).

El marco de decisión, a la hora de reducir riesgos debe tener en cuenta los siguientes factores:

- Oportunidad para eliminar causas de fallo.

- Riesgo del personal durante la ejecución de las actividades de inspección y mantenimiento.

- Riesgo de introducir nuevas causas de fallo.

Este marco de decisión se muestra de forma gráfica en la siguiente figura.

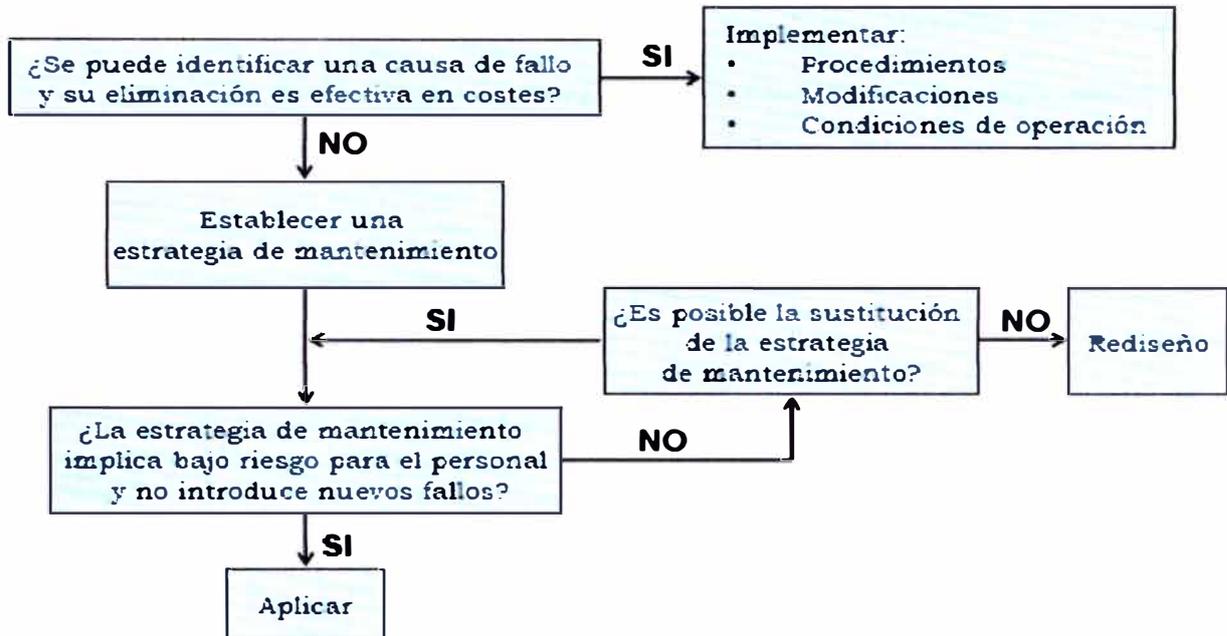


Figura 2.8 - Marco de decisión para reducción de riesgos

La experiencia en la industria minera demuestra que eliminando las causas de fallo, se puede mejorar considerablemente el rendimiento de las operaciones mineras. Las razones de esto, es que si se consigue erradicar las causas de fallo también eliminamos el correspondiente fallo lo que lleva a aumentar el tiempo de disponibilidad de los equipos y a disminuir el mantenimiento correctivo. De esta forma las actividades restantes de mantenimiento se pueden realizar de manera más eficiente y se puede aumentar la proporción de actividades de mantenimiento programado. Si no se puede sustituir una actividad de mantenimiento por técnicas de monitorización, se pueden tomar medidas organizativas como la formación con el fin de reducir los riesgos del personal durante el mantenimiento y los riesgos de introducir fallos durante el mantenimiento.

Hemos visto anteriormente que a partir de los resultados obtenidos en la matriz de riesgo, podemos definir diferentes estrategias de mantenimiento, dependiendo de la criticidad del componente o equipo.

Las diferentes estrategias que se pueden tomar son:

Mantenimiento rutinario.

Prueba/Inspección regular de funcionamiento (elementos stand-by).

Mantenimiento preventivo

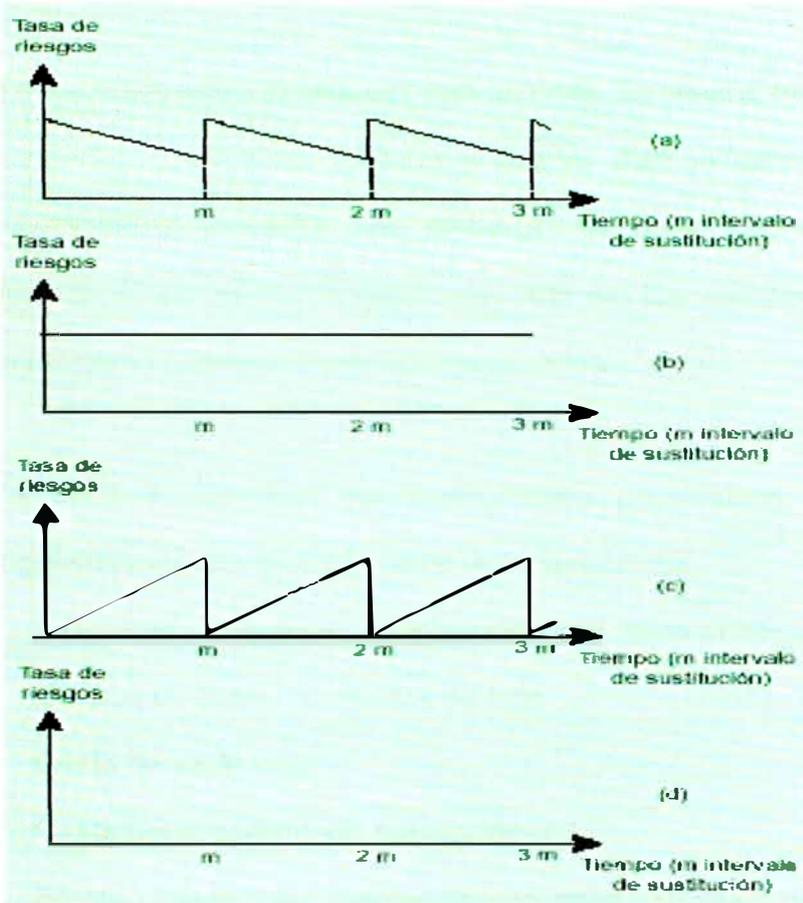
Mantenimiento predictivo y basado en condición

#### **2.4. OPTIMIZACION DEL MANTENIMIENTO**

La efectividad y la economía del mantenimiento preventivo pueden maximizarse teniendo en cuenta la distribución de los tiempos de fallo de los elementos sujetos a mantenimiento y de la tendencia de la tasa de fallos del sistema.

Habíamos definido como tasa de fallos o tasa de riesgo, la frecuencia (nº de ocasiones por año) en que un posible fallo se materializa.

Si un componente tiene una tasa de riesgo decreciente, ninguna sustitución incrementará la probabilidad de fallo. Si por el contrario, la tasa de riesgo es constante, la sustitución no representará ninguna variación en la probabilidad de fallo y si un componente tiene una tasa de riesgos creciente, programando su sustitución en el momento adecuado se incrementará teóricamente la fiabilidad del sistema.



**Figura 2.9 - Relaciones entre la fiabilidad y los programas de sustitución.**

Caso (a) Tasa de riesgo decreciente: El programa de sustitución incrementa la posibilidad de fallo.

- Caso (b) Tasa de riesgo constante: Programa de sustitución no afecta la probabilidad de fallo.

- Caso (c) Tasa de riesgo creciente: Programa de sustitución reduce la probabilidad de fallo.

- Caso (d) Tasa de riesgo creciente con tiempo de fallos superior a  $m$ :

Programa de sustitución hace que la probabilidad de fallo sea cero

Todas estas consideraciones son teóricas. Se asume que las actividades de sustitución no introducen nuevos defectos y que las distribuciones de los tiempos de fallo están exactamente definidas. Sin embargo, es obvio que se debe tener en cuenta las distribuciones de los tiempos de fallo de los componentes en la estrategia de la planificación del mantenimiento preventivo.

De cara a optimizar las sustituciones preventivas, es conveniente conocer los siguientes puntos de cada parte de la instalación:

- Los parámetros de las distribuciones de fallos principales.
- Efectos de todos los modos de fallo
- Coste de cada fallo
- Coste del programa de sustituciones
- Efecto probable del mantenimiento en la fiabilidad: hemos considerado hasta ahora componentes que no avisan en el momento de iniciarse su fallo. Si mediante inspecciones, pruebas no destructivas, etc. se puede detectar un fallo incipiente, también se deberán considerar:

Modo en que los defectos se encadenan hasta provocar el fallo.

Coste de las inspecciones o pruebas.

Para conseguir una mejora continua del mantenimiento preventivo podemos utilizar una serie de herramientas. Destacamos las siguientes:

- Retroinformación de los ejecutores de los trabajos
- Análisis de las causas de las averías (Análisis Causa-Raíz)
- Introducción de modificaciones

Estudio de la evolución del coste de mantenimiento

- Programa de sugerencias para mejorar los procedimientos
- Análisis de la eficacia de los procedimientos

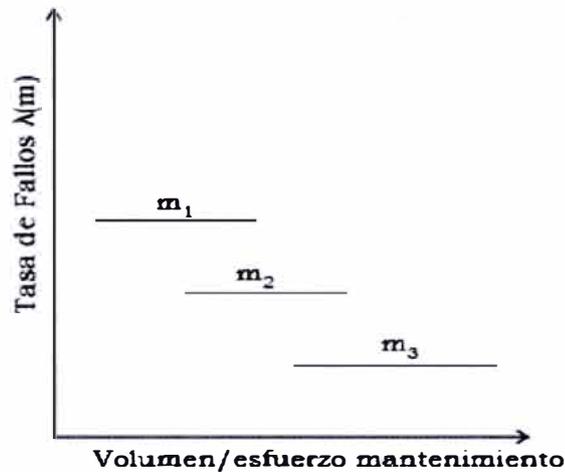
#### **2.4.1. Optimización del mantenimiento para componentes activos**

Para los componentes activos/rotativos donde los riesgos de interrupción al proceso productivo son aceptables, las actividades de mantenimiento e inspección se optimizan con respecto al impacto económico.

Suponiendo que el tiempo hasta el fallo se distribuye de forma exponencial, la distribución exponencial no se puede combinar con la optimización tradicional de costes. Por este motivo se recomienda realizar el siguiente enfoque:

Coste total equipos = Coste mant. preventivo + Coste Fallo

Para cada estrategia de mantenimiento (donde  $m_1, m_2, m_3 \dots m_i$  indican actividades e intervalos de mantenimiento preventivo) se puede determinar una tasa de fallos  $\lambda(m_i)$ , según se ilustra en la Figura 2.18.



**Figura 2.10 - Variación de la tasa de fallos  $\lambda(m)$  según estrategias de mantenimiento ( $m_1, m_2, m_3$ )**

Los costes anuales medios o esperados asociados a un programa de inspección y mantenimiento se calculan como:

$$E [\text{Coste total equipos } (m_i)] = \text{Coste mant. preventivo } (m_i) + \text{Coste Fallo} * \lambda(m_i)$$

Siendo:

Coste mant. Preventivo ( $m_i$ ) = Coste anual del mantenimiento preventivo asociado al programa de mantenimiento  $m_i$ .

$\lambda(m_i)$  = Número medio de fallos anuales que se producen cuando se aplica el programa de mantenimiento  $m_i$ .

El programa de mantenimiento que minimiza esta expresión es el que presenta el coste óptimo.

La tasa de fallos,  $\lambda(m)$ , para las diferentes estrategias de mantenimiento, se puede evaluar utilizando juicios expertos que determinen el MTTF (tiempo medio hasta el fallo) para la estrategia de mantenimiento dada y la relación:

$$\lambda(m_i) = \frac{1}{\text{MTTF}(m)}$$

Se podrían utilizar otros modelos estadísticos para modelar la probabilidad de fallo, pero se obtendrían diferentes fórmulas de optimización.

El coste del plan de mantenimiento preventivo (Coste mant. Preventivo (mi)) se determina utilizando personas expertas de la planta y otras fuentes como los contratistas. Los juicios expertos también se pueden utilizar para determinar los costes esperados del fallo (Coste Fallo).

A nivel de elementos, para cada elemento el objetivo es minimizar los costes totales (CTotal) en relación a las actividades y a los intervalos de mantenimiento como se muestra a continuación:

$$C_{\text{total}} = \frac{C_a}{\tau} + \sum_{i=1}^n \lambda_i(\tau) \cdot C_i$$

Siendo:

C Total : Costes totales

CA : Costes de mantenimiento por actividad.

Ci : Costes por el modo de fallo i.

$\lambda_i$  : Tasa de fallos asociada al modo de fallo i [Fallos/año].

$\tau$  : Intervalo de inspección o mantenimiento.

Para obtener el intervalo óptimo de mantenimiento, derivamos respecto de  $\tau$  e igualamos a cero:

$$\frac{dC_{\text{total}}(\tau)}{d\tau} = 0$$

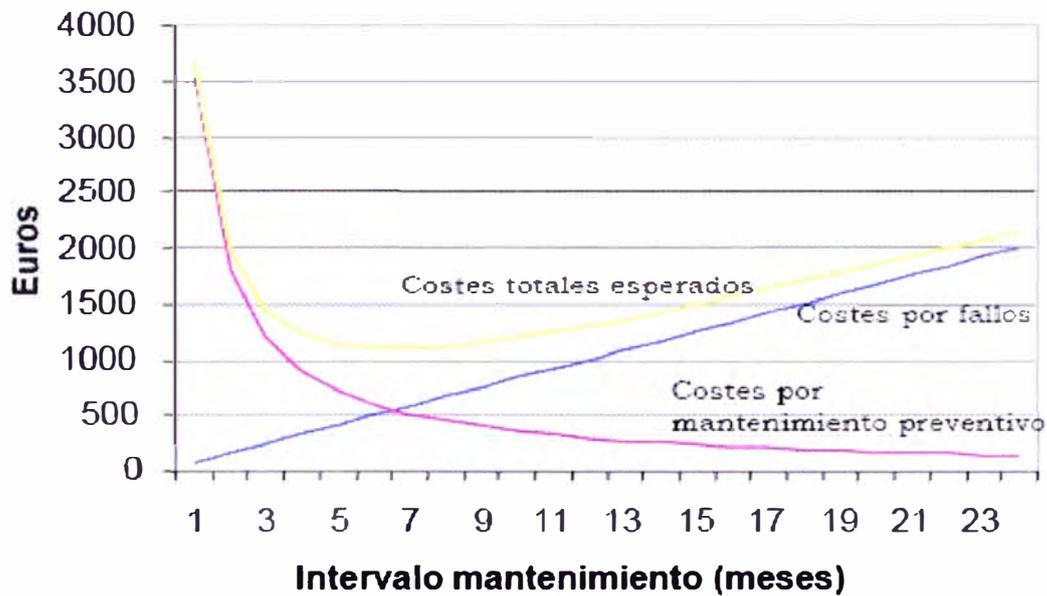


Figura 2.11 - Curva del costo total esperado

Si se tienen que considerar los aspectos referentes a las consecuencias económicas, entonces la planta se debería decidir por una estrategia de mantenimiento, mi tal que el riesgo asociado a esas consecuencias sea inferior al criterio de aceptación de la planta:

$$Riesgo(m) = Coste_{\text{Fallos}} * \lambda(m, )$$

#### **2.4.2 Tasa de Fallos después de la reparación y de las actividades de Inspección y mantenimiento.**

Las curvas de degradación que se describieron en el subcapítulo 2.4, mostraban como la tasa de fallos de un componente varía en función del tiempo desde que se pone el componente en uso hasta que falla. En estas curvas de degradación no se consideraban las actividades de mantenimiento.

Para tener en cuenta la inspección y mantenimiento se debe decidir como se espera que quede el componente después de haberle realizado una tarea de inspección o mantenimiento.

Podemos encontrar muchos modelos de reparación, pero los más utilizados son:

- **Como nuevo.** El elemento se devuelve a su condición original, de tal forma que tras la actividad de mantenimiento su funcionamiento es el mismo que cuando estaba nuevo.
  
- **Como antes del fallo.** El elemento se devuelve a la condición que tenía antes del fallo, de tal forma que después de la actividad de mantenimiento el conjunto sigue funcionando igual que lo hacía justo antes del fallo, sin devolverlo a sus condiciones iniciales. El ejemplo típico de este caso, es el cambio de una pieza de un coche. Tras el cambio, el coche funciona correctamente pero la condición total del coche no se mejora significativamente).

Las posibles alternativas existentes entre estos dos extremos no se utilizan mucho en la práctica. Estos modelos proporcionan una medida de la eficiencia de la actividad del mantenimiento.

La Figura 2.12 muestra los dos modelos de reparación para una bomba centrífuga con una distribución exponencial del tiempo hasta el fallo y una tasa de fallos de  $\lambda = 71.35 \cdot 10^{-6}$ /hora.

Se asume que la bomba fallará después de los años 1.1, 4.8 y 6.8.

Para ilustrar el deterioro de la bomba utilizamos su función de fiabilidad  $R(t)$ , la cual muestra determina la probabilidad de que el componente “sobreviva” en el intervalo que va desde  $t=0$  hasta el tiempo  $t$ . Por tanto la probabilidad de que la bomba falle en el intervalo que va desde  $t=0$  hasta el tiempo  $t$ , será:

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\int_0^t z(s) ds}$$

Siendo

$R(t)$ : Función de fiabilidad

$Z(s)$ : Distribución de fallos en función del tiempo.

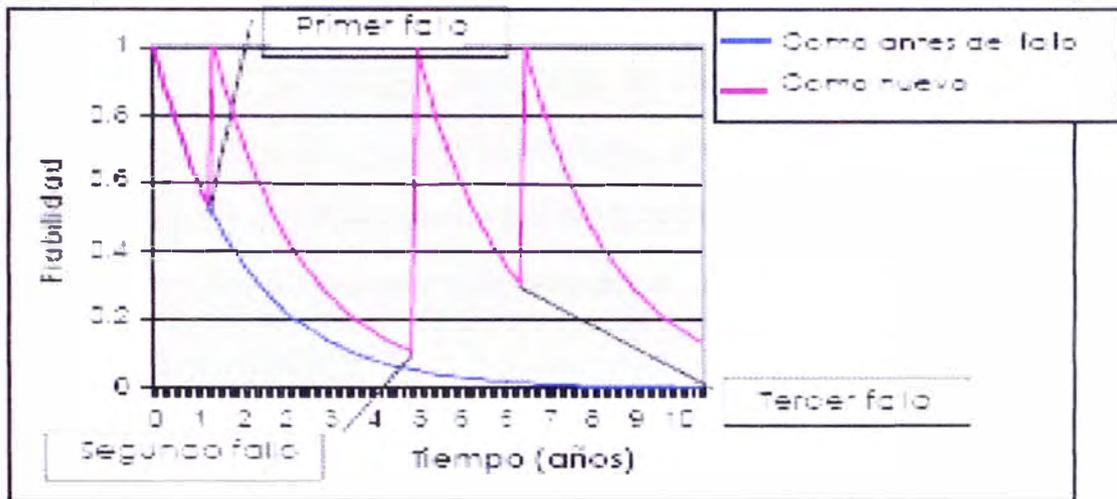


Figura 2.12 - Fiabilidad Vs Mantenimiento

## 2.5 DISEÑO DEL MANTENIMIENTO

Esto incluye los tres bloques, Estrategia de Mantenimiento, Diseño del Mantenimiento y Optimización de la Estrategia.

### 2.5.1 Estrategia del Mantenimiento

En este proceso se toma una decisión acerca de la estrategia del mantenimiento seleccionada para cada componente significativo del mantenimiento de cada máquina. Aquí, debe tomarse una decisión acerca de si se escogen estrategias en primer lugar como la prevención, correr hasta fallar o rediseño. Si se practica la prevención, se debe hacer en segundo lugar una elección entre estrategias basadas en la condición y estrategias basadas en el uso, y, en ambos casos, tiene que hacerse una elección con respecto a la estrategia específica empleada.

Las estrategias se desarrollan típicamente por los recursos o máquinas a ser mantenidas. La metodología principalmente usada para este propósito es el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad, combinada con el análisis de falla estadístico para entender los modos de falla involucrados bastante bien para poder desarrollar estrategias que llevarán a un gran impacto positivo en la ganancia de la compañía.

### **2.5.2 Plan del Mantenimiento**

Para cada máquina se diseña un plan de mantenimiento combinando varias estrategias del componente en el plan de logística del mantenimiento para un tipo específico de equipo, puede, por ejemplo, consistir en los siguientes documentos, pulcramente limitados en un libro que está disponible para propósitos de referencia:

- Una copia del análisis completo de RCM.
- Tareas de mantenimiento que deben programarse para el rendimiento a los intervalos predefinidos. Éstos deben listar todos los pasos de acción que deben realizarse, junto con las pautas apropiadas, listas de materiales que probablemente se necesitan, cualquier equipo / herramienta especial necesaria y medidas de precaución que deben tomarse.
- Una previsión de la mano de obra necesaria en las diferentes ocupaciones para la ejecución del plan.

### **2.5.3 Optimización de la estrategia**

Las estrategias seleccionadas pueden perfeccionarse a una frecuencia regular (normalmente anual) basadas en la historia agregada de la máquina. Las técnicas como la del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), análisis de datos del mantenimiento y modelado matemático son empleadas en este proceso.

- **Operación del mantenimiento:** Este proceso, contenido dentro de un cuadrado punteado, consiste en los bloques de la Administración de Mantenimiento, Ejecución de la Tarea y Gestión de la Tarea.
- **Administración del mantenimiento:** Esta es la función tradicionalmente conocida como diseño del mantenimiento e involucra todos los aspectos de programar tareas, planear tareas, procuración, problema de documentación de tareas y regeneración de datos de tareas.
- **Ejecución de tareas:** este es el proceso durante el cual el obrero de mantenimiento realiza la tarea tal como se especifica en su documento de tarea.
- **Gestión de tareas:** es el proceso de supervisión dónde la tarea es controlada. Esto incluye áreas de tareas como control de calidad, consejo especializado a obreros, seguimiento de tareas, pedidos, priorizar, gestión de atrasos, gestión de eficacia del trabajo, control del presupuesto, seguridad y mantenimiento del local y gestión de recursos.

El ciclo interno es nuevamente un círculo cerrado. Sus vueltas regeneradas consisten de la siguiente gestión directiva operacional y procesos de supervisión:

- Uso de regeneración de trabajo para comenzar tareas adicionales.
- Fallas en la Planta al iniciar tareas de mantenimiento correctivo.

Éste no es un artículo de regeneración de ciclo cerrado en el sentido estricto, excepto si consideramos la Planta como otro bloque del proceso en el ciclo interno.

- Costo y resultados del rendimiento ayudan al departamento a lograr excelencia operacional óptima y control.
- La optimización de la estrategia de la historia de análisis del mantenimiento para perfeccionar las estrategias de mantenimiento.

Un último comentario es necesario - como se muestra en el diagrama del ciclo completo, hay una interacción que tiene lugar entre los ciclos exteriores e interiores. Ellos pueden, claro, no existir en el aislamiento.

Los procesos directivos definen el alcance dentro del que pueden tener lugar los procesos del ciclo internos.

Además, los resultados de los procesos internos del ciclo realmente son la medida del éxito aplicando la política de mantenimiento. Ellos afectan así a su vez el volumen de la política de mantenimiento, objetivos y el proceso de diseño de la gestión en el ciclo exterior.

## EL MODELO DEL CICLO DE MANTENIMIENTO

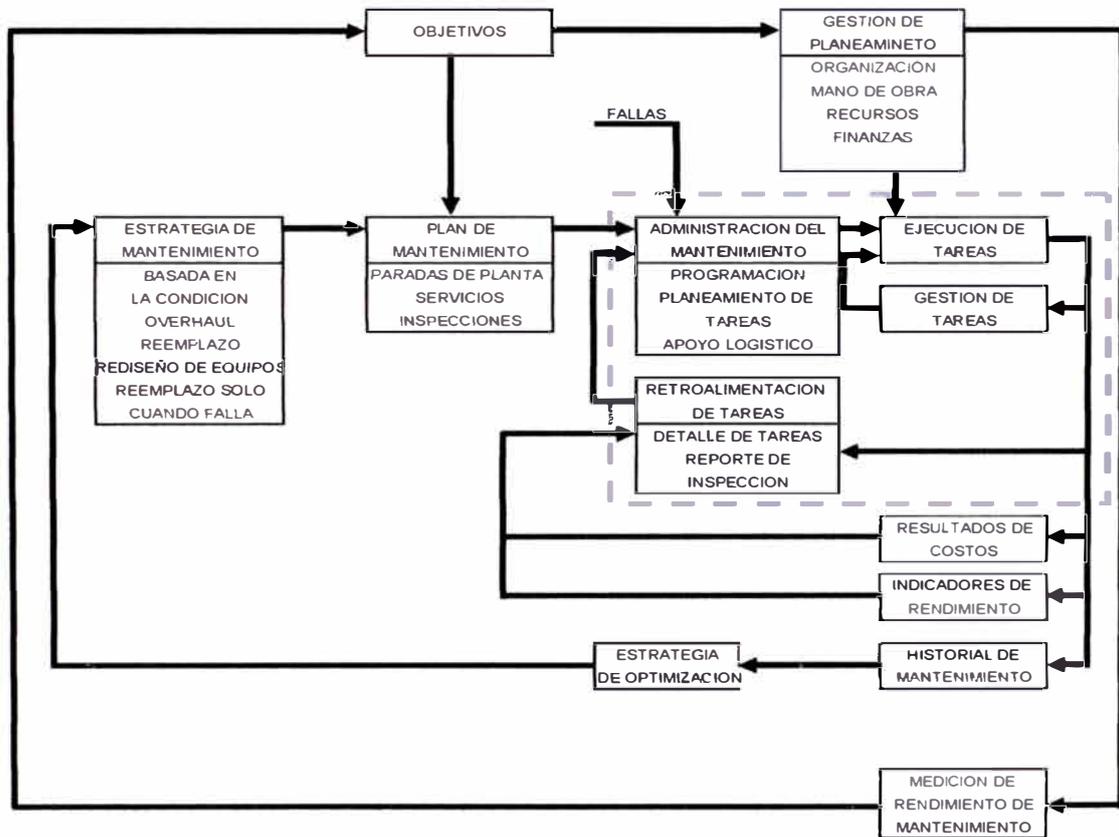


Figura 2.13 - El modelo del ciclo de mantenimiento

## **CAPITULO 3**

### **DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA**

El hombre, consiente o inconscientemente, a lo largo de la historia siempre ha administrado” sus riesgos y ello se ha visto reflejado en las medidas de prevención o protección que ha implantado, algunas de las cuales se han originado, mas desde la intuición que de la observancia de hechos repetidos asociados a un método analítico y racional. Ello no quiere decir que este sea el denominador común en los tiempos modernos, más si se tiene en cuenta que en los últimos 25 años se han desarrollado una serie de estudios e investigaciones que han permitido, tanto una rápida evolución de la conceptualización del tema, como el desarrollo de nuevas herramientas para un adecuado manejo de los riesgos. Dentro de estas últimas se destaca el proceso de gestión de los riesgos, como una herramienta que integra armónicamente elementos administrativos y técnicos en cualquier organización que quiera realizar una adecuada gestión de sus riesgos.

#### **3.1 DIAGRAMA DE FLUJO DE LA METODOLOGIA PARA EL ANALISIS DE RIESGOS**

Tal como se muestra, los principales pasos para realizar una guía para la implantación de la metodología de análisis de riesgos en una planta o en una compañía (sistema).

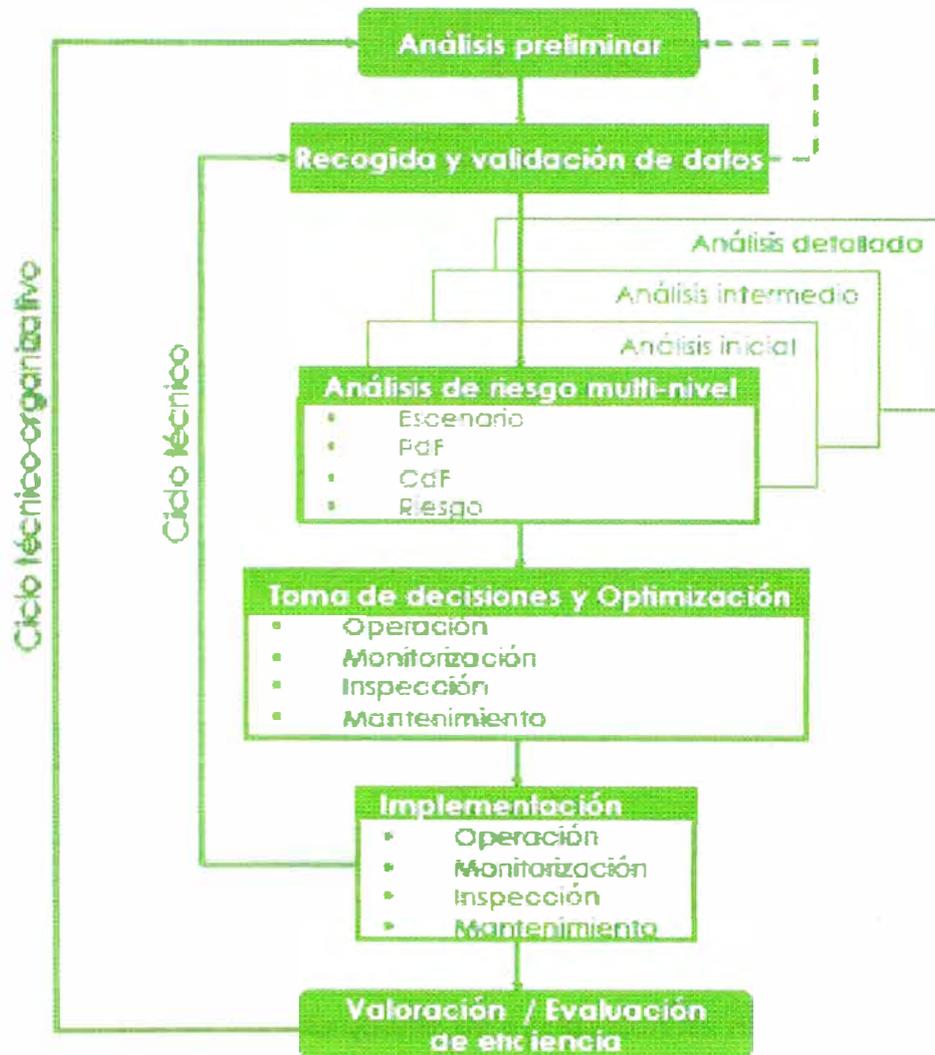


Figura 3.1 - Esquema para una metodología de análisis de riesgo

Un prerequisite para implementar este esquema es obtener el desglose del sistema a evaluar que facilite la identificación de funciones, mecanismos de degradación y fallas.

Se muestra un esquema posible para llevar a cabo un análisis de riesgos:

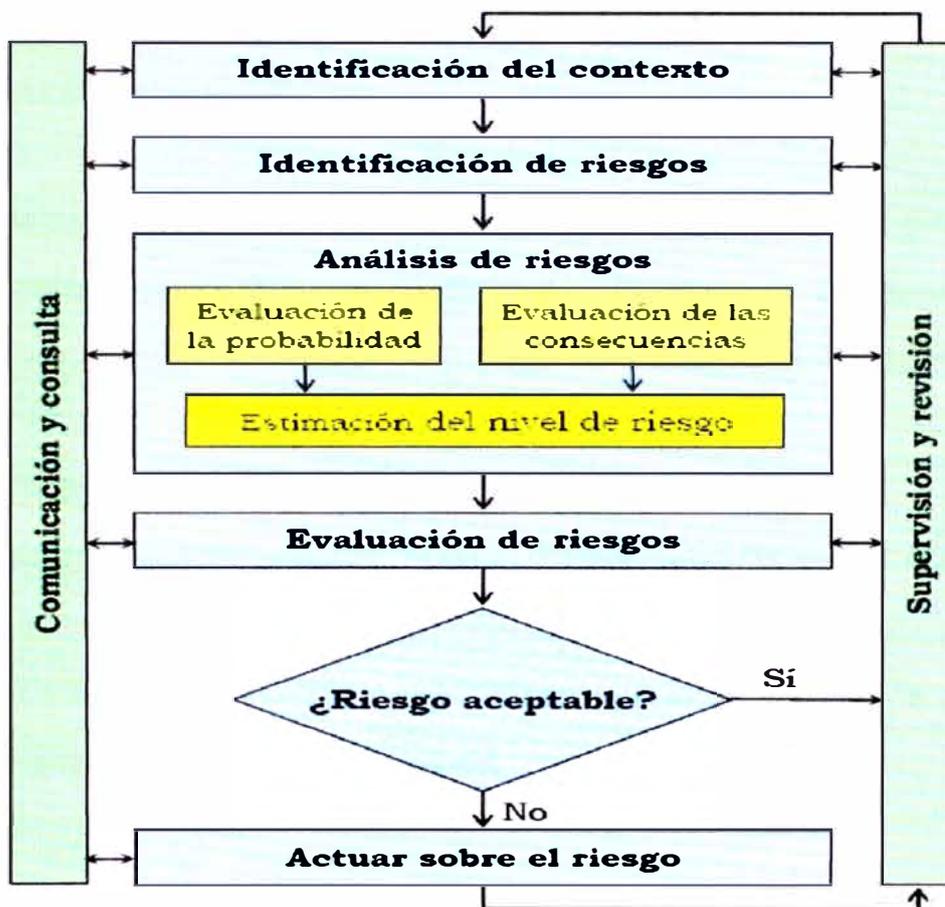


Figura 3.2 - Esquema de evaluación de riesgos

### 3.2 IDENTIFICACION Y DESGLOSE DEL SISTEMA A EVALUAR

Para facilitar la aplicación de la metodología de análisis de riesgos se requiere que el sistema que ha sido seleccionado para la aplicación del método, sea identificado y definido su función principal en su contexto operacional. Para ello debe desglosarse las funciones de los equipos del sistema, preferiblemente en sus funciones primarias y secundarias. Tal como la función principal de una central termoeléctrica es suministrar

energía eléctrica para cubrir una máxima demanda de 1600 kw por un periodo de 16 horas día durante todo el mes.

A cada uno de los componentes del sistema o subsistema es conveniente identificarle todas sus fallas funcionales que puedan influir en el riesgo de inoperatividad del sistema o proceso y en las decisiones que vayan a adoptarse para su control.

### **3.3 ESTABLECER PARAMETROS DE REFERENCIA**

La actividad de "evaluar" requiere asignar valores, relativos a una medida tomada como "unidad de referencia". La evaluación de riesgos se fundamenta en establecer parámetros adaptados a las condiciones y características del sistema y a los propósitos que se pretenden lograr con la metodología.

Los parámetros para evaluación de riesgos deben ser racionales y fáciles de utilizar; el único requerimiento adicional a los anteriores, indispensable para su confiabilidad, es que una vez establecidos, todas las mediciones se realicen con base en ellos.

#### **3.3.1 Tabla de Ocurrencias o Frecuencias**

Debe establecerse una "Tabla de Frecuencias" para los eventos esperados, con suficientes **niveles** o rangos para que sea fácil y confiable. Generalmente, se utilizan con éxito tablas con un mínimo de cuatro (4) niveles y un máximo de seis (6). A cada nivel se le asigna un **valor de referencia** (puede ser cualquiera) cuyo único requisito es que a mayor frecuencia dicho valor sea más

alto; se recomienda una escala "Lineal" con valores enteros, consecutivos y pequeños:

1, 2, 3, 4, 5, etc. A cada nivel se le asigna un **nombre** que facilite su aplicación y adicionalmente se establecen **criterios** de valoración, basados en número de casos años.

Para efectos de la planificación para emergencias en una Empresa los eventos se clasificarán de acuerdo a su probabilidad de ocurrencia, asignándole a cada uno un valor relativo lineal.

**RANGOS DE FRECUENCIA:** Para el análisis de probabilidad de ocurrencia se utilizan cinco (5) niveles de frecuencia para las fallas en los equipos. A cada nivel se le asigna un nombre y un "valor de referencia" en forma lineal, y un criterio de valoración, así:

**REMOTO:** Muy difícil que suceda en esta planta, y es improbable que ocurra según experiencia en esta industria; se espera que ocurra menos de una vez en 20 años (igual o menor de 0.05 fallos al año)

**OCASIONAL:** Baja posibilidad de ocurrencia en esta planta, pero es probable que ocurra según la experiencia en esta industria; sucede en forma esporádica; una vez entre los 5 y los 20 años (entre más de 0.05 y hasta 0.2 fallos al año)

**MODERADO:** Mediana posibilidad de ocurrencia, ha ocurrido alguna vez en esta planta; sucede algunas veces; una vez entre 2 y los 5 años (entre más de 0.2 y hasta 0.5 fallos al año)

**FRECUENTE:** Ocurre al menos una vez cada año en esta planta; sucede en forma reiterada; una vez entre 1 y 10 fallos al año (entre mas de 1 y hasta 10 fallo al año)

**CONSTANTE:** Alta posibilidad de ocurrencia; ocurre varias veces al año en esta planta mas de 10 casos al año (mayor a 10 fallos al año)

### **CRITERIOS DE USO**

Para la aplicación práctica de la escala, debe tenerse presente que el "límite inferior" de un rango de frecuencia pertenece al rango anterior.

En caso de duda sobre si se debe seleccionar un nivel específico para un equipo, se utiliza el nivel siguiente (el rango que le sigue en aumento de frecuencia). Como, si se duda sobre si el nivel "adecuado" de frecuencia para un equipo es MODERADA, se utiliza entonces el nivel de frecuencia ALTA.

Para la determinación de cual deberá ser el nivel de frecuencia asignado a un equipo durante un análisis de riesgo, se podrá utilizar la proyección con base en estadísticas, si ellas existen. También se podrán usar "Tablas de Frecuencia de Falla" si están disponibles, o en su defecto utilizar la experiencia y los

conocimientos que tengan los integrantes del equipo de trabajo responsable de Mantenimiento.

NIVEL	DEFINICIÓN	FALLOS / AÑO	VALOR
CONSTANTE	Alta probabilidad de ocurrencia en esta planta	Mas de 10	5
FRECUENTE	Significativa probabilidad de ocurrencia. Ocurre al menos una vez cada año en esta planta	Entre 1 y 10	4
MODERADA	Mediana probabilidad de ocurrencia. Ha ocurrido alguna vez en esta planta entre más de 1 y 5 años	Entre 0.2 y 1	3
OCASIONAL	Baja posibilidad de ocurrencia en esta planta, ha sucedido o se espera que ocurra según la experiencia en esta industria entre los 5 y 20 años	Entre 0.05 y 0.2	2
REMOTO	Muy difícil que ocurra en esta planta, se espera que ocurra menos de una vez en 20 años según la experiencia en esta industria	Menos de 0.05	1

**Tabla 3.1 – Tabla para valoración de frecuencias**

### **3.3.2 Tablas de consecuencias o severidad**

Deben establecerse "Tablas de Consecuencias" de los eventos esperados sobre cada uno de los equipos afectados (pérdidas económicas, afectación operacional, contaminación ambiental, etc.) Estas tablas deben contar con suficientes niveles o rangos para que sea fácil y confiable.

Generalmente, se utilizan con éxito tablas con un mínimo de cuatro (4) niveles y un máximo de seis (6). A cada nivel se le asigna un valor de referencia (puede ser cualquiera) cuyo único requisito es que a mayor consecuencia dicho valor sea más alto. Para las consecuencias se presenta la escala "Semi-Geométrica",

con el fin de darle mayor peso a las consecuencias en la evaluación. Se recomienda valores enteros y pequeños: 1, 2, 5, 10, 20, 50, etc. A cada nivel se le asigna un **nombre** que facilite su aplicación. Adicionalmente se le establecen **criterios** de valoración para cada uno de los niveles de severidad, basados en unidades relacionadas con el factor (tipo y número de víctimas; soles, dólares, días de paro o volúmenes de producción afectados, etc.).

### **GRAVEDAD DE LAS CONSECUENCIAS**

Para efectos de desarrollar la metodología en las empresas mineras, la gravedad de las posibles consecuencias de una falla en equipos se clasificará en cinco (5) niveles, cada uno de los cuales con un valor relativo asignado en forma no lineal de 1 a 100, en forma ascendente. Este valor se asigna no lineal (o preferiblemente geométrico o exponencial), para evitar equivalencias entre los extremos de la tabla, y darle entonces mayor peso a las consecuencias en la evaluación. La valoración deberá aplicarse a cada equipo o sistema expuesto seleccionado para el análisis, sin embargo es claro que para el ejercicio que nos ocupa este valor debe de asignársele solo al nivel de severidad afectación de la operación. Lo anterior de acuerdo con lo definido en el alcance de trabajo.

### **CRITERIOS DE VALORACIÓN DE LAS CONSECUENCIAS:**

Para efectos de construir las "Tablas de Consecuencias" para cada recurso expuesto, se utilizarán los siguientes criterios:

**Insignificante:** Las consecuencias no afectan de ninguna forma al sistema en evaluación. Los defectos pueden ser retrabajados en el lugar. Defecto menor identificado por un cliente observador.

**Baja** Las consecuencias no afectan en forma significativa el funcionamiento del sistema en evaluación; Defecto menor identificado por los clientes. El producto requiere clasificación y retrabajo.

**Moderada:** Las consecuencias solo afectan parcialmente el funcionamiento del sistema en evaluación. Interrupción menor en la producción, algo de desperdicio, pérdida del desempeño de la función secundaria, 100% de retrabajo.

**Alta:** Las consecuencias afectan de una manera total el funcionamiento del sistema, en forma temporal, pero no de una manera irrecuperable; Interrupción mayor en la producción, 100% de desperdicio, el producto requiere clasificación, pérdida o reducción de la función primaria.

**Extrema:** Las consecuencias afectan totalmente al sistema generando daños irrecuperables, pero sin hacerlo desaparecer; pérdidas o daños considerables. Daño a equipo o al operador, peligro potencial.

Las "Consecuencias" de una falla en equipos a considerar deben valorarse en forma independiente para cada uno de los subsistemas definidos. La cantidad

de niveles, el nombre de dichos niveles y el valor de referencia asignado a cada uno, será siempre el mismo en todos los equipos. La única variación entre las tablas será la correspondiente a la "Definición" del nivel (la forma de seleccionarlo), el cual debe referirse al tipo específico de consecuencia.

La tabla 2.6 muestra los niveles de consecuencia para el equipo o sistema por falla de afectación a la operación, ya que sería el factor crítico a tener en cuenta frente a la presentación de una falla potencial técnica.

Estos criterios se presentan según las características del sistema que este operando cada operador de servicio el cual debe de definir los criterios de valoración de consecuencias operacionales y con ellos construir su propia tabla de consecuencias.

### **3.4 MEDIDA DEL RIESGO**

Las fallas de equipos que afectan a una empresa pueden materializarse y sus consecuencias pueden variar en cuanto a su magnitud. Una falla evaluada en cuanto a su probabilidad de ocurrencia y en cuanto a la magnitud de sus consecuencias potenciales esperadas, configura un RIESGO.

Con base en la anterior definición, el riesgo puede expresarse como el producto de la frecuencia (probabilidad) del evento por la magnitud de sus consecuencias.

Matemáticamente se expresa como:

$$R = F \times I$$

Donde:

R = Valor del Riesgo de Ocurrencia

F = Frecuencia

I = Intensidad de las Consecuencias

### 3.4.1 Valoración de los riesgos

Siendo el riesgo determinado por dos "variables independientes" (frecuencia y consecuencias) se deben establecer los diferentes valores relativos de riesgo posible en el sistema de referencia, combinando los valores seleccionados para frecuencia y consecuencias en las tablas de valoración. Esto se establece creando una "Matriz de Riesgos" con las dos variables, en donde a cada intersección se le asigne un valor único equivalente al producto de la frecuencia por la consecuencia.

Las consecuencias de una falla de equipo posible (riesgo) pueden tener diferente IMPACTO sobre el proceso productivo del sistema en evaluación.

		CONSECUENCIAS				
		NULA	BAJA	MODERADA	ALTA	EXTREMA
FRECUENCIA	MUY ALTA	25	50	100	250	500
	ALTA	20	40	80	200	400
	MODERADA	15	30	60	150	300
	BAJA	10	20	40	100	200
	MUY BAJA	5	10	20	50	100

Tabla 3.2 - Valores de riesgo para el sistema

Para la valoración de frecuencias y consecuencias puede utilizarse análisis probabilístico, tablas de siniestralidad de referencia cuando ellas existan (por ejemplo Tasas e Fallas de Equipos, etc.), modelación por computador, métodos de análisis de Riesgos en Procesos como HAZOP, "What If..", o similares, o el conocimiento y la experiencia de los integrantes de los equipos de análisis.

Debe tenerse presente que una vez estimada la frecuencia para un equipo, este valor es el mismo para todos los potenciales de falla en dicho equipo; las consecuencias si pueden variar según sea el potencial de falla evaluado. Por ejemplo, si la frecuencia estimada para un escenario es FRECUENTE con valor asignado de 5, esta será la frecuencia cuando se evalúe el factor "Operación", o el factor "Económico".

Tomando todos los equipos definidos para el análisis, y usando los criterios y tablas establecidas, puede utilizarse los cálculos del Riesgo; registrar el nombre del nivel de frecuencia y consecuencia, así como los valores asignados a los mismos; multiplicar dichos valores y registrar el valor de riesgo resultante. Debe usarse un formato por cada potencial de falla que vaya a analizar y marcar claramente a que factor corresponde cada uno para evitar confusiones posteriores.

#### **3.4.2 Valores posibles de riesgo**

Con el fin de realizar el análisis de riesgo, cada equipo, dependiendo de su frecuencia y consecuencias relativas, tendrá asignado un "valor de riesgo" y

tendrá una ubicación dentro de la matriz construida con la frecuencia y con las consecuencias.

La matriz muestra el valor del riesgo que un equipo puede tener, en función de su posición en la matriz. El valor representa el Riesgo.

Debido a que en diferentes posiciones dentro de la Matriz se puede tener un mismo valor de riesgo de falla, pero las estrategias para modificar dicho valor podrán variar en tipo y alcances (por lo tanto en recursos y costos), es necesario establecer en forma clara la posición de cada equipo en la MATRIZ DE RIESGOS. Esto se logra asignándole a cada equipo unas "coordenadas" dadas por los valores de Frecuencia y Consecuencias, separadas por una "coma" y encerradas entre paréntesis.

Tal es, si un equipo dado presenta una frecuencia cuyo valor en la tabla de referencia es de 5 y sus consecuencias tienen un valor asignado de 20, entonces su posición es (5,20).

### **3.4.3 Organización y análisis de los resultados**

La evaluación de los riesgos en un sistema no es un objetivo en sí mismo, sino la base necesaria para tomar decisiones sobre como actuar sobre ellos (o para decidir no hacerlo si es el caso).

Una vez evaluados los equipos se determina la zona o rango en la cual se encuentra cada uno de ellos. Utilizando los criterios que se presentan en el subcapítulo 3.5 y con base en la posición de cada equipo, se registra si el equipo, de acuerdo a su posición, es "Aceptable", "Tolerable", "Inaceptable" o "Inadmisible".

Esta calificación debe hacerse para cada factor de riesgo de falla seleccionado para el análisis de riesgo.

#### **3.4.4 Priorizar los niveles de riesgos por factor de cada equipo**

Conociendo el valor del riesgo de la falla potencial de cada equipo y habiendo calificado su aceptabilidad, se prioriza la importancia de aquellos que excedan el "Nivel Aceptable" de mayor a menor.

A los equipos ubicados en la zona "Aceptable", no se les asigna PRIORIDAD pues por definición son "seguros" y entonces no es necesario intervenirlos.

Como se ha venido reiterando a lo largo de este documento, para efectos del alcance del trabajo solo se considera el factor de operación "Afectación de la Operación" en caso de fallas ocurridas.

### **3.5 CRITERIOS DE ACEPTABILIDAD**

Con el fin de calificar la "Gravedad Relativa" de un riesgo, y definir por lo tanto la mayor o menor necesidad de intervenirlo, así como determinar la magnitud de los recursos a destinar para ello, se requiere establecer "criterios de aceptabilidad". Para ello se

construye una MATRIZ DE ACEPTABILIDAD, en la cual se definan zonas o rangos de criterio Aceptable, Tolerable, Inaceptable e Inadmisibile.

Para poder realizar un análisis de riesgos se requiere definir que es "suficientemente seguro" para el sistema. Para ello se establecen criterios de aceptabilidad y con ellos se construye la "Matriz de Aceptabilidad de Riesgos". En ella se grafican los criterios sobre los "niveles" de riesgo que son aceptables o no para el sistema; estas zonas de "aceptabilidad" se establecen según una matriz de Frecuencia vs. Consecuencia y se divide en Zona Aceptable, Zona Tolerable, Zona inaceptable y Zona Inadmisibile.

**ACEPTABLE, zona L:** Situada en la parte inferior izquierda de la matriz. Esta zona corresponde a fallos con riesgo aceptable, aunque estaríamos dispuestos a aceptar riesgos mayores. Si estamos realizando algún tipo de tarea de prevención para conseguir que el riesgo se sitúe en esta zona, podríamos planteamos gastar menos en dichas tareas, pues estaríamos dispuestos a aceptar una severidad mayor (desplazándose hacia la derecha de la matriz), o una probabilidad de ocurrencia mayor (desplazándose hacia arriba en la matriz de riesgo), o ambas cosas al mismo tiempo.

**TOLERABLE, zona M:** Corresponde a los fallos con riesgo aceptable. El óptimo sería que todos los fallos tuviesen sus consecuencias dentro de esta zona, pues representa la relación óptima desde el punto de vista riesgo-coste.

**INACEPTABLE, zona S:** Corresponde a fallos con un riesgo no deseable y solamente tolerable si no se puede realizar ninguna acción para reducir el riesgo o si el coste de hacerlo es muy desproporcionado en relación a la reducción que se conseguiría.

**INADMISIBLE, zona H:** Situada en la parte superior derecha de la matriz. Corresponde a los fallos que tienen consecuencias inadmisibles, bien por la severidad de las mismas o bien por la probabilidad que tengan de ocurrir. No podemos admitir un fallo cuyo riesgo quede en esta zona, por eso esta zona es la de mayor prioridad de actuación. Hemos de eliminar o disminuir sus consecuencias o frecuencia de aparición.

### **3.5.1 Matriz de aceptabilidad**

Con base en los criterios sobre los niveles de aceptabilidad definidos como Aceptables, Tolerables, Inaceptables, e Inadmisible, se construye una "Matriz de aceptabilidad". La tabla 2.5 muestra la distribución de las zonas, según los criterios adoptados de aceptabilidad de riesgos.

### **3.5.2 Perfil de los riesgos**

Sobre la matriz de aceptabilidad de riesgos establecida anteriormente, se ubican cada uno de los equipos evaluados para un determinado fallo potencial. El conjunto de todos los equipos ubicados en una "Matriz de Aceptabilidad" configura "El Perfil de los Riesgos" para el sistema y sirve de base para administrar los riesgos.

### 3.6 ADMINISTRACION DE LOS RIESGOS

Una vez evaluados y analizados los riesgos de los diferentes equipos dentro del sistema, deben tomarse decisiones sobre como actuar sobre ellos (intervención del riesgo). Como punto de partida debe tenerse claro que el método de análisis de riesgos solo pretende actuar sobre aquella porción de los riesgos que esté por fuera del rango de aceptabilidad.

#### 3.6.1 Principios básicos de la toma de decisiones

Lo principios para la toma de decisiones para la actuación sobre los riesgos, se resume de la siguiente manera:

**RIESGOS ACEPTABLES:** Los equipos cuyo riesgo sea “Aceptable” no se intervienen, ya que por definición se consideran seguros.

**RIESGOS TOLERABLES:** Los equipos cuyo riesgo sea “Tolerable” deben ser intervenidos para llevarlos (o acercarlos) al nivel de aceptabilidad definido para el sistema; su intervención tiene una prioridad de segundo nivel, por lo que podría realizarse a mediano plazo.

**RIESGOS INACEPTABLES:** Los equipos cuyo riesgo sea “Inaceptable” deben ser intervenidos para llevarlos (o acercarlos) al nivel de aceptabilidad definido para el sistema; su intervención tiene una prioridad de primer nivel por lo que debe realizarse a corto plazo.

**RIESGOS INADMISIBLES:** Los equipos cuyo riesgo sea “Inadmisible” deben ser intervenidos en forma inmediata para disminuir su riesgo de falla y “sacarlos” de la zona inadmisibles; en caso de no lograr sacarlos del área inadmisibles, deberán ser cambiados.

**RIESGOS RESIDUALES:** Una vez intervenidos los riesgos en los equipos, deben tomarse decisiones complementarias en aquellos casos donde todavía queden segmentos del mismo por fuera del nivel aceptable (Riesgo Residual), o para los casos de aquellos equipos con riesgos de falla tolerables o inaceptables que no pueden ser intervenidos.

Una de estas decisiones podría ser, por ejemplo, financiar dicho riesgo mediante transferencia (seguros o subcontratación) o mediante su retención.

### **3.6.2 Intervención de los riesgos**

La acción inicial sobre un riesgo tiene por objeto disminuir el nivel del mismo modificando su posición, o sea llevándolo de una posición inicial con un nivel dado a otra posición final con un nivel menor que la inicial. Para ello se utilizan medidas que disminuyan la frecuencia (medidas de prevención) o que disminuyan las consecuencias (medidas de protección), o una combinación de ambas. Estas medidas se conocen genéricamente como MEDIDAS DE INTERVENCION.

### **3.6.3 Medidas de intervención**

Establezca las estrategias de mantenimiento básicas para lograr la nueva posición del equipo al cual quiere disminuirle su condición de riesgo; si el equipo debe "moverse" en forma vertical (disminución de la frecuencia) debe aplicarse una estrategia de PREVENCION. Si el equipo debe "moverse" en forma horizontal (disminución de las consecuencias) debe aplicarse una estrategia de PROTECCION. Si el equipo debe "moverse" en diagonal

(Disminución tanto de la frecuencia como de las consecuencias), entonces se debe aplicar una combinación de estrategias de PREVENCIÓN Y PROTECCIÓN.

La decisión de la implantación de las medidas finales definidas, estará en función de la realización de un análisis costo beneficio de las mismas.

## **CAPITULO 4**

### **APLICACIÓN DE METODOLOGÍA A UNA OPERACION MINERA CONVENCIONAL**

#### **4.1 ANALISIS PRELIMINAR**

Un aspecto importante de la metodología es que puede ser reutilizado para diferentes sistemas o escenarios. Es decir, un estudio desarrollado para un sistema importante de la planta puede utilizarse como base para unidades similares que tengan las mismas funciones. La división funcional en subsistemas, la identificación de las fallas funcionales y otros factores importantes pueden ser relativamente parecidos.

Además, cuando se realicen modificaciones de sistemas o subsistemas, no hace falta volver a estudiar toda la descripción funcional, sino que bastará con revisar el desarrollo anterior. Recordemos que el análisis de riesgos debe ser un programa trazable, documentado y sistemático.

La probabilidad de ocurrencia y las consecuencias se deben actualizar para asegurarse de que reflejan la nueva configuración, el entorno económico y el personal del sistema a estudiar.

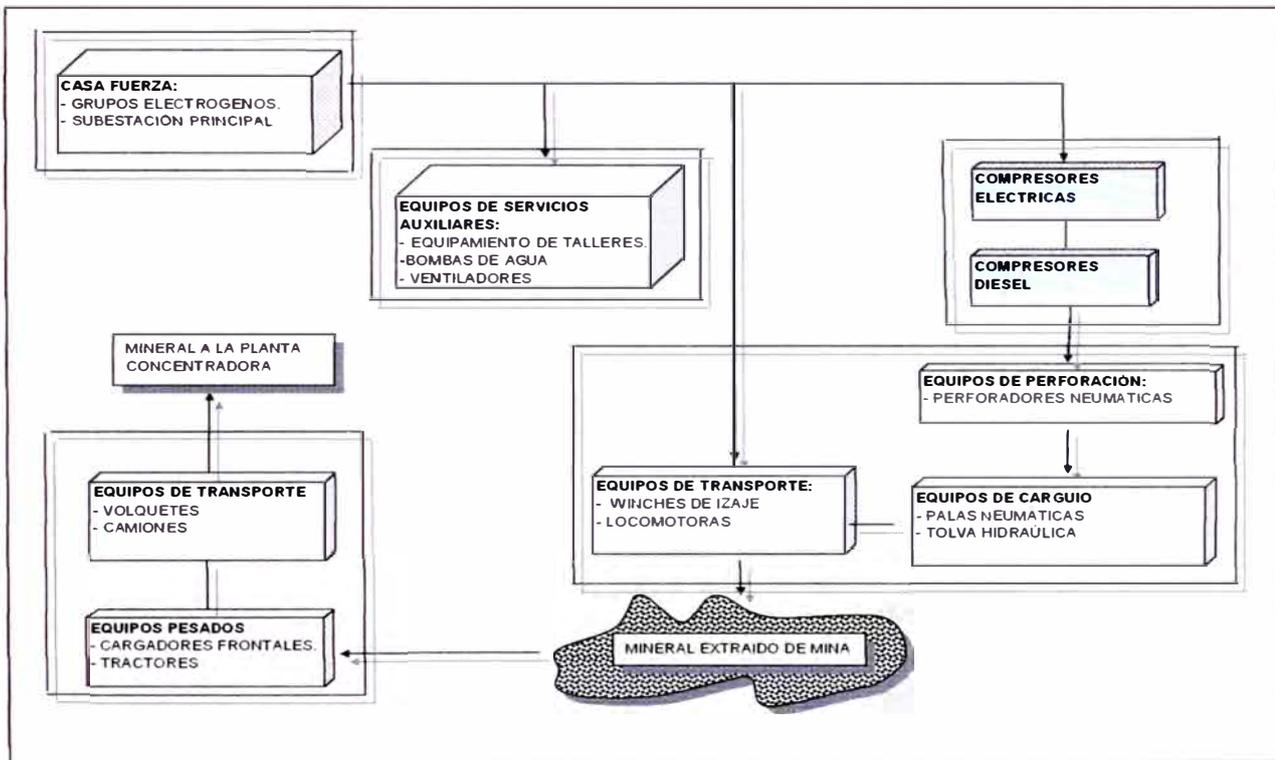
A continuación, se va a realizar una aplicación del análisis de riesgos a una operación minera convencional de 9500 ton. mes de producción para analizar sus diferentes subsistemas y su criticidad.

El sistema de equipos en una operación minera convencional consiste en:

- Una central de generación casa fuerza, funcionando como fuente de alimentación de energía eléctrica al sistema.
- Una casa compresores de generación de aire comprimido, funcionando como fuente de energía a equipos neumáticos.
- Parque de equipos de acarreo, transporte, servicios auxiliares eléctricos y diesel.

#### **4.1.1 Sistema de equipos de una operación minera convencional**

A continuación se muestra el esquema del sistema funcional de equipos principales en una operación minera convencional que se va estudiar:



**Figura 4.1 - Esquema del sistema de equipos en una operación minera convencional**

Según se aprecia en la figura, vamos a considerar cinco subsistemas en el ciclo de la operación minera convencional a estudiar:

- Subsistema de generación de energía casa fuerza como fuente de alimentación de energía eléctrica.
- Subsistema de generación de aire comprimido.
- Subsistema de equipos de acarreo, carguío y transporte de mina.
- Subsistema de equipos pesados y de transporte a la planta.
- Subsistema de equipos de servicios auxiliares.

## 4.2 RECOGIDA Y VALIDACION DE DATOS

A continuación realizaríamos una lista de equipos que intervienen en una operación minera convencional, en este caso del sistema a estudiar. Utilizamos un sistema de numeración de cinco dígitos.

- El primer dígito identifica el subsistema
- Los dos dígitos siguientes representan la familia de equipos
- Los dos últimos números indican la falla funcional del equipo

Tal como se muestra:

10000: Subsistema 1.

10200: Familia de equipos 2 del subsistema 1

10203: Falla funcional del equipo 3, correspondiente a la familia de equipos 2 del subsistema 1.

De esta forma los subsistemas son listados con sus correspondientes índices, como se muestra a continuación:

Subsistema	Descripción
10000	Subsistema de generación de energía casa fuerza como fuente de alimentación de energía eléctrica
20000	Subsistema de generación de aire comprimido
30000	Subsistema de equipos de acarreo, carguío, transporte de mina
40000	Subsistema de equipos pesados y de transporte a la planta
50000	Subsistema de equipos de servicios auxiliares

**Tabla 4.1 - Subsistemas a estudiar**

Cada subsistema debe de ser estudiado para identificar sus fallos funcionales en la familia de equipos y los equipos que pueden tener fallo funcional.

Para llevar a cabo este análisis sería deseable disponer de una base de datos con históricos de fallos. Aún así, no debemos olvidar que los históricos de fallos sólo muestran fallos que han ocurrido y no todos los que podrían ocurrir.

#### **4.2.1 Determinación del valor de las consecuencias**

Para dar un valor numérico a las consecuencias, utilizamos los valores numéricos obtenidos de la Tabla 2.6, (donde 1 representa las mínimas consecuencias y 100 las máximas).

#### **4.2.2 Determinación del valor de la probabilidad**

El problema que puede aparecer a la hora de calcular la frecuencia de los modos de fallo, es la falta de datos históricos o que haya un número escaso de ellos. Esto se puede suplir o complementar con ayuda de juicios expertos.

En general, a partir de un histórico de datos y con información adicional proveniente del personal de operación y mantenimiento con experiencia en la planta, se obtiene de forma satisfactoria toda la información necesaria para llevar a cabo el análisis y calcular los tiempos medios entre fallos (MTBF) o incluso las tendencias para próximo fallo.

#### **4.2.3 Calculo del Riesgo**

El riesgo para cada modo de fallo lo evaluamos de la siguiente manera:

$$\text{Riesgo} = \text{Consecuencia} * 1 / \text{MTBF (años)} * 12$$

El cálculo, lo realizaremos utilizando una hoja excel, donde se muestran los fallos funcionales correspondientes a cada subsistema. Para cada fallo se

calcula un valor de probabilidad y de consecuencias, los cuales se muestran en forma de columna. Así mismo, se computa el valor del riesgo según la fórmula descrita anteriormente.

### 4.3 DESARROLLO DEL ESTUDIO

#### 4.3.1 Subsistema generación de energía casa fuerza

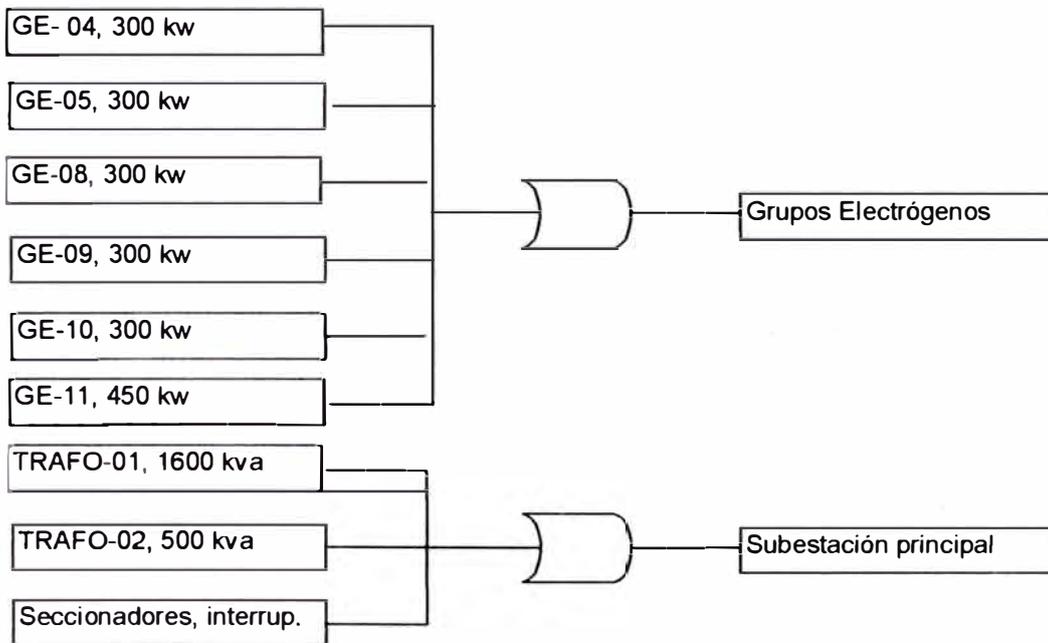
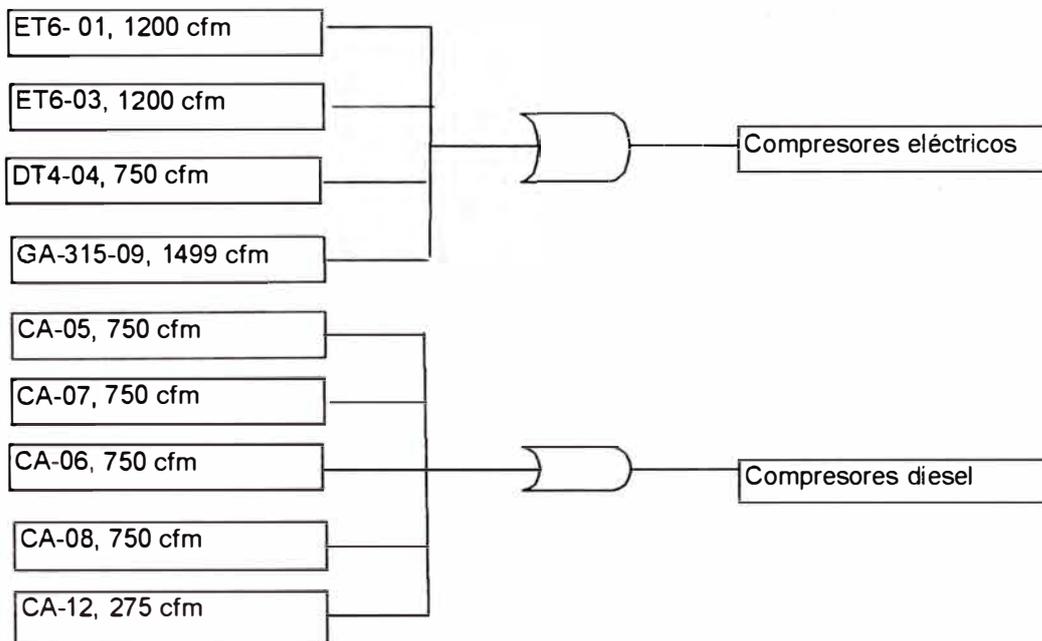


Figura 4.2 - Subsistema generación de energía casa fuerza

Indice	Descripción	Consecuencia	Tasa de fallos (fallos/año)	Riesgo
<b>10100</b>	<b>GRUPOS ELECTROGENOS</b>			<b>67,50</b>
10101	Grupo electrogeno CAT 3412 N°4, 300 KW	20	1	1,67
10102	Grupo electrogeno CAT 3412 N°5, 300 KW	30	1	2,50
10103	Grupo electrogeno CAT 3412 N°8, 300 KW	30	3	7,50
10104	Grupo electrogeno CAT 3412 N°9, 300 KW	30	12	30,00
10105	Grupo electrogeno CAT 3412 N°10, 300 KW	30	2	5,00
10106	Grupo electrogeno CAT 3412 STA N°11, 450 KW	50	5	20,83
<b>10200</b>	<b>SUBESTACIÓN PRINCIPAL</b>			<b>2,04</b>
10201	Transformador de 1600 KVA	75	0,1	0,63
10202	transformador de 500 KVA	20	0,1	0,17
10203	Seccionadores, interruptores	15	1	1,25

**Tabla 4.2 - Hoja de análisis para el subsistema casa fuerza**

**4.3.2 Subsistema generación de aire comprimido**



**Figura 4.3 - Subsistema generación de aire comprimido**

Índice	Descripción	Consecuencia	Tasa de fallos (fallas/año)	Riesgo
<b>20100</b>	<b>COMPRESORES ELECTRICOS</b>			<b>10,58</b>
20101	CA-01 - ET6 - TALLER 1	18	0,5	0,75
20102	CA-03 - ET6 - TALLER 3	18	1,0	1,50
20103	CA-04 - DT4 - TALLER	10	2,0	1,67
20104	CA-09 - GA 315 TALLER	40	2,0	6,67
<b>20200</b>	<b>COMPRESORES DIESEL</b>			<b>12,50</b>
20201	CA-05 - XAMS355M1-TALLER	10	7,0	5,83
20202	CA-07 - XP-750 - TRASATLANTICO	20	2,0	3,33
20203	CA-08 - XAMS355M2-TALLER	10	2,0	1,67
20204	CA-06 - XAMS355C- TALLER	5	2,0	0,83
20205	CA-12 - XAS126 NAZARENO	20	0,5	0,83

**Tabla 4.3 - Hoja de análisis para el subsistema de generación de aire comprimido**

### 4.3.3 Subsistema equipos mina: acarreo, carguío y transporte

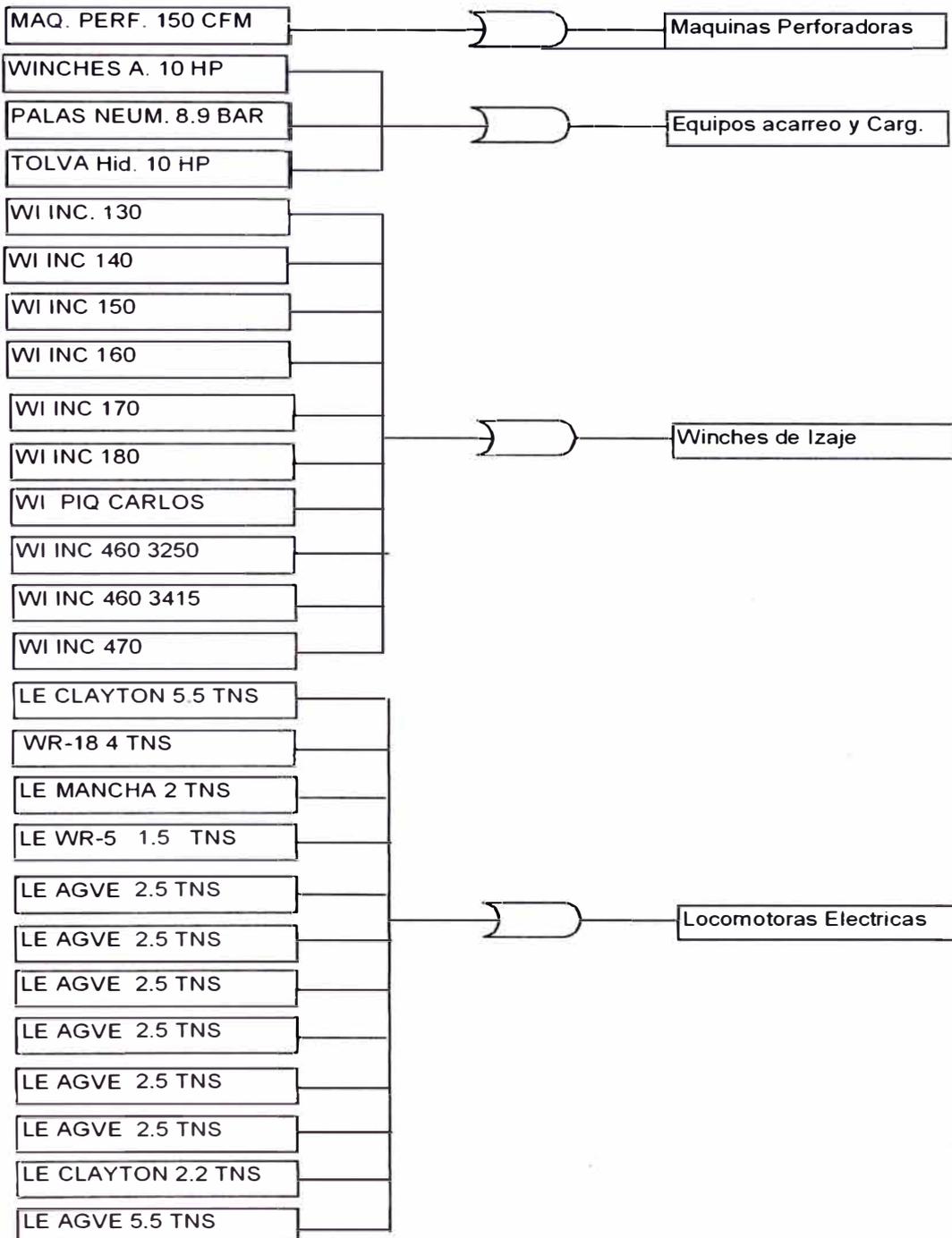
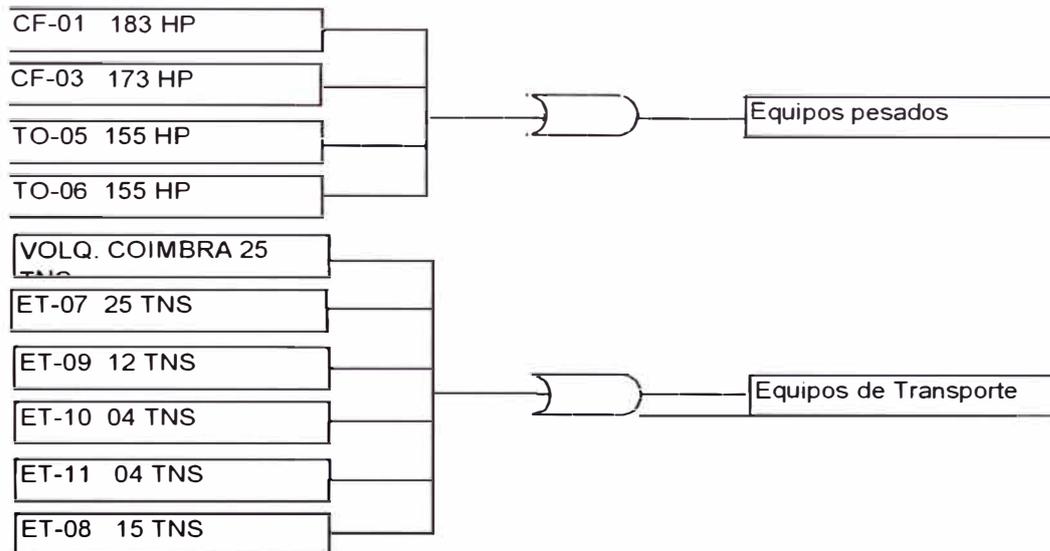


Figura 4.4 - Subsistema equipos mina: acarreo, carguío y transporte

Descripción	Consecuencia	Tasa de fallos (fallas/año)	Riesgo
<b>EQUIPOS DE PERFORACIÓN</b>			<b>3,00</b>
PERFORADORAS NEUMÁTICAS	18	2,0	3,00
<b>EQUIPOS DE ACARREO Y CARGUÍO</b>			<b>4,50</b>
WINCHES DE ARRASTRE (38)	18	1,5	2,25
PALAS NEUMÁTICAS (14)	12	1,5	1,50
TOLVA HIDRAULICA NV 3250	18	0,5	0,75
<b>WINCHES DE IZAJE</b>			<b>39,68</b>
WINCHE DE IZAJE INCL 130 NV 3025	60	0,50	2,50
WINCHE DE IZAJE INCL 140 NV 3075	60	1,00	5,00
WINCHE DE IZAJE INCL 150 NV 3125	60	1,00	5,00
WINCHE DE IZAJE INCL 160 NV 3175	10	1,00	0,83
WINCHE DE IZAJE INCL 170 NV 3200	10	2,00	1,67
WINCHE DE IZAJE INCL 180 NV 3250	10	2,00	1,67
WINCHE DE IZAJE FUNVESA NV 3250	75	1,00	6,25
WINCHE DE IZAJE INCL 460 CARMEN NV 3250	50	1,00	4,17
WINCHE DE IZAJE INCL 460 BARBARITA NV 3360	30	2,00	5,00
WINCHE DE IZAJE INCL 470 BARBARITA NV 3415	30	3,00	7,50
<b>LOCOMOTORAS</b>			<b>26,88</b>
LOCOMOTORA CLAYTON 5.5 TON NV 3250	18	5,0	7,50
LOCOMOTORA WR-18 4 TON NV 3250	18	2,0	3,00
LOCOMOTORA MANCHA 2 TON NV 3480	18	1,0	1,50
LOCOMOTORA WR-5 1.5 TON NV 3405	15	2,0	2,50
LOCOMOTORA CLAYTON 2.2 TON NV 3075	12	1,0	1,00
LOCOMOTORA AGVE 2.5 TON NV 3025	12	1,0	1,00
LOCOMOTORA AGVE 2.5 TON NV 2975	18	0,5	0,75
LOCOMOTORA AGVE 2.5 TON NV 3360	18	1,0	1,50
LOCOMOTORA AGVE 2.5 TON NV 3415 AUGE	20	2,0	3,33
LOCOMOTORA AGVE 2.5 TON NV 3415 ESMERALDA	20	2,0	3,33
LOCOMOTORA AGVE 2.5 TON NV 3415 NAZARENO	15	0,5	0,63
LOCOMOTORA AGVE 5.5 TNS TRASATLAN	20	0,5	0,83

**Tabla 4.4 - Hoja de análisis para el subsistema equipos mina**

**4.3.4 Subsistema equipos superficie: equipos pesados, unidades de transporte**



**Figura 4.5 Subsistema equipos superficie; equipos pesados, unidades de transporte**

Indice	Descripción	Consecuencia	Tasa de fallos (fallas/año)	Riesgo
<b>40100</b>	<b>EQUIPOS PESADOS</b>			<b>8,33</b>
40101	CARGADOR FRONTAL CAT 950F	20	3	5,00
40102	CARAGDOR FRONTAL CAT 924G	18	1,0	1,50
40103	TRACTOR D6G	10	1,0	0,83
40104	TRACTOR D6D	6	2,0	1,00
<b>40200</b>	<b>UNIDADES DE TRANSPORTE</b>			<b>27,68</b>
40201	VOLQUETES COIMBRA (3), TRANSPORTE DE MINERAL	12	2	2,00
40202	VOLQUETE NL-12, TRANSPORTE DE PERSONAL	8	13	8,67
40203	INTERNATIONAL, TRANSPORTE DE PERSONAL	3	8	2,00
40204	MITSUBISHI CANTER, SERVICIOS VARIOS	2	4	0,67
40205	MITSUBISHI FUSO, TRANSPORTE DE PERSONAL	6	1	0,50
40206	CISTERNA N-10, TRANSPORTE DE AGUA	15	11	13,75

**Tabla 4.5 - Hoja de análisis para el subsistema de equipos superficie**

#### 4.3.5 Subsistema equipos auxiliares

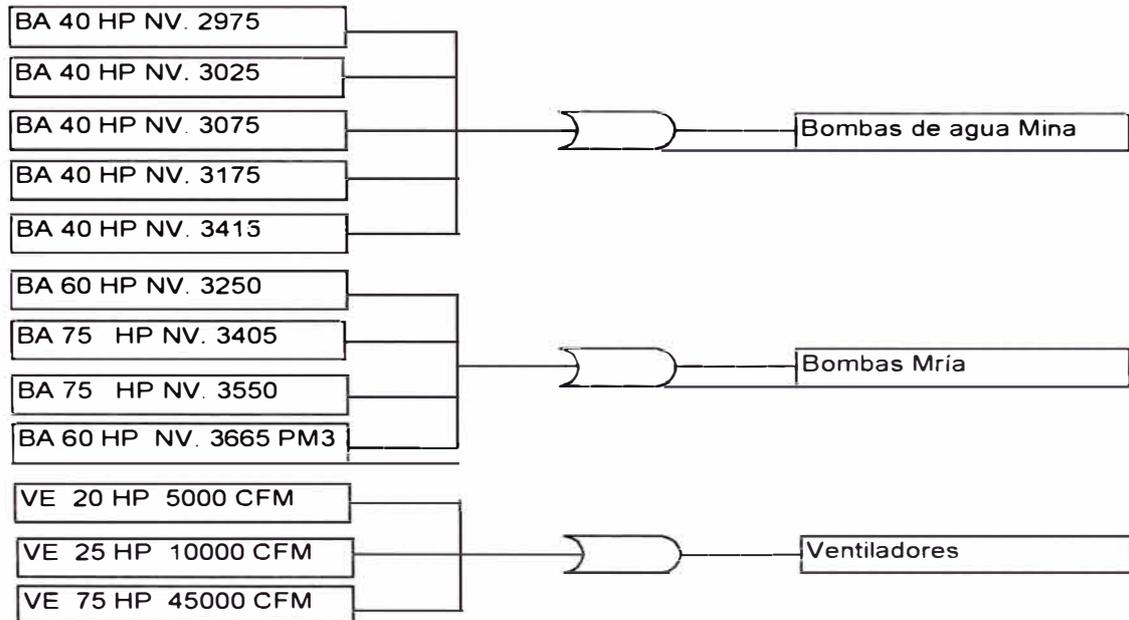


Figura 4.6 Subsistema equipos auxiliares

Indice	Descripción	Consecuencia	Tasa de fallos (fallas/año)	Riesgo
<b>50100</b>	<b>BOMBAS DE AGUA MINA</b>			<b>7,29</b>
50101	BOMBA 50-200 NV 2975	25	0,5	1,04
50102	BOMBA 50-200 NV 3025	25	1,0	2,08
50103	BOMBA 50-250 NV 3075	25	1,0	2,08
50104	BOMBA 50-250 NV 3175	25	1,0	2,08
50105	BOMBA 50-200 NV 3415	30	2,0	5,00
<b>50200</b>	<b>BOMBAS MARIA REC. PLANTA</b>			<b>5,00</b>
50201	BOMBA 50-250 NV 3250	40	1,0	3,33
50202	BOMBA ID-WR-16 NV 3405	40	0,5	1,67
50203	BOMBA ID-WR-16 NV 3550	40	0,5	1,67
50203	BOMBA 50-250 PM-3, NV 3665	30	1,0	2,50
<b>50300</b>	<b>VENTILADORES</b>			<b>5,33</b>
50301	VENTILADOR ELECTRICO 20 HP CFM 5000 (4)	18	1,0	1,50
50302	VENTILADOR ELECTRICO 25 HP CFM 10000 (3)	18	2,0	3,0
50303	VENTILADOR ELECTRICO 75 HP CFM 45000 (1)	20	0,5	0,83

Tabla 4.6 - Hoja de análisis para el subsistema de equipos auxiliares

## **CAPITULO 5**

### **ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA METODOLOGÍA**

## 5.1 REPORTES DE RESULTADOS DE ANALISIS DE RIESGO

IT	Indice	Descripción	Consecuencia	Tasa de fallos (fallas/año)	Riesgo
1	10104	Grupo electrogeno CAT 3412 N°9, 300 KW	30	12	30.00
2	10106	Grupo electrogeno CAT 3412 STA N°11, 450 KW	50	5	20.83
3	40206	CISTERNA N-10, TRANSPORTE DE AGUA	15	11	13.75
4	40202	VOLQUETE NL-12, TRANSPORTE DE PERSONAL	8	13	8.67
5	10103	Grupo electrogeno CAT 3412 N°8, 300 KW	30	3	7.50
6	30310	WINCHE DE IZAJE INCL 470 BARBARITA NV 3360	30	3.00	7.50
7	30401	LOCOMOTORA CLAYTON 5.5 TON NV 3250	18	5.0	7.50
8	20104	CA-09 - GA 315 TALLER	40	2.0	6.67
9	30307	WINCHE DE IZAJE FUNVESA NV 3250	75	1.00	6.25
10	20201	CA-05 - XAMS355M1-TALLER	10	7.0	5.83
11	10105	Grupo electrogeno CAT 3412 N°10, 300 KW	30	2	5.00
12	30302	WINCHE DE IZAJE INCL 140 NV 3075	60	1.00	5.00
13	30303	WINCHE DE IZAJE INCL 150 NV 3125	60	1.00	5.00
14	30309	WINCHE DE IZAJE INCL 460 BARBARITA NV 3415	30	2.00	5.00
15	40101	CARGADOR FRONTAL CAT 950F	20	3	5.00
16	50105	BOMBA 50-200 NV 3415	30	2.0	5.00
17	30308	WINCHE DE IZAJE INCL 460 CARMEN NV 3250	50	1.00	4.17
18	20202	CA-07 - XP-750 - TRASATLANTICO	20	2.0	3.33
19	30409	LOCOMOTORA AGVE 2.5 TON NV 3415 AUGÉ	20	2.0	3.33
20	30410	LOCOMOTORA AGVE 2.5 TON NV 3415 ESMERAL	20	2.0	3.33
21	50201	BOMBA 50-250 NV 3250	40	1.0	3.33
22	30101	PERFORADORAS NEUMÁTICAS	18	2.0	3.00
23	30402	LOCOMOTORA WR-18 4 TON NV 3250	18	2.0	3.00
24	50302	VENTILADOR ELECTRICO 25 HP CFM 10000 (3)	18	2.0	3.0
25	10102	Grupo electrogeno CAT 3412 N°5, 300 KW	30	1	2.50
26	30301	WINCHE DE IZAJE INCL 130 NV 3025	60	0.50	2.50
27	30404	LOCOMOTORA WR-5 1.5 TON NV 3405	15	2.0	2.50
28	50203	BOMBA 50-250 PM-3, NV 3665	30	1.0	2.50
29	30201	WINCHES DE ARRASTRE (38)	18	1.5	2.25
30	50102	BOMBA 50-200 NV 3025	25	1.0	2.08
31	50103	BOMBA 50-250 NV 3075	25	1.0	2.08
32	50104	BOMBA 50-250 NV 3175	25	1.0	2.08
33	40201	VOLQUETES COIMBRA (3), TRANSPORTE DE MINERAL	12	2	2.00
34	40203	INTERNACIONAL, TRANSPORTE DE PERSONAL	3	8	2.00
35	10101	Grupo electrogeno CAT 3412 N°4, 300 KW	20	1	1.67
36	20103	CA-04 - DT4 - TALLER	10	2.0	1.67
37	20203	CA-08 - XAMS355M2-TALLER	10	2.0	1.67
38	30305	WINCHE DE IZAJE INCL 170 NV 3200	10	2.00	1.67
39	30306	WINCHE DE IZAJE INCL 180 NV 3250	10	2.00	1.67
40	50202	BOMBA ID-WR-16 NV 3405	40	0.5	1.67
41	50203	BOMBA ID-WR-16 NV 3550	40	0.5	1.67
42	20102	CA-03 - ET6 - TALLER 3	18	1.0	1.50
43	30202	PALAS NEUMÁTICAS (14)	12	1.5	1.50
44	30403	LOCOMOTORA MANCHA 2 TON NV 3480	18	1.0	1.50
45	30408	LOCOMOTORA AGVE 2.5 TON NV 3360	18	1.0	1.50
46	40102	CARAGDOR FRONTAL CAT 924G	18	1.0	1.50
47	50301	VENTILADOR ELECTRICO 20 HP CFM 5000 (4)	18	1.0	1.50
48	10203	Seccionadores, interruptores	15	1	1.25
49	50101	BOMBA 50-200 NV 2975	25	0.5	1.04
50	30405	LOCOMOTORA CLAYTON 2.2 TON NV 3075	12	1.0	1.00
51	30406	LOCOMOTORA AGVE 2.5 TON NV 3025	12	1.0	1.00
52	40104	TRACTOR D6D	6	2.0	1.00
53	20204	CA-06 - XAMS355C- TALLER	5	2.0	0.83
54	20205	CA-12 - XAS126 NAZARENO	20	0.5	0.83
55	30304	WINCHE DE IZAJE INCL 160 NV 3175	10	1.00	0.83
56	30412	LOCOMOTORA AGVE 5.5 TNS TRASATLAN	20	0.5	0.83
57	40103	TRACTOR D6G	10	1.0	0.83
58	50303	VENTILADOR ELECTRICO 75 HP CFM 45000 (1)	20	0.5	0.83
59	20101	CA-01 - ET6 - TALLER 1	18	0.5	0.75
60	30203	TOLVA HIDRAULICA NV 3250	18	0.5	0.75
61	30407	LOCOMOTORA AGVE 2.5 TON NV 2975	18	0.5	0.75
62	40204	MITSUBISHI CANTER, SERVICIOS VARIOS	2	4	0.67
63	10201	Transformador de 1600 KVA	75	0.1	0.63
64	30411	LOCOMOTORA AGVE 2.5 TON NV 3415 NAZAREN	15	0.5	0.63
65	40205	MITSUBISHI FUSO, TRANSPORTE DE PERSONAL	6	1	0.50
66	10202	trandformador de 500 KVA	20	0.1	0.17

Tabla 5.1 - Ranking de riesgos de fallas en equipos

Como se puede ver en la Tabla 5.1 los contribuyentes más importantes de riesgo proceden de diferentes subsistemas y equipos. Cada línea del ranking de riesgo proporciona la contribución de riesgo que cada equipo aporta al riesgo total del sistema. Por tanto, actuando sobre las causas de fallo de los equipos se podrá modificar el riesgo global.

Existen fallos basados en el equipo o combinación de fallos que pueden ser prevenidos o causados según la manera que las personas interactúen con el sistema a través de tareas de mantenimiento o procedimientos operacionales. El ranking de riesgos muestra la importancia que cada fallo en los equipos tiene en relación a los otros.

En la Figura 5.1 se muestra el mismo ranking de riesgos, pero esta vez representado en forma de gráfico ordenado. En el eje de abscisas se representan los equipos. En el eje de ordenadas se sitúan los valores de riesgo calculados.

Los equipos situados en el extremo derecho del gráfico presentan un riesgo muy bajo y que además disminuye rápidamente. Los valores de riesgo tienen un rango desde 0.17 hasta 30.00, lo que significa una diferencia de varios órdenes de magnitud. Esta diferencia puede ser todavía bastante mayor, dependiendo del sistema que estemos analizando, ya que en un análisis de riesgos estamos considerando tanto los fallos rutinarios como los fallos muy improbables. De la misma manera, las consecuencias pueden aumentar de forma muy importante el rango de valores del riesgo. En general, el rango de los valores del riesgo se determina por la escala utilizada para calcular los valores de las consecuencias y probabilidades. Dicha escala suele ser específica para cada sistema.

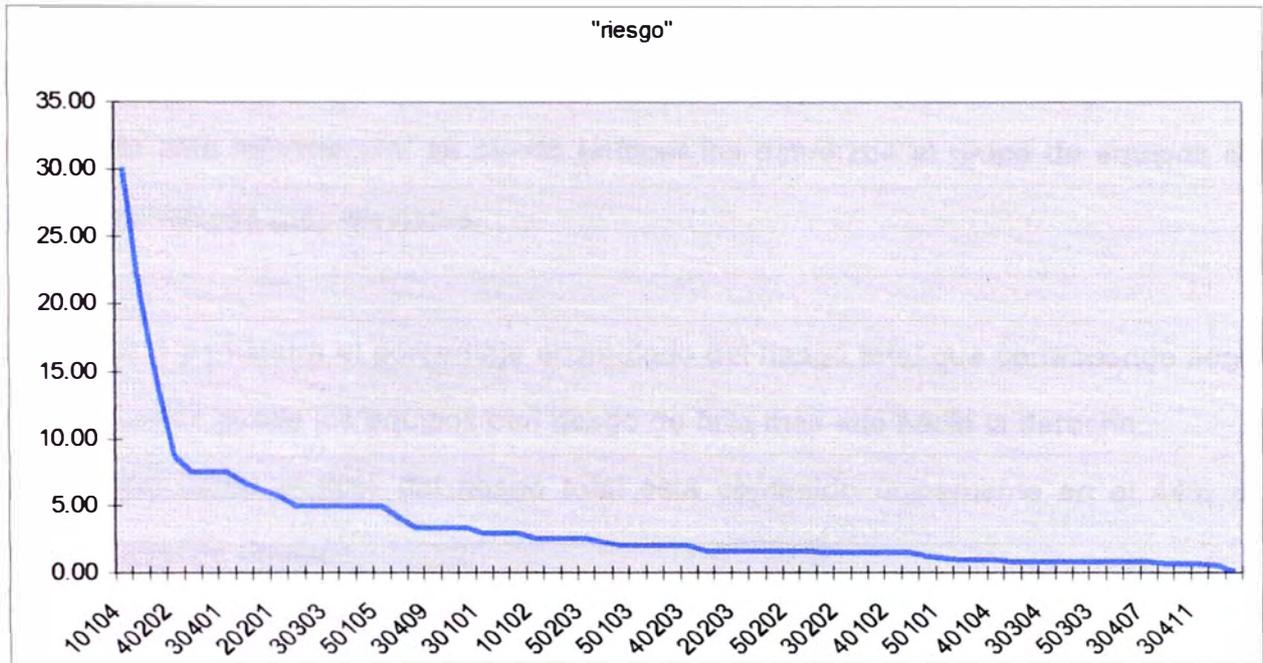


Figura 5.1 - Gráfico ordenado de ranking de riesgos de fallas en equipos

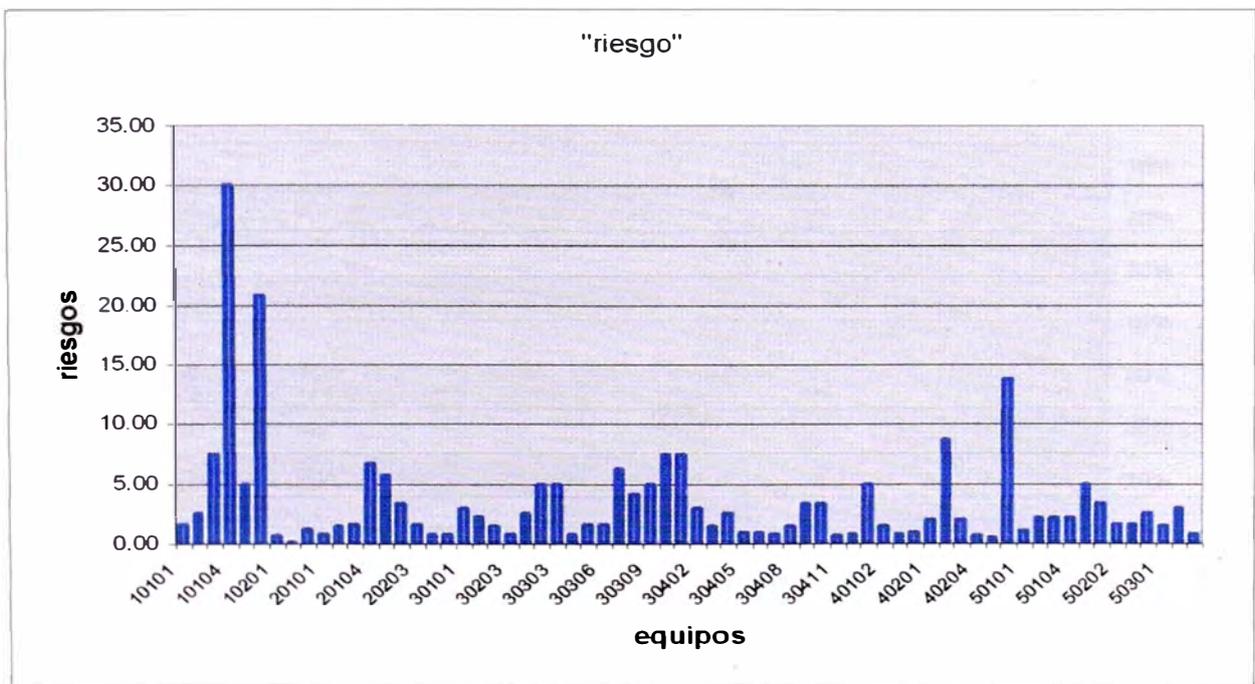


Figura 5.2 - Gráfico de ranking de riesgos de fallas en equipos

La aplicación de la metodología nos permite modificar, mejorar y optimizar la forma de realizar el mantenimiento a partir de la información obtenida del análisis de riesgos. Utilizando esta información, se puede enfocar los esfuerzos al grupo de equipos que presenten riesgos más elevados.

La Figura 5.3 muestra el porcentaje acumulado del riesgo total que corresponde según nos movemos desde los equipos con riesgo de falla más alto hacia la derecha. Se aprecia como el 80% del riesgo total está contenido únicamente en el 44% del número total de equipos.

Así mismo, el 60% del riesgo total está contenido únicamente en el 22% del número total de equipos.

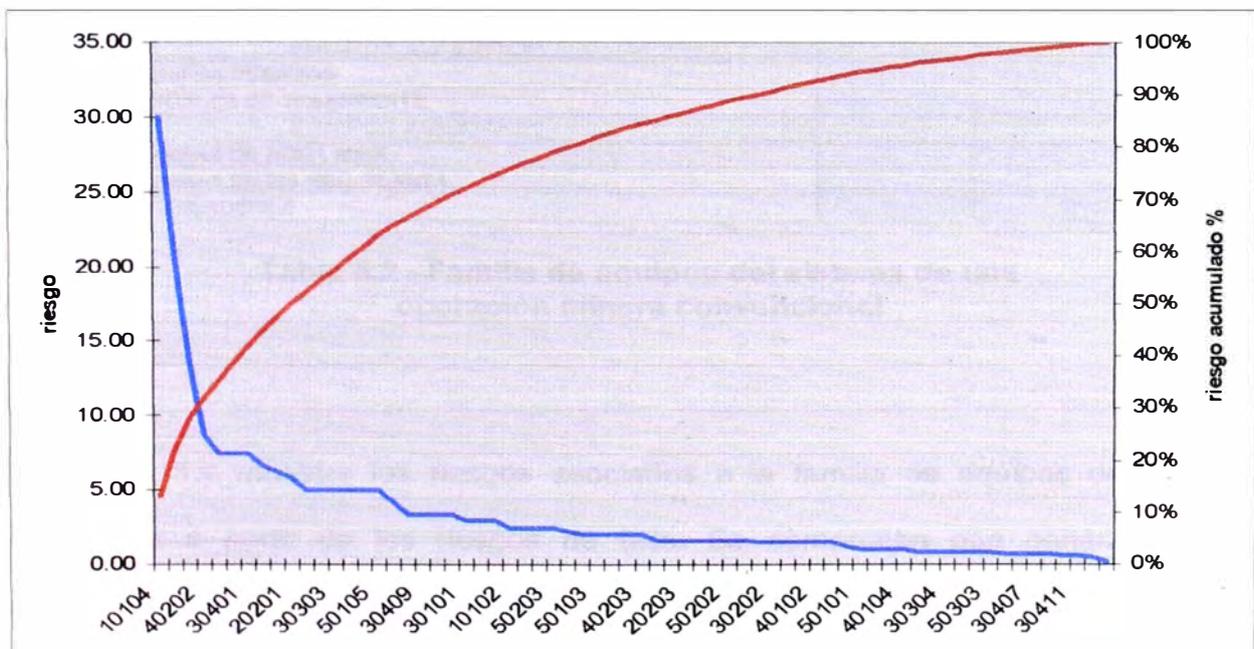


Figura 5.3 - Riesgo acumulado (%) y ranking de riesgos de fallas en equipos

Los valores de riesgo asociados a cada equipo se pueden calcular sumando los riesgos de fallas. El cálculo del riesgo asociado a cada equipo sirve para mostrar como el riesgo se distribuye entre las diferentes partes funcionales del sistema estudiado.

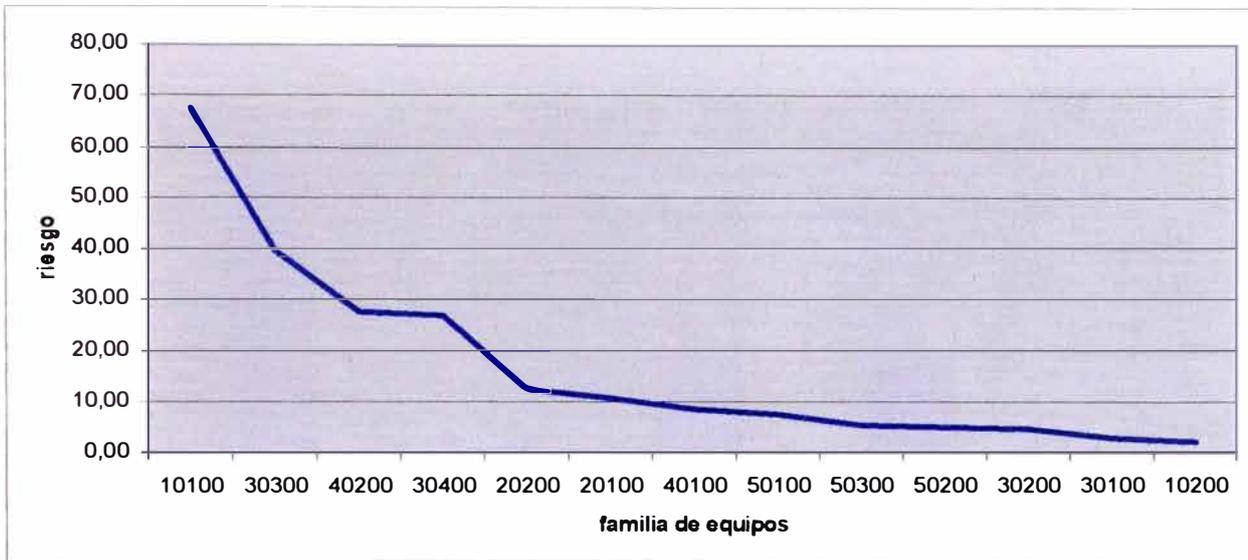
Esta información puede ser muy útil para el equipo encargado de diseñar el mantenimiento.

## 5.2 VALORES DE RIESGO ASOCIADOS A CADA SUBSISTEMA

FAMILIA DE EQUIPOS		Consecuencia	Tasa de fallos (fallas/año)	Riesgo
CASA FUERZA				69,54
10100	GRUPOS ELECTROGENOS			67,50
10200	SUBESTACIÓN PRINCIPAL			2,04
GENERACIÓN DE AIRE COMPRIMIDO				23,08
20100	COMPRESORES ELECTRICOS			10,58
20200	COMPRESORES DIESEL			12,50
EQUIPOS INTERIOR MINA				37,08
30100	EQUIPOS DE PERFORACIÓN			4,50
30200	EQUIPOS DE ACARREO Y CARGUÍO			5,00
30300	WINCHES DE IZAJE			27,58
30400	LOCOMOTORAS			39,58
EQUIPOS SUPERFICIE				35,21
40100	EQUIPOS PESADOS			8,33
40200	UNIDADES DE TRANSPORTE			26,88
EQUIPOS AUXILIARES				15,63
50100	BOMBAS DE AGUA MINA			7,29
50200	BOMBAS MARIA REC. PLANTA			3,00
50300	VENTILADORES			5,33

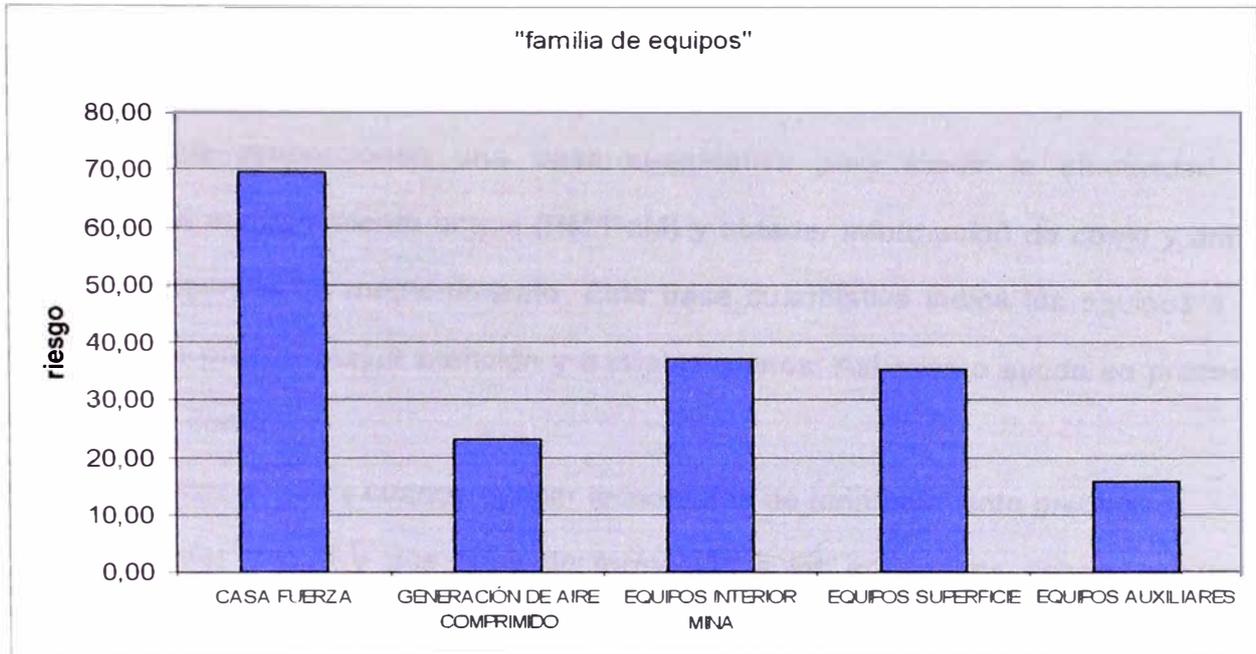
**Tabla 5.2 - Familia de equipos del sistema de una operación minera convencional**

La Figura 5.4 muestra los riesgos asociados a la familia de equipos del sistema, calculados a partir de los riesgos de falla. Se comprueba que generalmente la distribución obtenida para la familia de equipos tiene una forma más lineal que en el caso de fallas por equipo.



**Figura 5.4 - Gráfico ordenado del ranking de riesgos en familia de equipos**

Sumando los riesgos asociados a la familia de equipos de cada subsistema, podemos calcular la contribución que cada uno de los subsistemas estudiados aporta a todo el sistema global de una operación minera convencional. La comparación entre subsistemas, representada en la Figura 5.5, proporciona un “feedback” al equipo que desarrolla el análisis, sobre como el riesgo se distribuye entre los subsistemas. El ranking obtenido debería coincidir con la percepción que tenga el grupo de expertos que lleven a cabo el estudio.



**Figura 5.5 - Contribución de los subsistemas al riesgo global**

En el estudio propuesto se comprueba que como era de esperar los subsistemas de casa fuerza, equipos de interior mina y superficie, son los que presentan un mayor riesgo, mientras que los equipos auxiliares contribuyen con el riesgo más pequeño.

Estos resultados deben coincidir con la percepción del equipo de mantenimiento, ya que si dicho equipo va a utilizar el ranking de riesgos proporcionado por el análisis como guía para el diseño del mantenimiento, se deben creer que los resultados son válidos. Si los resultados macroscópicos de riesgo no son consistentes con la visión que tengan los expertos de mantenimiento, entonces no se conseguirá el grado necesario de credibilidad para la aplicación práctica y será necesaria una revisión del análisis utilizado.

### 5.3 TOMA DE DECISIONES E IMPLEMENTACION

A partir de los resultados detallados obtenidos en la metodología, se deben establecer objetivos que proporcionen una base cuantitativa para medir la efectividad del programa de mantenimiento actual (PM/PdM) y obtener información de como y donde dirigir los recursos de mantenimiento. Esta base cuantitativa indica los equipos a los que se debe prestar mayor atención y a cuales menos. Así mismo ayuda en procesos de decisión, como:

Determinar donde y cuando aplicar tecnologías de mantenimiento predictivo.

Determinar donde y que tipos de formación a los empleados deben llevarse a cabo.

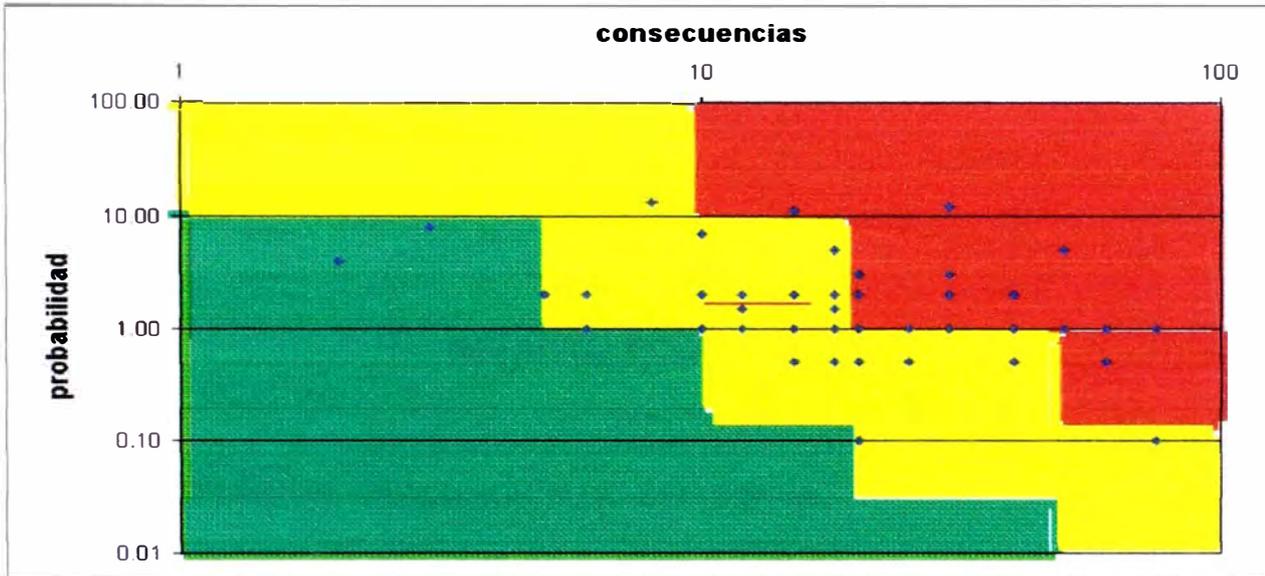
Sugerir nuevas tareas de mantenimiento o justificar las actuales.

Sugerir nuevas frecuencias en las tareas de mantenimiento o justificar las actuales.

Identificar áreas donde se realiza mantenimiento excesivo o escaso.

Identificar los cambios de diseño necesarios.

Por último, podemos representar el riesgo asociado a cada uno de los equipos analizados mediante una matriz de riesgos:



**Figura 5.6 - Matriz de riesgos aplicada al sistema de equipos de una operación minera convencional**

La matriz de riesgos nos permite de forma sencilla:

- Obtener valoraciones de riesgo de fallas funcionales para los principales equipos (este es un método muy útil para documentar los riesgos identificados).
- Identificar los equipos más críticos, sobre los cuales, se deberán tomar acciones de reducción de riesgos.
- Evaluar los programas actuales de inspección y mantenimiento y sugerir la implantación de nuevos programas.
- Descubrir áreas con exceso o falta de mantenimiento.
- Realizar Benchmarking con otras instalaciones parecidas.

Todo ello conduce al objetivo fundamental de la metodología para establecer estrategias adecuadas de mantenimiento, es decir, optimizar el costo en mantenimiento sin que la confiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y seguridad de la planta no sólo no se vea afectada, sino que incluso sea mejorada.

## **CAPITULO 6**

### **IMPACTO ECONOMICO**

#### **6.1 VALORACION, EVALUACION DE EFICIENCIA**

Del ranking de riesgos mostrado en la tabla 5.1 el equipo más crítico es el Grupo Electrónico CAT 3412 N° 9 quien muestra el mayor riesgo, además de encontrarse en la zona INACEPTABLE en la matriz de riesgos.

##### **6.1.1 Costos de mantenimiento preventivo**

Las actividades de mantenimiento preventivo realizadas en el grupo electrónico CAT 3412 N° 9 son como se muestra a continuación.

El costo hora – hombre de un técnico de mantenimiento es de US\$ 10.0

El costo hora – hombre de un operador es de US\$ 06.0

El costo de suministros (lubricantes, filtros, etc) US\$ 3350

Algunas tareas de mantenimiento lo realiza el operador como limpieza, lubricación e inspecciones de rutina.

EQ. NE: GE-09		Descripción: Grupo electrógeno CAT 3412 N° 09		Ubicación: 1000	28/02/2007	
TAREA DE MP	FRECUENCIA	TIEMPO REQ (HRS)	HORAS AÑO OPER	HORAS AÑO MANT	COSTO ANUAL (OP.) US\$	COSTO ANUAL (MANT) US\$
LIMPIEZA	DIARIA	0.1	30		180	0
	SEMANTAL	0.3	15		90	0
	MENSUAL	0.5	6		36	0
INSPECCION	DIARIA	0.1	30		180	0
	SEMANTAL	0.2	10		60	0
	MENSUAL	4		48	0	480
LUBRICACION	DIARIA	0.1	30		180	0
	MENSUAL	0.5	6		36	0
AJUSTE	DIARIA	0.1	30		180	0
	SEMANTAL	0.2	10		60	0
	MENSUAL	0.5		6	0	60
REPARACIONES	SEMANTAL	0.5		25	0	250
	MENSUAL	1		12	0	120
OVERHAUL	TRIMESTRAL	12		48	0	480
	ANUAL	24		24	0	240
<b>TOTALES</b>				163	1002	1630
<b>COSTO TOTAL DE MANO DE OBRA</b>						1630
<b>COSTO TOTAL DE MATERIALES (lubricantes, etc)</b>						3350
<b>COSTOS ANUALES TOTALES DE MP</b>						<b>4,980</b>

Tabla 6.1 - Cuadro de costos de mantenimiento preventivo

### 6.1.2 Costos de mantenimiento predictivo

Las actividades de mantenimiento predictivo para el grupo electrógeno CAT 3412 N° 9 son como se muestra a continuación.

- El costo hora – hombre de un técnico de mantenimiento es de US\$ 10.0
- El costo hora – hombre de un operador es de US\$ 06.0

- El costo de instrumentos de medición como vibró metro, tacómetro, medidores multifunción, etc) asciende a US\$ 15000, prorrateado en 06 equipos, siendo depreciados en 5 años, da US\$ 500 anual.
- El costo de análisis de aceite lubricante esta en US\$ 75.00 mensual.
- El costo de instrumentación de termografía esta en US\$ 6000, prorrateado en 06 equipos, siendo depreciados en 5 años, da US\$ 200 anual.

EQ. NE: GE-09	Descripción: Grupo electrógeno CAT 3412 N° 09	Ubicación: 1000
---------------	--	--------------------

TAREA DE MPD	FRECUENCIA	TIEMPO REQ (HRS)	HORAS AÑO	COSTO ANUAL M. OBRA US\$	COSTO ANUAL (OTROS) US\$
MEDICION DE VIBRACIONES	MENSUAL	0.5	6	60	
ANALISIS DE VIBRACIONES	MENSUAL	0.5	6	60	
INSTRUMENTOS Y SOFTWARE					500
RECOLECCION DE ACEITE LUBRICACION	MENSUAL	0.5	6	60	
ANALISIS DE ACEITE LUBRICANTE	MENSUAL				900
TERMOGRAFIA	SEMESTRAL	0.5	1	10	
INSTRUMENTACIÓN TERMOGRAFICA					200
OTRA ACTIVIDAD	MENSUAL	1	12	120	

<b>TOTALES</b>			<b>31</b>	<b>310</b>	<b>1600</b>
----------------	--	--	-----------	------------	-------------

COSTO TOTAL DE MANO DE OBRA	310
OTROS COSTOS TOTALES	1,600
<b>COSTOS ANUALES TOTALES DE MPd</b>	<b>1,910</b>

**Tabla 6.2 - Cuadro de costos de mantenimiento predictivo**

### **6.1.3 Cuadro comparativo de costos**

Los datos de costo por hora se dan de la siguiente manera:

- Costo de pérdida de producción US\$ 260 esto por restricción del suministro de energía en horas de máxima demanda entrando en operación equipos diesel para compensar la disminución de suministro de energía eléctrica.
- Costo de reparación de fallas a US\$ 20 por considerar dos técnicos en las reparaciones.
- Costo de reprocesos a US\$ 37 por reiniciar operaciones teniendo que arrancar grupos en stand by y restablecimiento de operaciones.

Equipo N°: GE-09		Descripción: Grupo electrógeno CAT			Ubicación: 1000		28/02/2007
	MOTIVO	HORAS ACTUALES ANUALES	COSTO POR HORA (\$)	COSTO ACTUAL (\$)	HORAS FUTURAS	COSTO FUTURO (\$)	AHORRO DE COSTOS (\$)
1	Tiempo de parada por falla, pérdida de producción	150	260	39000	100	26000	13000
2	Sustitución de piezas por fallas			4500		2000	2500
3	Reparación de fallas	135	20	2700	90	1800	900
4	Mantenimiento realizado	163	10	1630	120	1200	430
5	Sustitución de piezas, suministros, lubricantes			3350		3045	305
6	Horas extras	50	15	750	33	500	250
7	Reprocesos	10	37	370	7	259	111
	<b>Total</b>	<b>508</b>		<b>52300</b>	<b>350</b>	<b>34805</b>	<b>17496</b>

Tabla 6.3 - cuadro de costos comparativos

#### 6.1.4 Retorno de la inversión (ROI)

El retorno de la inversión viene dado por el ahorro de la implementación del mantenimiento preventivo / predictivo al disminuir los costos de falla, reprocesos, y pérdida de producción.

$$\text{ROI} = \text{AHORRO} / \text{COSTO TOTAL MP Y MPd}$$

$$\text{ROI} = 17,496 / (4,980 + 1,910)$$

$$\text{ROI} = 2.54 = 254 \%$$

## **CONCLUSIONES**

1. La nueva metodología presentada puede adaptarse a todas las necesidades crecientes de la industria en general. El mantenimiento por tanto no sólo afecta a la disponibilidad sino a todos los aspectos de la efectividad del negocio.
2. El mantenimiento actual está caracterizado por la búsqueda continua de mecanismos que permitan eliminar o minimizar la ocurrencia de fallas y/o disminuir las consecuencias de los mismos, minimizando los costos incurridos.
3. Las metodología para análisis de riesgos combinada con modelos estructurales de confiabilidad y con datos genéricos y procedentes de las propias plantas de operación, proporcionan una base sólida para la toma de decisiones dentro de un amplio rango de usos para la gestión de los activos y la optimización de las tareas de mantenimiento.
4. La aplicación de la metodología resulta muy eficaz para reducir costos en las actividades de mantenimiento y por tanto aumentar los beneficios sin que ello suponga un aumento en los niveles de riesgos de falla en los equipos.

5. Esta metodología consigue ahorros considerables centrandó las actividades de mantenimiento en los equipos verdaderamente críticos, con el ahorro y el aumento en la seguridad que ello conlleva y facilita la identificación del tipo de mantenimiento óptimo para los equipos a partir de la matriz de riesgos y el diagrama de decisión desarrollado.
6. La metodología permite y aconseja aplicar una “realimentación continua”. El análisis de riesgo de fallas en equipos resulta un elemento clave en la búsqueda de la **MEJORA CONTINUA** en las organizaciones.
7. El impacto económico en la aplicación de la metodología se da en la reducción de costos de mantenimiento por la eliminación de fallas y pérdidas de producción al efectuar el mantenimiento preventivo y predictivo a un costo aceptable.
8. El Retorno de la Inversión de la implementación del mantenimiento adecuado se da por significativos ahorros al disminuir las pérdidas de producción, reparación de fallas, reproceso, horas extras, etc.

## BIBLIOGRAFÍA

1. **AMENDOLA, LUIS.** “Indicadores de Confiabilidad propulsores en la Gestión de Mantenimiento”. Artículo publicado, web [www.mantenimientomundial.com](http://www.mantenimientomundial.com). 2003.
2. **DATASTREAM - VII Foro de Mantenimiento e Industria.** “Sistema Integral de Mapeo de una planta productiva / Mantenimiento con medición de riesgo (AMEF) y económico”. Mendoza, Miguel. 08 de agosto del 2006. México.
3. **EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLIN E.S.P.** III Congreso Internacional Micro zonificación y su aplicación en la mitigación de desastres “Metodología para el análisis de riesgo y vulnerabilidad de sistema de agua potable y saneamiento”. 11 al 29 de noviembre del 2002. Lima – Perú.
4. **INFOR - VIII Foro de Mantenimiento e Industria Expolatiman.** “como lograr alta disponibilidad, disminuir los riesgos de accidentes de trabajo mediante la implementación de sistemas de Seguridad”. García, Carlos. 04 de octubre del 2006. Argentina.
5. **LA CULTURA DE CONFIABILIDAD.** Boletín Volumen 01 Número 08. 15 de octubre del 2002.
6. **PROGRAMA DE INGENIERÍA Y GESTIÓN DE MANTENIMIENTO UNIVERSIDAD AUSTRAL, FACULTAD DE INGENIERÍA.** Nota técnica “Sistema de Inspección Basado en Riesgo”. Nitz, Luis Mario.

7. **THE WOODHOUSE PARTNESHIP LTD.** Msc. José Bemardo Duran. Mantenimiento de Cuarta Generación, Evolución o Revolución. México.
8. **TECSUP.** Curso Virtual “Auditoria para la Gestión de Mantenimiento”
9. **TECSUP.** Curso Virtual “Gestión de Mantenimiento Basado en la Confiabilidad”
10. **TECSUP.** Curso Virtual “Herramientas de Gestión de Mantenimiento”
11. **UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS.** García, Javier. TESIS DE MASTER “Mejora en la confiabilidad operacional de las plantas de generación de energía eléctrica; Desarrollo de una Metodología de Gestión de Mantenimiento Basado en Riesgos”. Julio 2004. Madrid – España.

# ANEXOS

## Anexo N° 1

Descripción general de una operación minera convencional, Minas Arirahua S.A.

### OPERACIÓN DEL YACIMIENTO

El yacimiento es del tipo filoniano con vetas angostas con una potencia que varía desde 0.06 a 0.15 mts. y buzamiento promedio de 85°; las vetas tienen sus propias características que hacen de la explotación un reto muy importante debido a la irregular geométrica y distribución de valores.

La explotación implica no sólo hacer económica el yacimiento, sino reducir la dilución consiguiendo con ello un adecuado trabajo en perforación y voladura para conseguir el ancho de minado que tenemos como objetivo (0.40 mts.). El método de explotación utilizado es el corte y relleno ascendente semi mecanizado con relleno hidráulico.

### **METODO DE EXPLOTACIÓN: CORTE Y RELLENO ASCENDENTE SEMI MECANIZADO**

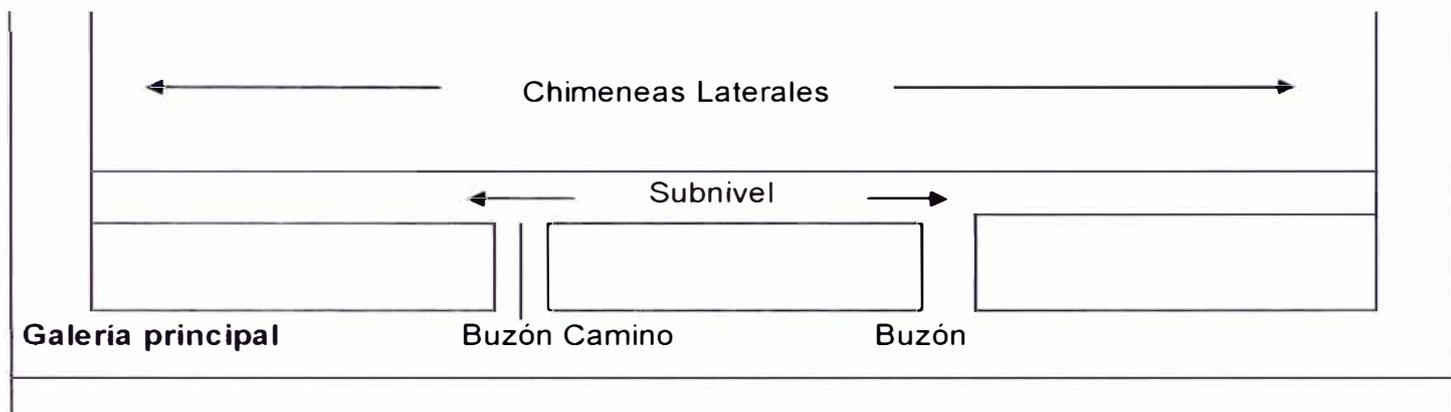
#### **Condiciones de aplicación:**

Yacimientos tipo filoniano (vetas angostas).  
Yacimientos con Buzamiento pronunciado > 65°  
Cajas medianamente competentes.  
El mineral debe ser de buenas leyes.  
Buena disponibilidad de relleno.

### **PROCESO DE MINADO**

#### **A.- Preparación de Block**

En Arirahua el block se delimita por 2 galerías separados por 50 mts. Entre sí ; en sentido vertical se desarrollan chimeneas espaciadas cada 60 mts; Complementando se preparan los buzones y caminos distanciados a 20 metros entre si y a partir de estos buzones se ejecuta el subnivel paralelo a la galería de transporte dejando un puente de 3 mts. de altura, el cual nos va a servir de piso para iniciar el primer corte de mineral.



## B.- EXPLOTACIÓN

El método de explotación utilizado en esta unidad minera es el **Corte y Relleno Ascendente Semi mecanizado**

El corte del mineral se inicia a partir del Subnivel con perforación vertical Sistemáticamente de un extremo a otro manteniendo el ciclo de minado establecido

### CICLO DE MINADO

El ciclo de minado comprende : Perforación y voladura, limpieza del mineral, descaje y relleno del tajo.

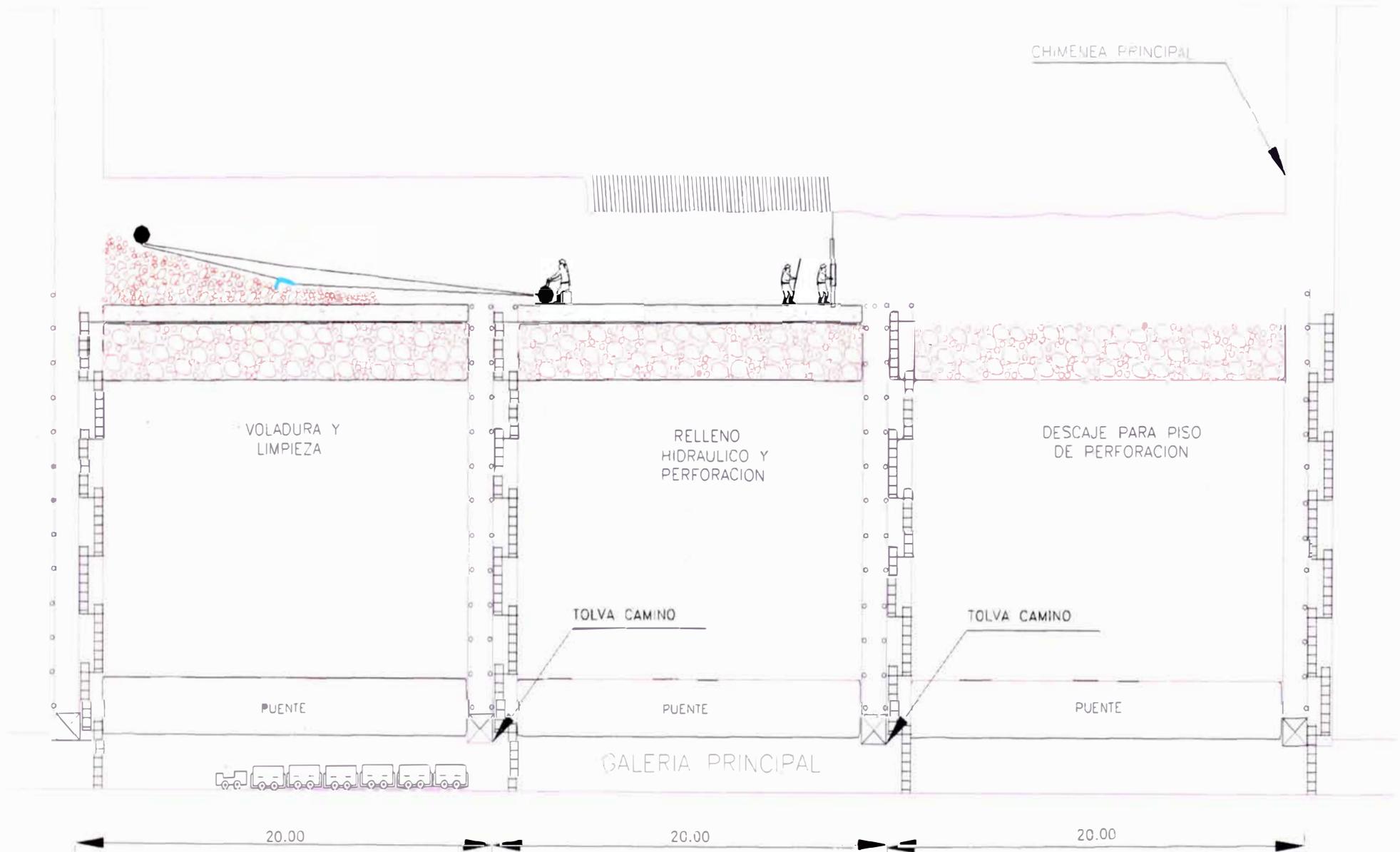
#### 1. - Perforación

Por tratarse de vetas angostas (0.06 – 0.15 mts), se emplea la perforación vertical con un grado de inclinación promedio de 83° y siguiendo el buzamiento de la veta, Es necesario Conservar el paralelismo y profundidad de los taladros para dar una mayor uniformidad al techo y a las paredes del tajo y evitar en lo posible la dilución.

Para la perforación se utiliza maquina perforadora tipo stoper; el ancho de minado determinado para este tipo de vetas es de 0.40 mts..

La malla de perforación utilizada en tajeos es de acuerdo a la calidad de la roca y de acuerdo a las pruebas, se ha determinado 3 tipos de malla tal como se ilustra.

# METODO DE EXPLOTACIÓN CORTE Y RELLENO ASCENDENTE SEMI MECANIZADO



## 2. -Voladura

La voladura en tajeos se hace de acuerdo al trazo de perforación determinado, los taladros son cargados con dinamita pulverulenta de 65 % de potencia, conectados y cebados con carmex de 7 pies.

Cada tajeo tiene su particularidad de acuerdo a la característica geomecánica, esto hace que para cada corte el calculo de carga explosiva sea distinta; para mejorar la calidad de voladura se utilizan espaciadores de carrizo de 10 y 30 cm. Y el cordón detonante para la simpatía. Los espaciadores se usan para obtener una columna de carga explosiva uniforme.

## 3.- Limpieza del mineral del tajo

La limpieza del mineral dentro de los tajos se realiza empleando winches eléctricos JOY S-21 de 7.5 Y 10.5 HP que mueven lampones de arrastre de 18" de ancho.

### 3.1- Acarreo y Transporte de Mineral

El acarreo del mineral se efectúa mediante carros mineros U-35 tipo balancín, para luego ser izados por 4 inclinados de 30° (por transferencia) por winches de 36 HP de aquí la extracción del mineral hasta las bocaminas se hace por medio de locomotoras eléctricas de 5.5t TN

## 4. Descaje de la labor y Relleno.

El descaje se realiza con el fin de poder dar la amplitud suficiente como para que el perforista opere con comodidad su máquina perforadora; el ancho mínimo de trabajo es de 0.7 mts.

Después de realizado el descaje se nivela el piso del tajo, luego se procede al relleno hidráulico hasta conseguir la altura suficiente (2.30 mt) para la perforación del siguiente corte

**4.1-El relleno hidráulico** consiste en transportar un material, bajo la forma de mezcla de sólido y agua (pulpa), a través de redes de tuberías; con el fin de rellenar los espacios vacíos en el tajo. La pulpa esta compuesta por relaves clasificados y el agua.

## Anexo N° 2 Técnicas de Mantenimiento

Hoy en día existen infinidad de diferentes herramientas, técnicas, metodologías y filosofías de mantenimiento. Algunas de las más utilizadas pueden ser:

- Mantenimiento Autónomo / Mantenimiento Productivo Total (TPM)
- Mejoramiento de la Confiabilidad Operacional (MCO)
- Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM)/(MCC)
- Mantenimiento Basado en el Riesgo (MBR)
- Mantenimiento Centrado en Confiabilidad en Reversa (MCC-R)

- Análisis Causa raíz (ACR)
- Análisis de Criticidad (AC)
- Optimización Costo Riesgo (OCR)
- Inspección Basada en Riesgo (RBI)

Actualmente uno de los mayores retos para las personas encargadas en temas de mantenimiento **no es sólo aprender todas las técnicas existentes, sino identificar cuales son las adecuadas para aplicar en su propia organización y cuales no**, tanto desde el punto de vista técnico como económico. Tomando una decisión correcta es posible mejorar el rendimiento de nuestros activos y al mismo tiempo incluso reducir los costos de mantenimiento.

Los problemas se contemplan ahora como una oportunidad de mejorar y no como un sumidero de gastos. Si existe un problema, la autentica mejora se produce cuando se elimina de forma definitiva, de manera que nunca más vuelvan a ocurrir sus efectos indeseables. La mentalidad es fomentar el descubrimiento de los problemas, pues sólo cuando hay discrepancias con lo que deseamos, existen oportunidades de mejorar.

**El enfoque que da la cuarta generación del mantenimiento se centra en la eliminación de los fallos por encima de su prevención y predicción. Esto es, una visión proactiva, más que reactiva.**

El conformismo es ahora el enemigo, pues nunca se estará lo suficientemente bien cuando existe alguna posibilidad de mejorar. Esa dinámica de mejora continua en pos de la meta utópica de la perfección absoluta es el motor que impulsa los esfuerzos de las personas por alcanzar el óptimo para la empresa.

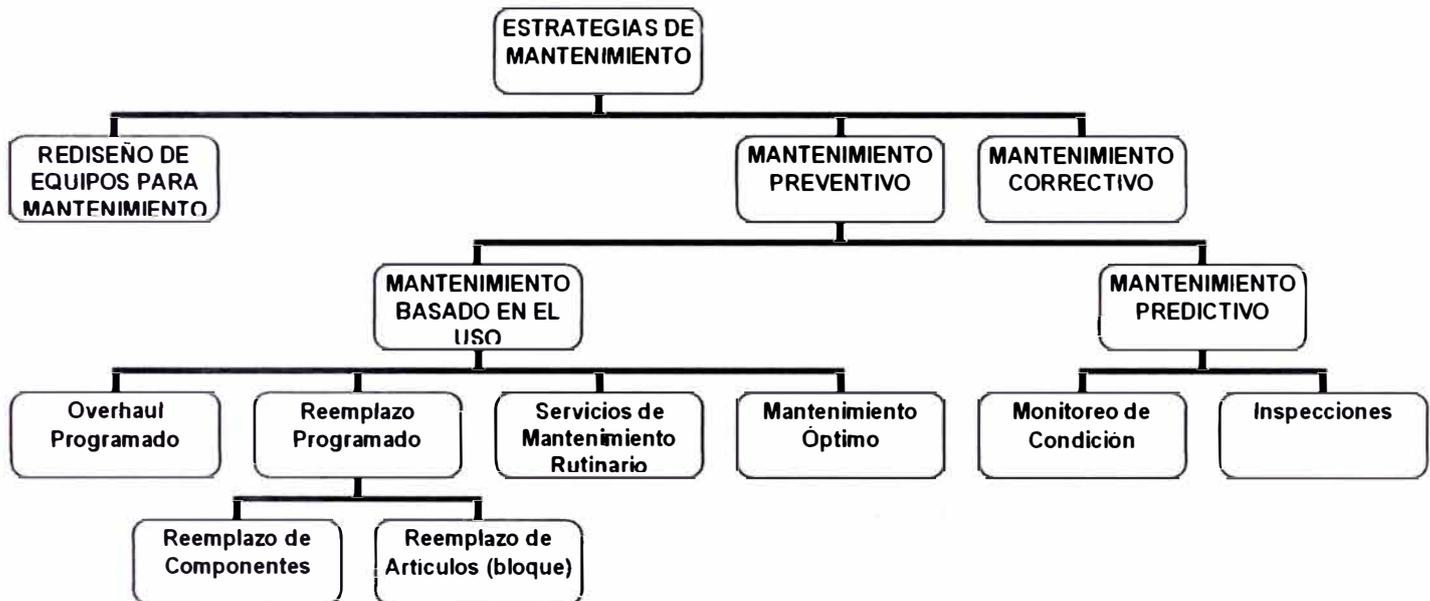
Finalmente, los costes generados por mantenimiento han continuado aumentando de manera continua en los últimos años, tanto en términos absolutos como en proporción con el gasto total. De tal forma, que actualmente, en algunas industrias se ha convertido en el segundo o incluso en el coste más importante de operación.

### **Anexo N° 3 Estrategias de Mantenimiento**

Cada vez que ocurre una falla, afecta a la organización negativamente. Los efectos negativos pueden ser desde pérdida de producción, calidad, no entregar a tiempo, hasta costos altos y amenazas a la seguridad de las personas o del ambiente. A veces el efecto de las fallas no es evidente de inmediato, (como en el caso de las fallas de dispositivos de seguridad de no falla), pero puede ser la causa de falla múltiple catastrófica después. La organización tiene que tomar una decisión conciente sobre la prevención o no de cada modo importante de falla. Si no se previene una falla el dinero tendrá que ser gastado en reparar averías en una fase posterior. Así existe por un lado un intercambio entre el costo de prevención y por otro lado el costo de la falla (y estos costos no solo incluyen costos monetarios). Dependiendo de la severidad de la falla en términos de la pérdida de producción, costo de la falla, la vida de las personas o el efecto en el ambiente la organización tiene que decidir si impide que ocurra la falla, (o hasta donde deja llegar antes de intervenir) o si la falla puede dejarse para ser manejada cuando ocurra. Los resultados finales de procesos de RCM es un diseño para la organización del mantenimiento. Esto consiste en combinar varias estrategias de mantenimiento en paquetes de trabajo lógicos a ser programados para la ejecución por las personas del mantenimiento. Al medio de esto están las estrategias seleccionadas. Mientras las estrategias son el resultado final, es mejor empezar

entendiendo lo que las varias estrategias traen consigo y cuál es su lugar en el plan total del mantenimiento.

Hay que poner las estrategias del mantenimiento en perspectiva para entenderlas mejor, una estructura de la estrategia del mantenimiento como se muestra en el diagrama siguiente:



**Figura A Estrategias de Mantenimiento**

La cima de la estructura está dividida en el rediseño de modos de falla, la prevención de ellos o la corrección de fallas. Hay tres opciones: dejar que la falla ocurra y entonces corregirla; impedir que ocurra; o rediseñar el sistema / componente para quitar el modo de falla.

#### **Rediseño por mantenimiento**

Esta no es realmente ninguna estrategia pura del mantenimiento, pero se lista como una porque se usa extensivamente por ingenieros de mantenimiento. El objetivo es rediseñar el sistema o componente particular para disminuir la necesidad de mantenimiento quitando los modos de falla no deseados.

#### **Mantenimiento preventivo (basado en el uso)**

La manera tradicional de impedir que ocurra una falla es reemplazar o reacondicionar el artículo (sub-sistema o componente) antes que ocurra la falla. El argumento intuitivo es que ese mantenimiento oportunamente planeado debe llevar a la prevención de retrasos innecesarios de la producción. Esta técnica es (mal) conocida por la mayoría de las personas como Mantenimiento Preventivo ( M.P.) – como dijimos anteriormente, es ciertamente una de la clase de Mantenimiento Preventivo, pero no el único. Pero, contrariamente a la creencia intuitiva, no es universalmente aplicable (excepto en el caso de los servicios de rutina basados en el uso) a esos casos donde el riesgo de falla (proporción de riesgo) aumenta con la edad.

#### **Mantenimiento basado en la Edad:**

Las acciones del mantenimiento se toman regularmente basadas en la edad del equipo. Los ejemplos de trabajo de mantenimiento programados basados en horas en que trabaja la maquina, manejo del tonelaje, movimiento de la producción y kilómetros viajados.

**Mantenimiento basado en el calendario:**

Las acciones del mantenimiento se toman regularmente basados en el tiempo expirado del calendario, independientemente de la intensidad de la producción. Los ejemplos son cierres anuales, bi – anuales, para realizar el trabajo estatutario.

Las tareas de mantenimiento basadas en el uso pueden ser clasificados en las siguientes clases:

**Overhaul programado:** La máquina o componente es completamente desensamblado y reacondicionado a una condición tan cercana llamada tan bueno como nuevo como sea posible.

**Reemplazo programado:** El artículo (sub-ensamble o componente) es descartado y reemplazado por una nueva unidad.

**Servicios rutinarios:** La planta / máquina recibe un servicio durante el cual se realizan las revisiones rutinarias, se cambian aceites y filtros, se realiza el engrase y ajustes.

Las categorías especiales del mantenimiento basado en el uso son:

**Reemplazo en bloque (o reemplazo del grupo):** El reemplazo en bloque esta basado en el pensamiento que los componentes similares deben tener las frecuencias similares de falla. Donde los costos de pérdida de producción más el costo de trabajo en reemplazar un componente es alto en comparación al costo del componente, podría valer la pena considerar el reemplazo en bloque. En el primero de todos los componentes similares se reemplazan como un grupo (bloque) si uno de ellos falla. Alternativamente, pueden reemplazarse todos los artículos similares en un grupo (bloque) en una base programada.

**Mantenimiento oportuno:** A veces el trabajo importante programado se identifica como trabajo que solo se llevaría a cabo si la planta está mal por algunas razones (ejemplo: quiebra). Esto es típico en casos donde el funcionamiento continuo de la planta es crítico y/o la pérdida incurrida durante el tiempo fuera del servicio de la planta es severo. Las tareas son programadas para la ejecución pero son llevadas a cabo cuando la oportunidad se da.

**Mantenimiento Predictivo (basado en la condición):** Este tipo de estrategia es aplicable a cualquier modo de falla donde sea técnica y monetariamente factible – tiene un lugar especial en los casos donde el riesgo de falla (probabilidad de riesgo) no aumente con la edad, el mantenimiento preventivo basado en el uso no puede usarse en esos casos. La condición del equipo o componente es medida a intervalos predeterminados, para determinar cuando el componente fallará. Solo entonces se programara un reemplazo / reparación. Se pueden identificar dos tipos principales del mantenimiento basado en la condición:

**Inspección:** Se hace uso de los cinco sentidos de una persona para determinar la condición del equipo o componente. Esto puede incluir el uso de instrumentos que refuerzan el uso de sentidos a través de la amplificación del punto de vista.

**Monitoreo de la condición:** Algún parámetro se supervisa para descubrir señales de falla inminente. Los ejemplos son:

Vibración.

Impulso de choque.

Condición del aceite.  
Emisiones acústicas.  
Actuación del equipo.  
Termografía.

#### **Mantenimiento correctivo (de falla)**

Esta es una estrategia de “no hacer nada” o “esperar a la falla”. Esto comprende el no intentar determinar cuándo el componente fallará (monitoreo de la condición o inspección) o no hacer nada para impedir que ocurra la falla (basada en el uso). Esto se usa cuando ninguna otra estrategia puede aplicarse con resultados finales buenos. El mantenimiento correctivo puede ser clasificado más allá en las siguientes tres clases:

**Reemplazo:** esta será la estrategia si la decisión es para un reemplazo total de los componentes o unidades que fallan.

**Reparación:** Esta será la estrategia si la decisión es para reparar el componente o unidades que fallan.

**Retardar la decisión:** Esta será la estrategia si la decisión es para reemplazar el componente o las unidades que fallan totalmente o para repararlo, basándose en una inspección en el sitio siguiendo la falla.

#### **Mantenimiento pro-activo**

El mantenimiento pro-activo es una filosofía que mide por palcos toda la estructura de la estrategia del mantenimiento como se muestra anteriormente. En lugar de usar la información ganada de supervisar (o de otros medios) para predecir cuando ocurrirá una falla, la misma información se usa para erradicar la falla completamente. La acción pro-activa se toma para quitar completamente la raíz de la causa de la falla. Para implementar tal método, la instrumentación correcta debe estar disponible para facilitar el tomar las medidas necesarias. El diseño juega un papel importante en mantenimiento

#### **Anexo N° 4 Análisis histórico de accidentes**

Su objetivo primordial es detectar los peligros presentes en una instalación por comparación con otras similares que hayan tenido accidentes registrados en el pasado. Analizando esos antecedentes es posible conocer las fuentes de peligro, estimar el alcance posible de los daños e incluso, si la información es suficiente, estimar la frecuencia de ocurrencia.

Para llevar a cabo estos trabajos se dispone de bancos de datos informatizados, recopilaciones bibliográficas de accidentes o incluso de la propia experiencia siniestral de la empresa.

Es una metodología simple y económica, ya que no compromete muchos recursos materiales o humanos. Su gran ventaja es que detecta peligros absolutamente reales, que ya en el pasado se han puesto de manifiesto.

Sin embargo, las informaciones recogidas son limitadas dado que sólo se registran los accidentes que acaban en eventos de relativa importancia y se obvian incidentes, potencialmente más peligrosos que los anteriores, pero que por circunstancias fortuitas favorables no desencadenan un gran accidente. Asimismo, las informaciones recogidas no son completas y están afectadas de imprecisiones importantes, lagunas y datos confidenciales desconocidos.

### **Análisis preliminar de peligros**

Este método es similar al análisis histórico de accidentes, aunque no se basa en el estudio de siniestros previos sino en la búsqueda bibliográfica de peligros que puedan hallarse presentes en una nueva instalación a partir de la lista de productos químicos presentes. De forma no estricta se le suele denominar también "Análisis preliminar de riesgos". El procedimiento consiste en obtener información completa sobre materiales, sustancias, reactivos y operaciones previstas, comparar estos procesos con otros de los que se tenga experiencia anterior, adaptar esas semejanzas al caso actual y analizar las operaciones y equipos previstos desde el punto de vista de los peligros presentes en cada uno (toxicidad, corrosividad, carga energética, etc.).

Los puntos críticos que se hayan detectado en el paso anterior deben ser objeto de un estudio técnico algo más detallado. Por último, como resulta lógico, deberán proponerse las medidas a adoptar para disminuir o eliminar los peligros detectados.

Es un procedimiento de análisis simple y económico, aunque no sistemático; es estrictamente cualitativo y depende en exceso de los conocimientos previos de los ejecutantes. Resulta idóneo para instalaciones en fase de anteproyecto o ingeniería básica, cuando aun no se han desarrollado planos detallados de la instalación.

### **Análisis "¿Qué pasa sí?"**

El objetivo fundamental de este método es la detección y análisis de las desviaciones sobre los procesos y condiciones previstos, intentando evitar aquellos eventos que puedan resultar no deseables. Básicamente consiste en responder cualitativamente a una batería de preguntas del tipo "¿Qué pasa si...?", en relación con la calidad o la concentración de las materias primas, o en relación con las variables de proceso o los servicios necesarios.

Para llevar a cabo este análisis de forma estructurada se recomienda seguir la línea de proceso, desde la recepción de materiales hasta la entrega del producto terminado. En una primera fase se pide a los participantes que planteen cualquier pregunta del tipo "¿Qué pasa si...?" en relación con cada unidad o etapa del proceso. Una vez recopiladas

todas estas cuestiones, se intentará dar respuesta a cada una de ellas, con la participación de especialistas si fuera necesario.

Una vez identificados los peligros y sus posibles consecuencias, deben proponerse las medidas disponibles para minimizarlos, tales como alternativas en el proceso o modificaciones de la línea de producción.

Resulta un sistema muy creativo y de simple aplicación (y por lo tanto, económico). Sin embargo, aún realizándose de modo estructurado puede pasar por alto algunos peligros menos evidentes pero no por ello menos graves.

### **Análisis mediante listas de comprobación**

Consiste en contrastar la realidad de la planta con una lista muy detallada de cuestiones relativas a los más diversos ámbitos, tales como condiciones de proceso, seguridad o estado de las instalaciones o servicios.

En primer lugar es necesario disponer de listas de comprobación o "check list" generales o específicamente desarrolladas para esa planta en concreto. Cabe también generar estas listas con un planteamiento global o bien por ámbitos (instrumentación, equipos, materias peligrosas, condiciones de trabajo, etc.).

A la hora de aplicar el análisis, basta con seguir la lista de referencia y responder a todas y cada una de las cuestiones planteadas, obteniendo así un perfil sobre el cumplimiento de los criterios de seguridad de la planta analizada.

Es un procedimiento fácil y controlado. Está especialmente adaptado para garantizar el cumplimiento de normas o reglamentos técnicos y permite la reproducibilidad del análisis de forma periódica, permitiendo estudiar las desviaciones que se producen en el tiempo. No obstante, dependiendo de la calidad de la lista de comprobación o del grado con que se adapte a la planta analizada puede pasar por alto peligros evidentes no contemplados en las listas o incidir excesivamente en puntos que sin lugar a dudas no plantean peligros importantes. En este sentido, no es un método creativo.

### **Análisis de los modos de fallos y sus efectos**

Denominado también "Failure Mode and Effect Analysis" o FMEA es una técnica muy utilizada en los sistemas de calidad para identificar causas de fallos.

El FMEA persigue establecer los posibles fallos de todos y cada uno de los elementos de la planta, analizando las consecuencias y considerando aquellas que puedan desencadenar un accidente, sugiriendo las medidas a adoptar para controlar tales situaciones de peligro.

Se inicia el estudio identificando todos los equipos de la planta y estableciendo sus condiciones normales de proceso. A continuación, para cada equipo, se detallan todos y cada uno de los fallos posibles y se analizan sus posibles consecuencias. Si se da la circunstancia de que una situación de fallo en un equipo produce una alteración en otro, debe trasladarse esta influencia al estudio del equipo afectado.

Una vez conocidas las consecuencias, se deben proponer las acciones de mejora necesarias para eliminar o reducir el peligro.

En general para cada elemento se cumplimenta una tabla con las siguientes columnas: elemento, descripción del equipo, modo de fallo, forma de detección del fallo, efectos del fallo y medidas correctoras. Requiere poca información y es relativamente económico. Es un análisis cualitativo (aunque admite cierto tratamiento semicuantitativo). Su principal inconveniente es que no contempla la posibilidad de fallos combinados o en secuencia.

### **Análisis de peligros y operabilidad**

Denominado también "Hazard and Operability Análisis" o HAZOP es una técnica de seguridad orientada a identificar circunstancias de peligro y de accidente, siendo la operación (la garantía de funcionamiento) un aspecto secundario.

Esencialmente es un método muy similar al FMEA descrito en el apartado anterior. El HAZOP, sin embargo, es un método absolutamente sistemático, porque se controlan todas y cada una de las variables de proceso, en todos y cada uno de los equipos de la planta. Su aplicación es fundamental en la identificación de todos los parámetros del proceso (presión, temperatura, nivel, caudal, etc.) y sus condiciones de trabajo habituales, analizando de manera sistemática las desviaciones posibles.

Se inicia el estudio identificando los equipos y líneas principales de la planta. Para cada equipo o línea se relacionan todos los parámetros que afectan al sistema y se concretan sus condiciones habituales de proceso.

A continuación y ayudados por unas palabras-guía tales como NO, MÁS, MENOS, CONTRARIO, ADEMÁS, PARTE, DIFERENTE, se intenta incentivar la creatividad de los participantes en el estudio para que identifiquen cuáles serían las consecuencias de

que la variable estudiada se desviara de la condición de proceso en la forma indicada por la palabra guía (más temperatura, menos pH, flujo inverso en bomba, etc.).

Para cada situación peligrosa identificada se propondrán las medidas correctoras oportunas en el sentido de evitar las desviaciones detectadas. Este método requiere documentación completa y un conocimiento exhaustivo de la planta, de los productos utilizados y de las condiciones de proceso. Está especialmente adaptado a plantas relativamente complejas en las que otros métodos serían totalmente anárquicos. En particular, está mejor preparado para ser usado en plantas de trabajo en continuo, aunque se han desarrollado variantes para procesos por lotes. Su aplicación es económicamente costosa, dada la necesidad de involucrar en el estudio a un cierto número de profesionales cualificados que deberán dedicarle un tiempo considerable.

Existen en el mercado numerosos paquetes informáticos que apoyan la realización del análisis.

### **Análisis mediante árboles de fallos**

El Análisis mediante árboles de fallos (FTA o "Fault Tree Analysis") es una técnica cuantitativa que permite estimar la probabilidad de ocurrencia de un fallo determinado (suceso capital o "top event") a partir del conocimiento de la frecuencia de ocurrencia de los sucesos iniciadores o causales, mediante la utilización de procesos lógicos inductivos y la confección de una secuencia lógica de sucesos, denominada árbol de fallos. Se inicia su aplicación con la identificación de los sucesos capitales tales como "explosión de un reactor", "fallo del compresor", etc.

Se establecen a continuación los sucesos iniciadores que son capaces, de por sí o en combinación con otros, de desencadenar el suceso capital y se estructura el árbol de fallos mediante puertas lógicas. Se asigna a cada suceso básico la probabilidad de ocurrencia, conocida por propia experiencia o por consulta a bancos de datos sobre la materia, y por último se calcula la probabilidad de los sucesos compuestos mediante la aplicación del álgebra de Boole hasta alcanzar el suceso capital. Asimismo, y dado que las probabilidades asignadas a cada suceso tienen un margen de incertidumbre a veces conocido, es posible estimar también la sensibilidad o grado de certidumbre del resultado final.

La utilización de este método de análisis de riesgos permite un conocimiento exhaustivo de las relaciones causa-efecto existentes entre los diversos fallos posibles del sistema y genera unas recomendaciones de mejora muy concretas (e incluso cuantificadas en cuanto a su eficacia).

Sin embargo, requiere mucho tiempo y personal especializado, con un conocimiento completo de la planta en sus distintas etapas de proceso (parada, puesta en marcha, operación, emergencia, etc.).

Se recomienda su utilización en instalaciones complejas en las que concurren muchos aparatos, instrumentos, equipo de control y alarma y sistemas de seguridad. Incluso es aplicable para valorar la incidencia del fallo humano en la probabilidad del suceso capital.

Existen numerosos programas de ordenador como asistentes para el desarrollo de este tipo de análisis, con lo que se evitan algunos errores y se facilita la corrección o modificación (mantenimiento o actualización) de los árboles.

### **Análisis mediante árboles de sucesos**

Mediante el ETA (Event Tree Análisis) se pretende estructurar la secuencia de eventos básicos que desencadena un tipo de accidente concreto, estableciendo también las

probabilidades de ocurrencia, si el conocimiento de los sucesos básicos lo permite. Desde un punto de vista abstracto, es similar al análisis de árboles de fallos.

Sin embargo, los sucesos básicos en este caso no son fallos de los sistemas (“falla el T-302”) sino alternativas de las diferentes situaciones que pueden darse (“ignición inmediata-ignición retardada). Para su aplicación se identifican los sucesos básicos o iniciadores y se aplican todas las disyuntivas lógicas que sean procedentes hasta obtener una representación gráfica en forma de árbol horizontal, en la que quedan representadas todas las posibles evoluciones del sistema según se den o no las diferentes alternativas planteadas, hasta los sucesos accidentales finales (nube de gas, deflagración, dispersión, etc.). Por su especificidad y grado de desarrollo, son aplicables a las mismas instalaciones y bajo las mismas condiciones que los árboles de fallos.

### **Análisis de causas y consecuencias**

Permite un análisis cuantitativo de los eventos de fallo en sistemas complejos, partiendo de sucesos capitales y factores condicionantes, con lo que al final se obtiene un árbol de causas/consecuencias. Es una combinación de árboles de fallos y árboles de sucesos por lo que también se utilizan símbolos lógicos y asignación de probabilidades a cada uno.

Se elige un suceso principal como origen de la evaluación, se identifican los sucesos condicionantes y se establece la secuencia lógica de acontecimientos incluyendo las disyuntivas existentes. En este árbol se mezclan eventos “fallos” con eventos “sucesos”.

Su aplicación requiere conocer muy bien la instalación y tener experiencia en el desarrollo de este tipo de análisis. Es laborioso y se necesita soporte informático para llevarlo a cabo. Los resultados obtenidos son muy detallados y permiten, como en el caso de los árboles de fallos y de sucesos, cuantificar la utilidad de las medidas correctoras propuestas.

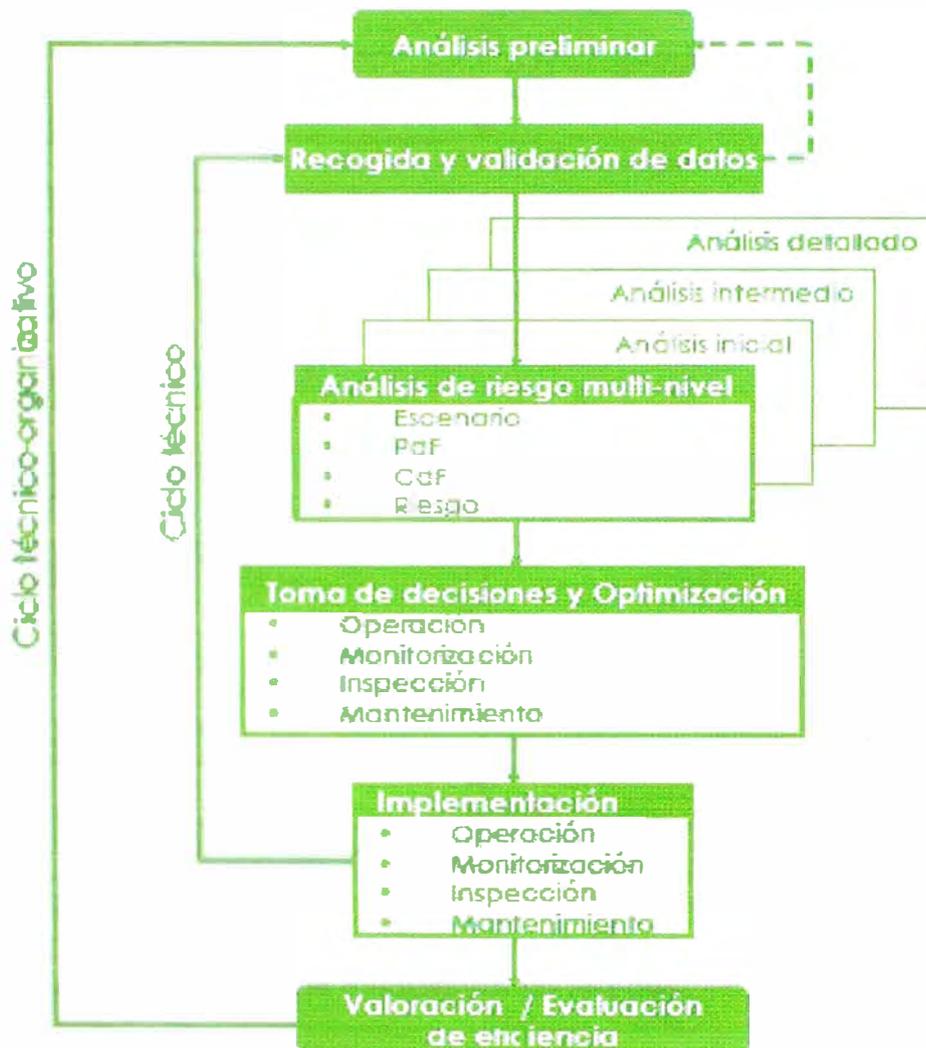
### **Índices de riesgo**

Son procedimientos de aplicación relativamente simple a instalaciones complejas, en las que se evalúan una serie más o menos detallada de parámetros y se cuantifican unos valores que permiten una evaluación del nivel de riesgo de la instalación analizada. Existe un buen número de ellos, cada uno con sus especificidades.

Son métodos de aplicación simple y económica ya que con el cumplimiento razonado de una lista de comprobación, se obtienen de forma más o menos inmediata unos valores orientativos del riesgo intrínseco de la actividad e incluso pueden determinarse los factores que más contribuyen a incrementar este riesgo. Sin embargo, su grado de descripción de la instalación es limitado, por lo que los resultados obtenidos son genéricos y pueden pasar por alto multitud de factores, agravantes o no.

### **Anexo N° 5 El mantenimiento basado en el riesgo**

La Figura 1 muestra los principales pasos que se deben realizar para realizar una guía para la implantación de una metodología de mantenimiento e inspección basada en riesgo en una planta o en una compañía.



**Figura 1- Esquema para una metodología de mantenimiento basado en el riesgo**

Un prerequisite para implementar este esquema es obtener una jerarquía de la planta bien adaptada que facilite la identificación de funciones, mecanismos de degradación y fallos.

La Figura 2 muestra un esquema posible para llevar a cabo un análisis de riesgos:

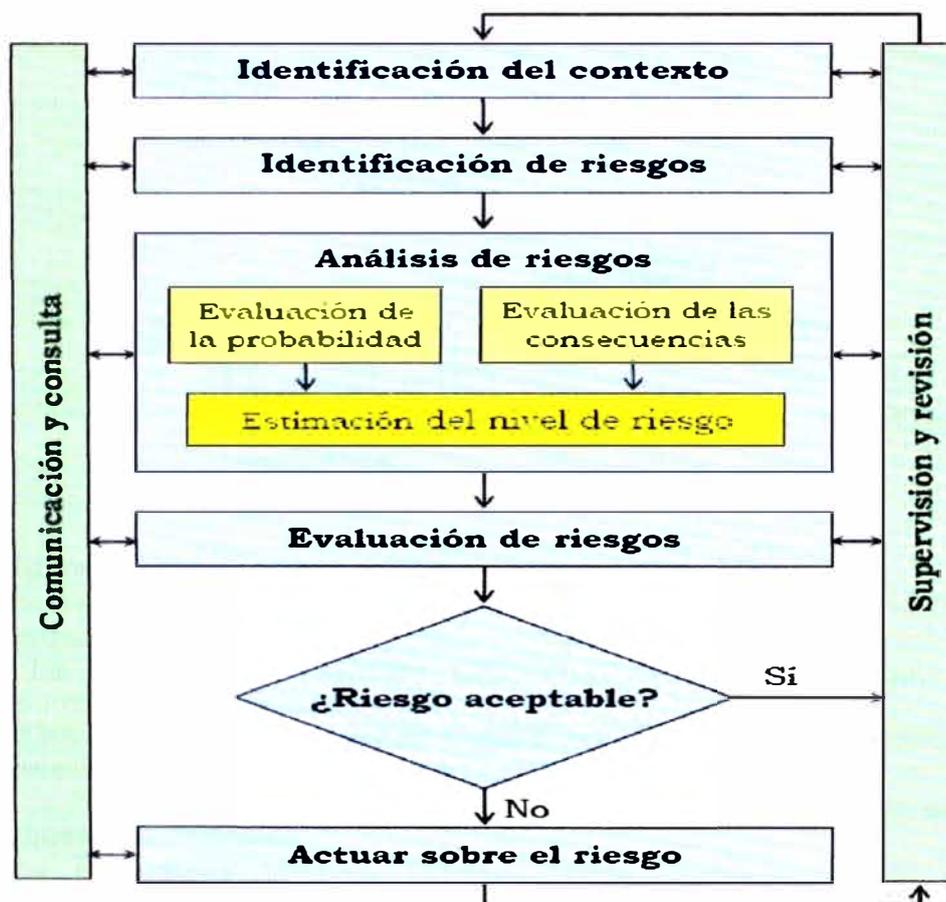


Figura 2- Esquema de evaluación de riesgos

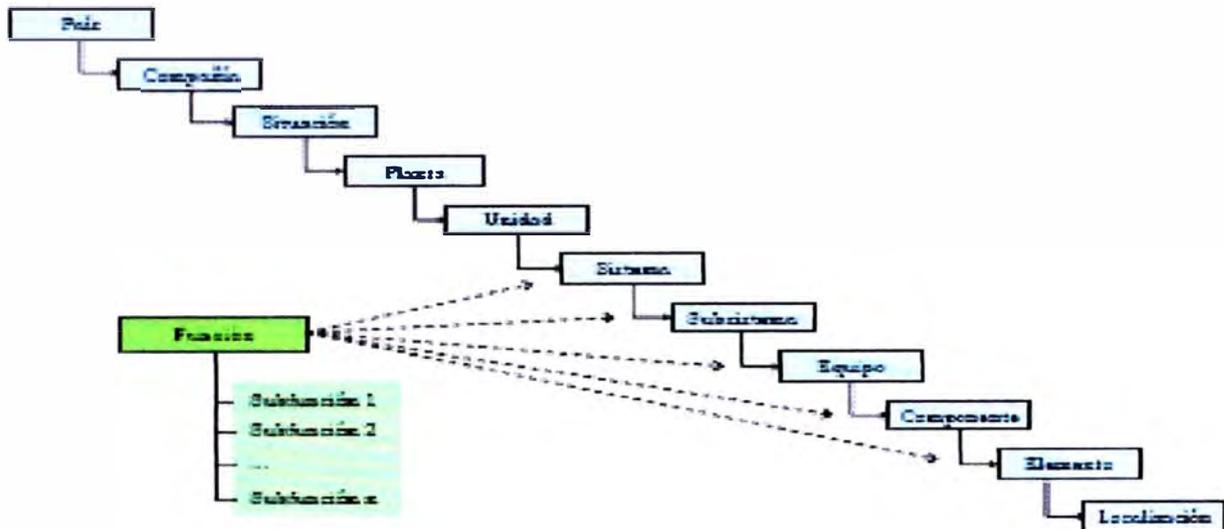
### Jerarquía de la planta

Este es un prerequisite para una valoración eficiente del riesgo y para la planificación del mantenimiento y la inspección, ya que la planta se encuentra dividida en secciones controlables. Asignar funciones y subfunciones a los elementos físicos de la planta simplifica la identificación de los modos de fallo. Una vez identificados, los modos de fallo se utilizan posteriormente para encontrar las causas de fallo, las causas raíz y los mecanismos de daño.

### **Desglose funcional**

El primer paso es definir una jerarquía técnica para los equipos de la planta. La jerarquía técnica es un desglose jerárquico de la planta. La Figura 3 presenta un ejemplo de una jerarquía técnica.

El siguiente paso será definir las funciones de cada uno de los elementos dentro de la jerarquía establecida.



**Figura 3- Desglose jerárquico de activos**

Varios estándares industriales proporcionan guías sobre como desarrollar la jerarquía técnica de la planta:

- La ISO 14224 (Estándar OREDA) Proporciona una guía para las industrias petrolíferas y las de gas natural.
- KKS Kraftwerk Kennzeichen System, es un sistema de identificación para plantas de generación de energía eléctrica (Alemanas y danesas)
- La ISO 3511 es un estándar para la medida y el control de equipos usados en los procesos industriales.

Los estándares también definen límites funcionales para algunos sistemas y componentes como sistemas de seguridad, bombas, compresores, turbinas, etc. La definición de límites funcionales para equipos auxiliares es más complicada ya que no existe una práctica aceptada para estos.

Esto varía según el sector industrial, el ambiente, el contexto operativo, etc.

Es posible definir la función en cada nivel en la jerarquía técnica. Para el caso del análisis RBM (Risk-Based Maintenance o Mantenimiento Basado en el Riesgo) los niveles más utilizados son Sistema, Subsistema, Equipo, Componente o Elemento, tal y como se muestra en la Figura 12.

El objetivo operacional de la función también debería ser definido (redundancia, ambiente, material utilizado, etc.). Cada función se describe con un verbo, un complemento, una operación estándar y un nivel de funcionamiento definido por el operador de la función.

La elección de la jerarquía técnica y de las funciones es importante para conseguir un análisis satisfactorio del RBM. Si el grado de detalle es bajo (pocas funciones), entonces el número de modos de fallo por función será elevado y el programa de mantenimiento será difícil de manejar. Por el contrario, si el nivel de detalle es elevado (muchas funciones diferentes), entonces el esfuerzo necesario para desarrollar el análisis RBM será grande y el resultado del plan de inspección y mantenimiento será muy detallado.

### Subfunciones

Si un elemento o componente tiene más de una función, se le podrían asignar subfunciones. Las subfunciones pueden cubrir aspectos como:

- Integridad medioambiental
- Integridad estructural/seguridad
- Control/contenido/confort
- Protección
- Apariencia
- Economía/eficiencia

La Tabla 1 proporciona algunos ejemplos de funciones y subfunciones:

	<b>Función 1</b>	<b>Función 2</b>	<b>Función 3</b>
<b>Función</b>	Bompear	Transmitir	Almacenamiento
<b>Elemento</b>	Bomba	Eje de transmisión	Tanque a presión
<b>Funcionamiento estándar</b>	Bompear el medio desde la entrada hasta la salida	Transmitir potencia desde un punto A a un punto B	Almacenar el medio a una presión de X Bar
<b>Nivel de funcionamiento</b>	Mantiene a la salida una presión de X Bar	Proporciona un par en el punto B de X Nm/s	Mantiene el medio a una presión de X+ΔX Bar
<b>Sub funciones</b>	Almacenamiento	Almacenar el medio dentro de la bomba (aspectos económicos, de seguridad, salud y medioambiente)	

**Tabla 1- Desglose funcional de una bomba, un eje de transmisión y un tanque a presión**

### Modos de fallo

Una vez que se ha establecido la jerarquía técnica y que las funciones de cada sistema, subsistema y componente han sido definidas, se deben identificar los modos de fallo.

Un modo de fallo es cualquier estado donde una función definida no puede desarrollar su rendimiento estándar esperado. Una misma función podría tener uno o varios modos de fallo. Si la jerarquía técnica y las funciones han sido bien elegidas resultará sencillo listar los modos de fallo.

La Tabla 2 ilustra la relación entre la jerarquía técnica, la función y los modos de fallo.

Para fallos que presentan un alto riesgo puede resultar eficiente a nivel de costes, desarrollar un análisis de los mecanismos de fallo. El modo de fallo más común considerado en el RBM, son las fugas externas. En este caso el análisis se hace basándose en los mecanismos de daño y en la causa raíz, los cuales son herramientas muy útiles para descubrir el lugar de la fuga.

	Bomba	Transmisión	Tanque a presión
Modos de fallo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fallo al avanzar</li> <li>• Fallo mientras está funcionando</li> <li>• Fuga externa</li> <li>• Vibración</li> <li>• Baja presión de salida</li> <li>• Fuga interna</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fallo de transmisión de potencia</li> <li>• Vibración</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pérdida de contenido</li> </ul>

**Tabla 2- Modos de fallo de una bomba, un eje de transmisión y un tanque a presión**

### Causas de fallo

Una causa de fallo es una razón potencial de un modo de fallo. En el análisis, para cada modo de fallo se deben listar todas las posibles causas de fallo.

La Tabla 3 muestra como la causa del fallo se relaciona con los modos de fallo, las funciones y con la jerarquía técnica. La lista de causas de fallo puede estar asociada a modos de fallo incluidos en el programa de mantenimiento actual, a modos de fallo que se han observado en las instalaciones en el pasado o a modos de fallo que no han sido nunca observados en la planta.

Se debe tener en cuenta que los fallos más importantes son a menudo aquellos para los que no está preparada una organización. La metodología RBM busca prever estos fallos.

La lista de causas de fallo deberá incluir todas las causas probables para identificar los modos de fallo, incluyendo aspectos como desgaste o deterioro, impacto de los factores humanos, diseño, etc. Los factores humanos son muy importantes ya que la falta de preparación o incluso el desconocimiento son una fuente muy importante de fallos.

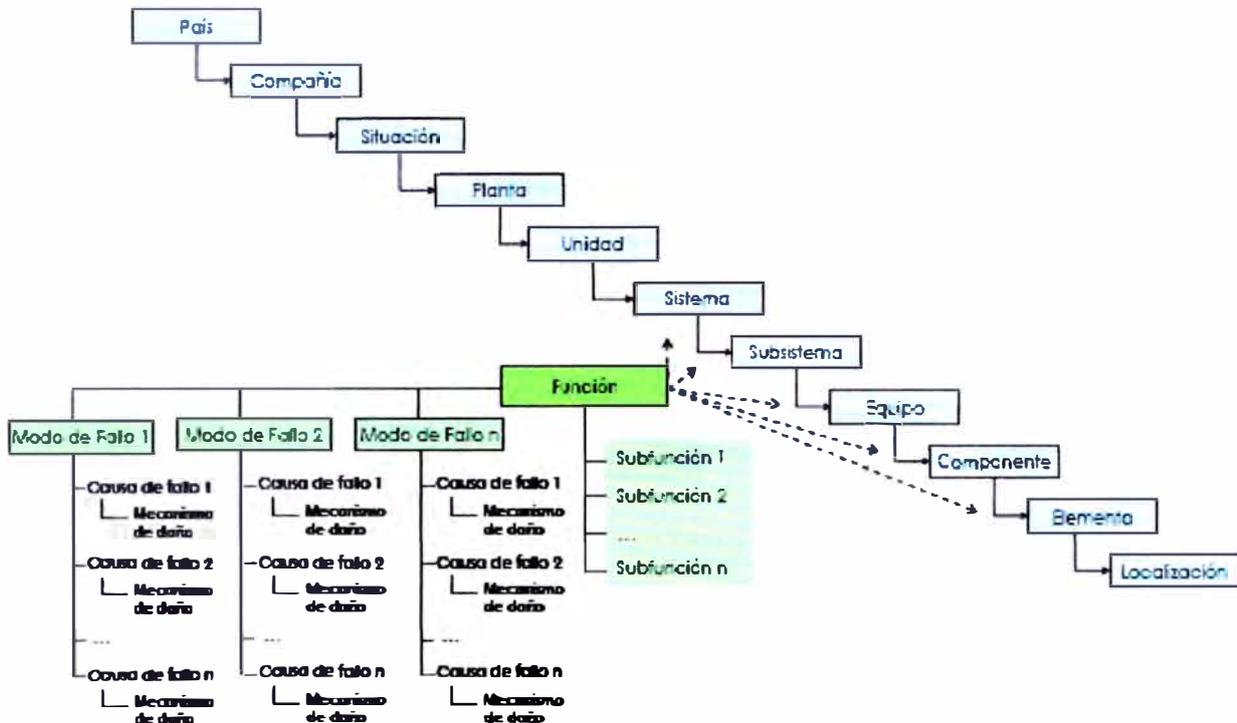
Bomba		Eje de transmisión		Tanque a presión	
Modos de Fallo	Causa del fallo	Modos de Fallo	Causa del fallo	Modos de Fallo	Causa del fallo
Fallo al arrancar	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Instalación defectuosa</li> <li>• Fallo de alimentación</li> </ul>	Fallo de transmisión de potencia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rotura del eje</li> <li>• Rotura de cojinetes</li> <li>• Rotura del acoplamiento</li> </ul>	Pérdida de contenido	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cracking corrosivo</li> <li>• Pérdida volumétrica de material</li> <li>• Adelgazamiento</li> <li>• Debilitamiento de material/ fragilización</li> </ul>
Fallo mientras está funcionando	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bloqueado por suciedad</li> <li>• Cuerpo extraño en el impelente</li> <li>• Rotura del impulsor o de una parte de él</li> </ul>	Vibración	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desequilibrio</li> <li>• Fallo en los cojinetes</li> <li>• Fallo en el acoplamiento</li> </ul>		
Fuga externa	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fuga en una brida</li> <li>• Fuga en el "stuffing box" o caja de empaquetadura</li> <li>• Ensamblaje o empaquetado incorrecto del "stuffing box" o caja de empaquetadura</li> <li>• Fuga en el sellado mecánico</li> <li>• Sellado presurizado</li> </ul>				
Vibración	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desequilibrio</li> <li>• Fallo en los cojinetes</li> </ul>				
Baja presión de salida	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cuerpo extraño en el impelente</li> <li>• Rotura del impulsor o de una parte de él</li> </ul>				
Fuga interna	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desgaste de anillos</li> </ul>				

**Tabla 3- Causas de fallo de una bomba, un eje de transmisión y un tanque a presión**

### Mecanismos de daño

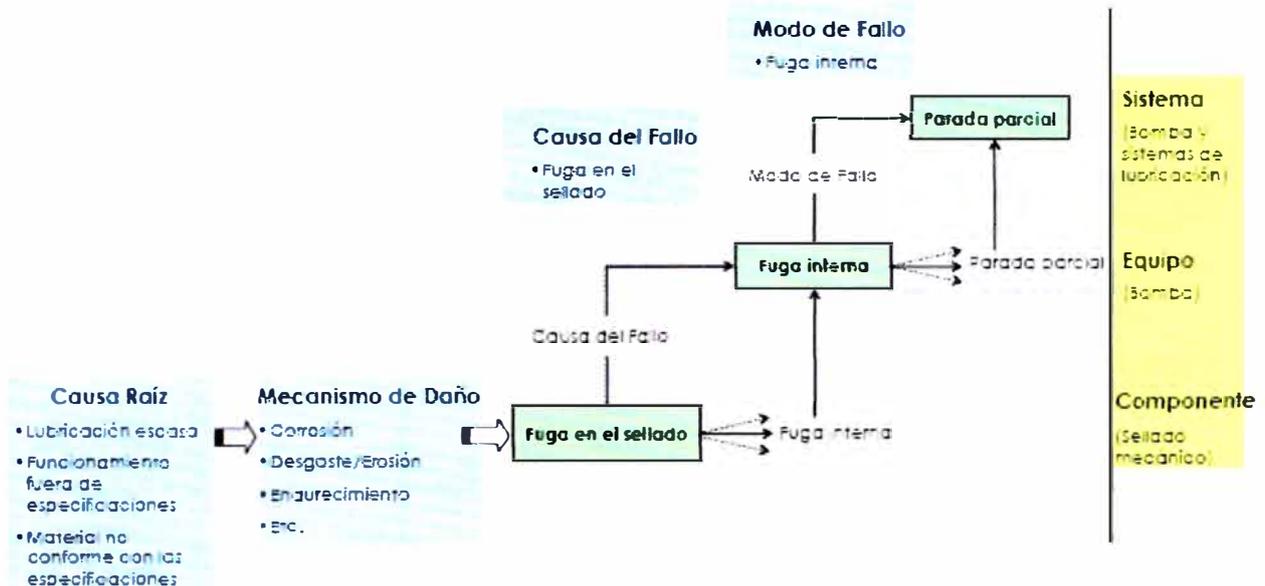
Un mecanismo de daño es una razón subyacente asociada a una causa de fallo. Si los mecanismos de daño asociados a una causa de fallo son conocidos, entonces esto simplifica la identificación de actividades efectivas para prevenir las causa de fallo y por tanto también para prevenir que ocurra el fallo.

La Figura 4 muestra la relación entre la jerarquía técnica y los mecanismos de daño.



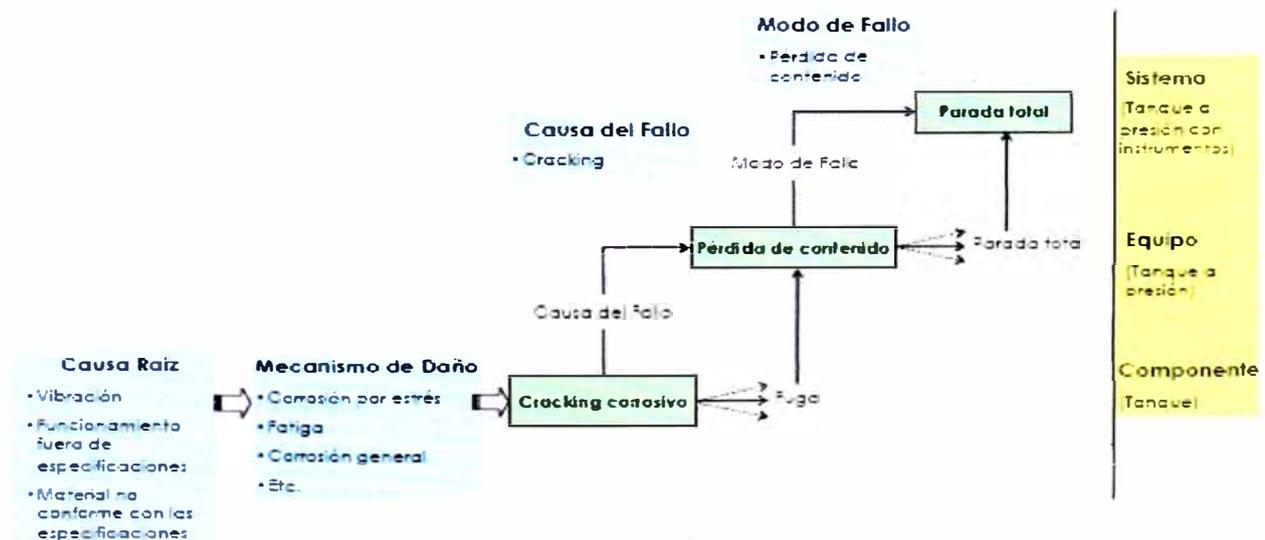
**Figura 4- Causas, Modos de fallo y Mecanismos de daño en el desglose jerárquico de activos**

La figura 5 y la figura 6 muestran ejemplos de la relación entre los modos de fallo, las causas de fallo y los mecanismos de daño para una bomba y un tanque de presión. En las figuras se ha introducido el término causa-raíz. La causa raíz es la razón subyacente para activar los mecanismos de daño, a menudo inducido por una operación defectuosa u otras circunstancias externas.



**Figura 5- Relación entre Modos de fallo, Causas del fallo y Causa raíz para una bomba**

La figura 6 proporciona un ejemplo de la relación entre los modos de fallo, las causas de fallo y los mecanismos de daño para un tanque de presión, de la misma forma que para la bomba en la figura anterior.



**Figura 6- Relación entre Modos de fallo, Causas del fallo y Causa raíz para un tanque a presión**

Bomba		Eje de transmisión		Tanque a presión	
Modo de Fallo "Fallo externo"	Mecanismo de daño	Modo de Fallo "Vibración"	Mecanismo de daño	Modo de Fallo "Cracking"	Mecanismo de daño
Fuga en una brida	• Deterioro del material	Desequilibrio	• Eje doblado • Fallo de cojinetes • Fallo del acoplamiento	Corrosión por estrés	• Corrosión por estrés • Fatiga • Corrosión general
Fuga en el "stuffing box" o caja de empaquetadura		Fallo en los cojinetes	• Lubricación desacetada • Retorcimiento del cojinete por carga inapropiada sobre él		
Ensamblaje o empaquetado incorrecto del "stuffing box" o caja de empaquetadura	• Factor Humano	Fallo en el acoplamiento	• Deterioro del material • Rotura de pernos		
Fuga en el sellado mecánico	• Deterioro del material				
Sellado presurizado	• Deterioro del material • Presión errónea en los cojinetes				

**Tabla 4- Mecanismos de daño de una bomba, un eje de transmisión y un tanque a presión**