



DISEÑO DE UN LIBRO PRÁCTICO DE APOYO ACADÉMICO Y
EMPRESARIAL PARA EL PROCESO DE CONFIABILIDAD
INDUSTRIAL

Jiménez Mariotis, Kelyneth Johana
Rodríguez Vásquez, Vanesa del C

Cardozo, Gonzalo
Director

Universidad Tecnológica de Bolívar
Ingeniería Industrial
Cartagena de Indias
2004

INDICE

| | Pág. |
|---|-----------|
| CAPITULO 1: GENERALIDADES DE LA FIABILIDAD | |
| Objetivos | 18 |
| Objetivo general | 18 |
| Objetivo específico | 18 |
| Introducción | 19 |
| 1. Historia y evolución de la fiabilidad: Reseña Cronológica | 21 |
| 1.1 Desde año 1935 hasta 1946 | 23 |
| 1.2 Desde año 1950 hasta 1960 | 26 |
| 1.3 La situación actual | 30 |
| 2. Desarrollo conceptual | 32 |
| 2.1 Confiabilidad | 32 |
| 2.2 La curva de la bañera | 37 |
| 2.3 Modos de fallas | 41 |
| 3. Impacto económico de la no fiabilidad | 43 |
| 3.1 Beneficios de la fiabilidad | 46 |
| 4. Estándares de la fiabilidad | 51 |
| 5. Resumen | 54 |
| CAPITULO 2: TÉCNICAS ESTADÍSTICAS | |

| | |
|--|-----------|
| Objetivos | 55 |
| Objetivo general | 55 |
| Objetivos específicos | 55 |
| Introducción | 56 |
| 1. Generalidades estadísticas | 57 |
| 1.1 Análisis Estadístico | 57 |
| 1.2 Cálculo de probabilidades | 58 |
| 1.3 Control de confiabilidad | 58 |
| 1.4 Evaluación de resultados | 60 |
| 1.5 Predicción de resultados | 61 |
| 2. Técnicas estadísticas | 63 |
| 2.1 Distribución Binomial | 63 |
| 2.1.1 Experimento de Bernoulli | 63 |
| 2.1.2 Características de la distribución | 64 |
| 2.2 Distribución Poisson | 66 |
| 2.2.1 Características de la distribución | 66 |
| 2.2.2 Función de probabilidad de Poisson | 68 |
| 2.2.3 La media y la varianza | 70 |
| 2.3 Distribución normal | 72 |
| 2.3.1 Características de la distribución | 73 |
| 2.3.2 Función de densidad de la distribución normal | 74 |
| 2.3.3 La media y la varianza normal | 75 |

| | | |
|---|--|-----|
| 2.3.4 | Propiedades de la curva normal | 76 |
| 2.4 | Distribución Weibull | 82 |
| 2.4.1 | Función de densidad de probabilidad de Weibull | 84 |
| 2.4.2 | Propiedades estadísticas de la distribución de Weibull | 85 |
| 2.4.3 | Características de la distribución Weibull | 89 |
| 2.4.4 | Valoración del parámetro Weibull | 101 |
| 3. | Ejercicios para resolver | 115 |
| 4. | Resumen | 121 |
| | | |
| CAPITULO 3: CONFIABILIDAD HUMANA | | |
| | Objetivos | 123 |
| | Objetivo General | 123 |
| | Objetivos Específicos | 123 |
| | Introducción | 124 |
| 1. | Contexto de la Confiabilidad Humana | 125 |
| 2. | Definición de la Confiabilidad Humana | 126 |
| 2.1 | Por qué es importante mejorar el Desempeño Humano | 126 |
| 3. | Definición del Error Humano | 127 |
| 3.1 | Tipos de Error | 127 |
| 3.1.1 | Error Humano | 127 |
| 3.1.2 | Error No Intencional | 128 |
| 3.1.3 | Error Intencional | 128 |

| | |
|---|------------|
| 3.1.4 Diferencia entre Error Intencional y Error Malévolo. | 129 |
| 3.1 Características del Error | 129 |
| 3.2.1 Slips | 129 |
| 3.2.2 Equivocación | 129 |
| 3.2.3 Clasificación de los errores | 130 |
| 4. Fallos Humanos | 131 |
| 4.1 Tipos de Fallos | 131 |
| 4.2 Clasificación de los Fallos | 133 |
| 4.3 Accidente | 134 |
| 5. Análisis de la Fiabilidad Humana | 135 |
| 5.1 Definición | 135 |
| 5.2 Diagramación del Análisis | 138 |
| 5.3 Objetivo del Estudio | 140 |
| 5.4 Alcance | 142 |
| 5.5 Acercamiento Técnico | 143 |
| 5.6 Recursos | 144 |
| 5.7 Seleccionado y Aplicando Técnicas HRA | 145 |
| 5.8 Entendiendo las Limitaciones | 151 |
| 6. Resumen | 154 |

CAPITULO 4: TÉCNICAS PROSPECTIVAS Y RETROSPECTIVAS

| | |
|---|------------|
| Objetivos | 155 |
| Objetivo General | 155 |
| Objetivos Específicos | 155 |
| Introducción | 156 |
| 1. Herramientas prospectivas | 157 |
| 1.1 Failure Mode Effect Analysis (FMEA) | 157 |
| 1.1.1. Definición | 158 |
| 1.1.2 Objetivos de FMEA | 158 |
| 1.1.3 Preguntas para el FMEA | 159 |
| 1.1.4 ¿Cómo puede fallar el componente? | 160 |
| 1.1.5 ¿Cómo seleccionar las tareas? | 164 |
| 1.1.6 Registro de Funciones | 165 |
| 1.1.7 Registro de Fallas Funcionales | 165 |
| 1.1.8 Modos de Falla | 166 |
| 1.1.9 Cuadro Resumen Aplicación FMEA | 167 |
| 1.1.10 Tipo de acción de mantenimiento a recomendar FMEA | 168 |
| 1.2 Hazop | 169 |
| 1.2.1 Definición de Hazop | 169 |
| 1.2.2 Hazop como proceso | 170 |
| 1.2.3 Estudio del nodo | 172 |

| | |
|--|------------|
| 1.2.4 Palabras guías | 172 |
| 1.2.5 Desarrollo esquemático del Hazop | 174 |
| 1.2.6 Quien ejecuta los estudios Hazop? | 176 |
| 1.2.7 Conformación del equipo de trabajo | 176 |
| 1.2.8 Preparación para los estudios Hazop | 177 |
| 1.2.15 Palabras guías y sus significados | 183 |
| | |
| 2 Herramientas de desempeño (durante) | 186 |
| 2.1 RCM | 186 |
| 2.1.1 Introducción al mantenimiento centrado en confiabilidad | 186 |
| 2.1.2 Evolución histórica | 187 |
| 2.1.3 Mantenimiento, RCM I y RCM2 | 201 |
| 2.1.4 Las siete preguntas básicas del RCM | 202 |
| 2.1.5 Funciones vs. Parámetros de funcionamiento | 203 |
| 2.1.6 Modos de falla | 206 |
| 2.1.7 Efectos de falla | 207 |
| 2.1.8 Consecuencias de la falla | 208 |
| 2.1.9 Acciones proactivas | 211 |
| 2.1.10 El proceso de selección de tareas de RCM | 217 |
| 2.1.11 Aplicación del proceso RCM | 219 |
| 2.1.12 Beneficios que se logra con el RCM | 224 |
| 2.1.13 Desarrollo de las funciones de los equipos | 228 |

| | |
|---|-----|
| 2.1.14 Desarrollo de un ejemplo: Sistema de almacenamiento de benceno | 252 |
| 2.1.15 Análisis de modos de falla y sus efectos | 272 |
| 2.1.16 Consecuencia de la falla | 321 |
| 2.1.17 Resumen | 364 |
| | |
| 2.2 TPM | 367 |
| 2.2.1 Historia | 368 |
| 2.2.2 Objetivos | 370 |
| 2.2.3 Características | 372 |
| 2.2.4 Tres requerimientos para la mejora fundamental | 373 |
| 2.2.5 Los doce pasos de desarrollo del TPM | 374 |
| 2.2.6 Beneficios del TPM | 418 |
| 2.2.7 Resumen | 419 |
| | |
| 3. Herramientas Retrospectivas (después) | 420 |
| 3.1 Análisis de fallas basados en causas raíz (RCA O RCFA): | |
| Definición | 420 |
| 3.1.1 Equipo RCFA | 422 |
| 3.1.2 Miembros del equipo RCFA | 422 |
| 3.1.3 Clasificación de fallas | 423 |
| 3.1.4 Offshore reliability date | 425 |

| | |
|--|------------|
| 3.1.5 MTBF, MTTR, MTTF. | 425 |
| 3.1.6 Pasos del análisis de causa raíz de las fallas (RCA) | 426 |
| 3.1.7 Organización del equipo | 432 |
| 3.1.8 Análisis de la falla y verificación de las causas raíces | 435 |
| 3.1.9 Los tres niveles de la causalidad | 436 |
| 3.1.10 Comunicación de los Resultados | 451 |
| 3.1.11 Creación de lista de chequeo | 453 |
| 3.1.12 Implementación del Seguimiento | 454 |
| 3.1.13 Failure tracking sistem (sistema de seguimiento de análisis) | 455 |
| 3.1.14 Conclusiones | 456 |
| | |
| 3.2 Modelos de Causalidades de pérdidas | 457 |
| 3.2.1 Perdida | 458 |
| 3.2.2 Incidente / Contacto | 462 |
| 3.2.3 Causas Inmediatas | 464 |
| 3.2.4 Causas Básicas | 469 |
| 3.2.5 Falta de control | 472 |
| 3.3 Multiplicidad de fuentes, de causas y de controles. | 473 |
| 3.4 Causalidad expresada por medio del domino. | 479 |
| 3.4.1 Las tres etapas de control | 480 |
| 3.5 Resumen | 490 |

CAPITULO 5: APLICACIONES DE LA CONFIABILIDAD

| | |
|--|------------|
| Objetivos | 493 |
| Objetivo General | 493 |
| Objetivos Específicos | 493 |
| Introducción | 494 |
| CASO DE APLICACIÓN No.1 | 496 |
| 1. Objeto de Estudio | 496 |
| 1.1 Estructura del Proceso | 497 |
| 2. Historia del Equipo | 498 |
| 3. Cálculos | 498 |
| 3.1 Distribución de Probabilidad Weibull | 498 |
| 3.2 Probabilidad de Ocurrencia de fallas en Próximo año | 499 |
| 3.3 Factor de Efectividad | 500 |
| 3.3.1 Disponibilidad | 500 |
| 3.3.2 Eficiencia | 500 |
| 3.3.3 Factor de Calidad | 500 |
| 3.3.4 Efectividad | 501 |
| 4. Metodología de Análisis de Fallas o Dominó | 501 |
| 4.1 Falla torre de enfriamiento | 501 |
| 4.2 Falla compresor de mayor capacidad | 502 |
| 4.3 Falla compresor de menor capacidad | 504 |
| 5. Árbol Lógico de Fallas (RCA) | 505 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 5.1 | Falla motor de la torre de enfriamiento | 505 |
| 5.2 | Falla compresor mayor capacidad | 506 |
| 5.3 | Falla compresor menor capacidad | 507 |
| 6. | Normas de Mantenimiento de los equipos de refrigeración | 508 |
| 7. | Análisis de Costos | 514 |
| 7.1 | Situación Actual | 514 |
| 7.2 | Situación Propuesta | 515 |
| 8. | Conclusiones | 516 |

CASO DE APLICACIÓN No. 2

| | | |
|------------|--|------------|
| 1. | Objeto de Estudio | 518 |
| 1.1 | Componentes del Elevador de Cangilones | 519 |
| 1.2 | Estructura del Proceso Productivo de INRAOSK S.A. | 520 |
| 2. | Historia del Equipo | 521 |
| 3. | Cálculos | 525 |
| 3.1 | Disponibilidad | 525 |
| 3.2 | Eficiencia | 526 |
| 3.3 | Factor de Calidad | 527 |
| 3.4 | Efectividad | 528 |

| | |
|---|------------|
| 3.5 Pérdidas de Dinero en la Torre de Limpieza de Malta | 529 |
| 3.6 Distribución de Probabilidad Weibull | 530 |
| 3.6.1 Gráfica de la Confiabilidad de la Torre de Limpieza de Malta | 539 |
| 3.6.2 Gráfica del Número de Fallas / Equipo | 539 |
| 3.6.3 Gráfica del Porcentaje de Fallas / Equipo | 540 |
| 4. Evaluación de Prioridad de Riesgos | 541 |
| 5. Metodología de Análisis de Fallas o Dominó | 544 |
| 6. Análisis Causa Raíz (RCA) | 545 |
| 7. Mantenimiento para el Elevador de Cangilones | 546 |
| 7.1 Situación Actual | 546 |
| 7.2 Situación Propuesta | 546 |
| 8. Conclusiones | 548 |
| Glosario | 551 |
| Bibliografía | 566 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|--|-----------|
| Capítulo 1 | |
| Figura 1. Curva de la bañera | 40 |
| Figura 2. Impacto económico de la no fiabilidad en las empresas | 45 |
| | |
| Capítulo 2 | |
| Figura 1. Distribución normal | 73 |

| | |
|--|------------|
| Figura 2. Función de densidad normal | 75 |
| Figura 3. La media y la Varianza normal | 76 |
| Figura 4. Tres curvas normales | 76 |
| Figura 5. Curva normal | 79 |
| Figura 6. Efecto de parámetro de forma Weibull sobre la densidad | 92 |
| Figura 7. El efecto β sobre el CDF trazando papel con valor fijo η | 94 |
| Figura 8. El efecto β sobre el complot de fiabilidad Weibull | 95 |
| Figura 9. El efecto sobre la función de tasa de fallos Weibull | 96 |
| Figura 10. Los efectos de η sobre función de densidad Weibull | 98 |
| Figura 11. El efecto de un parámetro de posición positivo | 100 |
| Figura 12. Complot de probabilidad de datos | 107 |

Capítulo 3

| | |
|--|------------|
| Figura 1. Elementos de un diagrama HRA | 139 |
| Figura 2. Sinopsis de los métodos HRA | 147 |
| Figura 3. Árbol de eventos HRA | 149 |
| Figura 4. Árbol de acción típica de un operador | 150 |

Capítulo 4

| | |
|--------------------------------------|------------|
| Figura 1. Modos de falla FMEA | 157 |
|--------------------------------------|------------|

| | |
|---|------------|
| Figura 2. Hazop como proceso | 171 |
| Figura 3. Expectativas de mantenimiento crecientes | 194 |
| Figura 4. Punto de vista cambiante de falla de equipos | 197 |
| Figura5. Cambios en las técnicas de mantenimiento | 198 |
| Figura 6. Modos de falla | 207 |
| Figura 7. Perspectiva tradicional de la falla | 211 |
| Figura 8. Seis patrones de falla | 213 |
| Figura 9. Un típico grupo de análisis RCM facilitador | 222 |
| Figura 10. Capacidad inicial Vs. Funcionamiento deseado | 229 |
| Figura 11. Permitiendo el deterioro | 231 |
| Figura 12. Activo físico mantenible | 232 |
| Figura 13. Parámetros de funcionamiento variables | 235 |
| Figura 14. Límites superiores e inferiores | 237 |
| Figura 15. Definición contexto operacional | 242 |
| Figura 16. Registro de funciones | 249 |
| Figura 17. Almacenamiento de Benceno | 256 |
| Figura 18. Acople motor | 257 |
| Figura 19. Bujes del impulsor | 258 |
| Figura 20. Falla funcional | 265 |
| Figura 21. Capacidad excede límite superior | 267 |
| Figura 22. Capacidad excede límites superiores e inferiores | 268 |
| Figura 23. Diferentes puntos de vista respecto de las fallas | 269 |

| | |
|---|------------|
| Figura 24. Fallas funcionales de una bomba | 271 |
| Figura 25. Modos de falla de una bomba | 275 |
| Figura 26. Fallas del impulsor de una bomba centrífuga | 278 |
| Figura 27. Modos de falla, categoría 1 | 281 |
| Figura 28. Modos de falla, categoría 2 | 284 |
| Figura 29. Modos de falla, categoría 3 | 286 |
| Figura 30. Niveles de error humano | 292 |
| Figura 31. Tiempo de parada y reparación de una máquina | 298 |
| Figura 32. Hoja de información completa | 302 |
| Figura 33. Tres bombas | 325 |
| Figura 34. Tolerabilidad de riesgo fatal | 334 |
| Figura 35. Identificación y desarrollo de una estrategia de mto. | 340 |
| Figura 36. Estrategia para consecuencias operacionales | 346 |
| Figura 37. Consecuencia de fallas ocultas | 351 |
| Figura 38. Falla dispositivo de protección | 354 |
| Figura 39. Probabilidad falla múltiple | 356 |
| Figura 40. Frecuencia de fallas múltiples | 362 |
| Figura 41. Desarrollo estrategias para funciones ocultas | 364 |
| Figura 42. Evaluación consecuencias de las fallas | 366 |
| Figura 43. Impacto del TPM sobre la confiabilidad | 367 |
| Figura 44. Estructura promocional TPM | 379 |
| Figura 45. Ejemplo estructura promocional TPM | 381 |

| | |
|---|------------|
| Figura 46. Plan maestro para promoción de TPM | 386 |
| Figura 47. Ejemplo estándares de limpieza y lubricación | 398 |
| Figura 48. Procedimientos de entrenamiento en inspección | 401 |
| Figura 49. Ejemplo sistema mantenimiento productivo | 408 |
| Figura 50. Ejemplo flujo de control de mantenimiento | 409 |
| Figura 51. Ejemplo mantenimiento basado en EDP | 410 |
| Figura 52. Costo del ciclo de vida | 416 |
| Figura 53. MTBF, MTRH Y MTTF | 426 |
| Figura 54. Pasos investigación de la causa raíz | 435 |
| Figura 55. Evento de falla | 437 |
| Figura 56. Análisis de falla | 438 |
| Figura 57. Ejemplo falla del generador | 440 |
| Figura 58. Describir modos de falla del generador | 441 |
| Figura 59. Causas de modos de falla | 441 |
| Figura 60. Tormenta de ideas | 442 |
| Figura 61. Verificación de causas de falla | 443 |
| Figura 62. Determinación causa raíz física | 445 |
| Figura 63. Determinación causa raíz humana | 448 |
| Figura 64. Determinación causa raíz latente | 450 |
| Figura 65. Modelo de causalidad ILCI | 457 |
| Figura 66. Garantías de la administración | 460 |
| Figura 67. Causalidad expresada por medio del dominó | 480 |

| | |
|--|------------|
| Figura 68. Factores del trabajo | 487 |
| Figura 69. Modelo de causalidad de pérdidas | 490 |
| | |
| Capítulo 5 | |
| | |
| Figura 1. Diagrama de estructura del proceso | 497 |
| Figura 2. Falla motor torre de enfriamiento | 505 |
| Figura 3. Falla compresor mayor capacidad | 506 |
| Figura 4. Falla compresor menor capacidad | 507 |
| Figura 5. Grafico de la confiabilidad | 539 |
| Figura 6. Gráfico número de fallas por equipo | 539 |
| Figura 7. Grafico porcentaje de fallas por equipo | 540 |
| Figura 8. Metodología del dominó aplicada al elevador | 544 |
| Figura 9. Analisis causa raíz elevador de cangilones | 545 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|-------------------|-------------|
| | Pág. |
| | |
| Capitulo 3 | |

| | |
|--|------------|
| Tabla 1. Motivaciones del HRA | 136 |
| Tabla 2. Ejemplos típicos HRA | 141 |
| Tabla 3. Limitaciones mayores del HRA | 152 |

Capitulo 4

| | |
|--|------------|
| Tabla 1. Probabilidad ocurrencia | 163 |
| Tabla 2. Probabilidad severidad | 163 |
| Tabla 3. Probabilidad detección | 164 |
| Tabla 4. Registro de funciones | 165 |
| Tabla 5. Fallas funcionales | 166 |
| Tabla 6. Modos de falla | 166 |
| Tabla 7. Cuadro resumen FMEA | 167 |
| Tabla 8. Ejemplo análisis PM(1) | 391 |
| Tabla 9. Ejemplo análisis PM(2) | 391 |
| Tabla 10. Siete pasos para mantenimiento autónomo | 395 |

Capitulo 5

| | |
|--|------------|
| Tabla 1. Historia del subsistema de aire york | 498 |
|--|------------|

| | |
|--|------------|
| Tabla 2. Probabilidad distribución Weibull del subsistema | 498 |
| Tabla 3. Probabilidad ocurrencia año próximo | 499 |
| Tabla 4. Fallas elevador de cangilones | 522 |
| Tabla 5. Distribución probabilidad Weibull del elevador | 530 |
| Tabla 6. Calculo confiabilidad elevador de cangilones | 536 |
| Tabla 7. Porcentaje de fallas equipos TLM | 540 |
| Tabla 8. Probabilidad ocurrencia fallas elevador | 541 |
| Tabla 9. Probabilidad severidad fallas elevador | 542 |
| Tabla 10. Probabilidad detección fallas elevador | 542 |

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Presentar una visión ampliada de los principios básicos de la fiabilidad, introduciendo los conceptos y aspectos fundamentales de la ingeniería de la confiabilidad en su evolución histórica y esbozando los problemas más importantes para su explotación y uso, con soluciones practica a los mismos.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Desarrollar las herramientas de diagnóstico, metodologías basadas en confiabilidad y el uso de nuevas tecnologías, en la búsqueda de optimizar la efectividad de sus procesos productivos y la toma de decisiones en las empresas.

INTRODUCCIÓN

La función de la confiabilidad ha sido históricamente considerada como un costo necesario en los negocios. Sin embargo, nuevas tecnologías y prácticas innovadoras están colocando a la función de la confiabilidad como una parte integral de la utilidad total en muchos negocios. Las sólidas técnicas modernas de mantenimiento y su sentido práctico tienen el potencial para incrementar en forma significativa las ventajas competitivas en el mercado global.

El reto para los gerentes de hoy y para los profesionales de la confiabilidad y todos los que estamos involucrados en la profesión de la ingeniería, es descubrir estas nuevas oportunidades. Esto requiere que establezcamos estándares para las prácticas de mantenimiento y confiabilidad, creando un sistema adecuado de información para reunir los hechos y generar el entusiasmo, e iniciando planes que impulsen la acción.

Como todo proceso, la confiabilidad se encuentra en evolución, el dominio de los estándares de mantenimiento ha seguido una serie de etapas cronológicas, que se han caracterizado por una metodología específica.

Durante los últimos cincuenta años, ha habido cambios radicales en tecnología, de administración y de mercadeo. Esto ha generado una revolución en el uso de métodos estadísticos para mejorar la calidad de los productos y servicios.

Una extensión natural de lo que ha pasado en el mundo de la calidad se manifiesta en un cambio de enfoque hacia la mejora de la confiabilidad. En una forma práctica, confiabilidad se define como: “calidad a través del tiempo”. Los administradores, ingenieros y los mismos consumidores se han convencido que buena confiabilidad es una característica indispensable para tener la oportunidad de competir en los mercadeos globalizados, complejos y sofisticados de hoy en día. Igualmente la confiabilidad esta jugando un papel fundamental en los escenarios de control de gestión de riesgos que afectan no solo a hombre, sino, también a los equipos, la productividad y la calidad.

En este Capitulo hacemos un Reseña histórica de la Confiabilidad, presentamos algunos conceptos nuevos usados en ingeniería de confiabilidad, describimos los tipos de confiabilidad existentes y anticipamos futuros desarrollos de la estadística aplicados a esta rama importante de la ingeniería.

1. HISTORIA Y EVOLUCIÓN DE LA CONFIABILIDAD: RESEÑA CRONOLÓGICA

Siempre las actividades bélicas han precedido a periodos de verdaderos adelantos industriales, como consecuencia de los progresos tecnológicos que imponen el difícil y caro arte de la guerra.

En esa empresa de la guerra hubo una evolución desde la fabricación del arco y la flecha o la lanza, actividad meramente personal de cada guerrero, quedando en consecuencia la robustez y calidad de cada arma librada al buen o mal criterio de su constructor.

Hasta aquí no podemos ni siquiera hablar de especificaciones técnicas ni mucho menos, por cuanto el proceso fabril respondía a un criterio personal y sólo tenía como normas el aprendizaje previo y conocimiento que la experiencia le había dado como consecuencia del uso de su arma. Esto se completaba con la imitación de otras armas, en las que se había obtenido mayor eficacia, duración, etc.

Paralelamente con el proceso industrial llegó el momento en que elementos más modernos, como el cañón ya requieren de una cierta especialización; Su construcción responde a la artesanía imperante en esa época, y la ausencia de planos y de especificaciones técnicas que dan lugar a una producción básica

desuniforme, respondiendo con muchas limitaciones al mantenimiento de un cierto calibre compatible con el proyectil a usar y un alma recta. Es decir ya no estamos frente a una pieza o elemento sino un conjunto de ellos, que dan lugar a una maquina o equipo capaz de cumplir una función. Estamos frente a un sistema, que seria la forma más general de llamarlo, defendiendo como tal todo el complejo de partes interconectadas, funcionalmente relacionado de manera que la variación producida en una de ellos afecta parcial o totalmente a los demás.

Esta parte de la ingeniería ha adquirido una relevancia especial en los modernos proyectos de la conquista del espacio y dentro de la misma ocupa un lugar de privilegio el concepto de la confiabilidad.

Como todo proceso, la confiabilidad se encuentra en evolución, el dominio de los estándares de mantenimiento ha seguido una serie de etapas cronológicas, que se han caracterizado por una metodología específica.

La rama de la confiabilidad aplicada emergió al final de la década de los años cuarenta (1941-1950) después de la segunda guerra mundial. La primera generación termina en ese acontecimiento histórico. En esos años la industria no estaba muy mecanizada por lo que los períodos de paradas no impactaban mucho. La maquinaria era sencilla y en la mayoría de los casos diseñada para un propósito determinado, esto hacía que fuese confiable y fácil de reparar, como

resultado no se necesitaban sistemas de mantenimiento complicado y la necesidad de personal calificado era menor que ahora. Parte de la metodología fue desarrollada para estimar el número de repuestos necesarios para mantener equipos electrónicos y mecánicos funcionando en forma intensiva por periodos largos de tiempo durante la guerra.

La segunda generación abarca también un poco el tiempo en el que se dio la Segunda Guerra Mundial, en ésta las cosas cambiaron drásticamente. Los tiempos de guerra aumentaron la necesidad de productos de toda clase mientras que la mano de obra industrial bajó considerablemente. Esto llevó a la necesidad de un aumento de mecanización. Hacia el año 1950 se habían construido equipos de todo tipo y cada vez más complejos, por tanto las empresas habían empezado a depender de ellos. El inicio de la exploración espacial en los años cincuenta con satélites, sondas y vehículos tripulados, aumentaron la necesidad de más desarrollo e implementación de confiabilidad para componentes y sistemas. Al aumentar esta dependencia el tiempo improductivo de una máquina se hizo más evidente, esto llevó a la idea de que las fallas se podían y debían prevenir, lo que dio como resultado el nacimiento del concepto de Mantenimiento programado. En los años 60's esto se basaba primordialmente en la revisión compacta del material a intervalos fijos.

La tercera generación empieza a mediados de los años 70's, el proceso de cambio en las empresas ha tomado incluso velocidades más altas, los cambios pueden clasificarse así:

- Nuevas expectativas: el crecimiento continuo de la mecanización significa que los períodos improductivos tiene un efecto más importante en la producción, costo total y servicios al cliente. Esto se hace más claro con el mantenimiento mundial hacia los sistemas de producción Justo A Tiempo, en el que los reducidos niveles de inventarios en curso hacen que pequeñas averías puedan causar el paro de toda una planta. Esta consideración está creando fuertes demandas en función del mantenimiento.
- Una automatización más extensa: significa que hay una relación más estrecha entre la conexión de la maquinaria y la calidad del producto. Al mismo tiempo se están elevando continuamente los estándares de calidad. Esto crea mayores demandas en función del mantenimiento.
- Otra característica es el aumento de la mecanización, porque cada vez son más serias las consecuencias de las fallas de una instalación para la seguridad y el medio ambiente.

La crisis del petróleo, a principios de la década de los setenta, generó un cambio en la economía mundial y marco el inicio del liderazgo japonés en la calidad y la confiabilidad de productos y servicios.

A fin de que esta reseña no pierda su secuencia en el tiempo, seguiremos un ordenamiento cronológico de los principales acontecimientos que ha precedido a la confiabilidad propiamente dicha:

1.1 Desde 1935 hasta 1946: En 1935, en Argentina existe conciencia ya entre los hombres y entidades representativas del quehacer técnico económico, de la necesidad de crear un ente que centralizara el estudio técnico- científico de normas destinadas a regir todos los procesos industriales. Así como se crea el Instituto Argentino de Racionalización de Materiales (I.R.A.M.).

El año 1939, se caracteriza por la utilización de los **métodos estadísticos**, cuya primera aplicación (está registrado) se debe al Cuerpo de Artillería norteamericano, el que aplicó la estadística para determinar la posibilidad del mantenimiento en condiciones operativas de la munición almacenada.

En 1940, el departamento de guerra de los Estados Unidos, que había advertido que pese a la gran cantidad de normas establecidas no se obtenía en los equipos la calidad esperada y, aun más, que pese a ser construida en las mismas especificaciones no resultaban iguales, encomienda en el mes de Diciembre a la

ASA. El estudio de la aplicación de métodos estadísticos al control de la calidad de materiales y productos determinados.

En 1943, el **Army-Navy Development Comite** (Comité de desarrollo del ejército y Armada), **National Defense Research Comite** (Comité de Investigación de Defensa nacional), advierte que como consecuencia de la diversificación de los equipos radioeléctricos se incrementan considerablemente el numero de válvulas, dejando mucho que desear no solo respecto de su rendimiento, sino de su seguridad de funcionamiento. Esto redundaba en definitiva a favor de la confiabilidad de los equipos, por lo cual se decide encarar el desarrollo de válvulas de mejores características.

En 1944, la circunstancia particular de que las válvulas electrónicas en el ámbito de la Marina están sometidas a una verdadera prueba de tortura a raíz de las vibraciones, choques y otros accidentes a que están expuestos los equipos normalmente.

En 1946, se crea la **American Society for Quality Control** (Asociación Americana de control de calidad), que, como su nombre lo expresa, juega un papel preponderante en todo cuanto hace a las practicas del control de calidad.

1.2 Desde 1950 hasta 1960: En 1950, el departamento de defensa de los Estados Unidos había comprobado una calidad de falla en los equipos electrónicos, lo que fue aseverado por los estudios realizados por la **Aeronautical Radio Inc.**, de cuyas conclusiones se desprendía que solo el 33% de los equipos electrónicos instalados a bordo de buques funcionaba correctamente en cualquier momento. Por ello, resolvió crear en diciembre de ese año **el grupo ad hoc** de confiabilidad de los equipos electrónicos (**Ad Hoc Group on realibility of electronic equipment**), cuya misión fue la de intensificar los estudios hechos hasta el presente en el campo de la confiabilidad.

Como se puede advertir, a partir de este año se adoptan medidas conducentes a una verdadera sistematización de fallas en los sistemas, averías en los equipos, así como sobre el comportamiento esperado en los distintos componentes. Esto da lugar a que sobre bases científicas se elabore una teoría que convierte a la confiabilidad en una nueva rama de la tecnología.

En los próximos capítulos desarrollaremos cuales han sido las disciplinas y ciencias que aportaron su contenido, dando bases sólidas a esta importante actividad técnico-científica, y los demás aspectos que hacen específicamente a la confiabilidad, a fin de no interrumpir esta cronología.

En 1951, el departamento de Defensa de los Estados Unidos impartió la directiva 150, 21-1 que se refería a la confiabilidad de los equipos electrónicos, por la cual se ponía especial énfasis para que todas las dependencias de dicho departamento le diesen la importancia que los equipos electrónicos militares requerían por el rol que estaban llamados a desempeñar. De esta manera quedaba perfectamente aclarado el lugar preponderante que se le daba a la confiabilidad en el desarrollo de todas las fases y uso de los equipos, constituyendo el objetivo fundamental.

En 1952, nuevas medidas tienden a incrementar la confiabilidad de los equipos, destacándose la norma MIL-E-5400 aparecida en Julio de dicho año. Además se forma el **Advisory Group on Reability of Electronic Equipment (AGREE)**.

En 1953, la Marina de los Estados Unidos saca la publicidad NAVYSHIPS 91957 en el mes de junio titulada **Electronics Equipment Realibility**, como contestación a la directiva 150, 20-1.

En 1954, se realiza el primer simposio sobre confiabilidad en Nueva York durante el mes de Noviembre. El **National Bureau of Standars** dio a conocer una publicación que tuvo una gran acogida por tratarse de circuitos experimentado durante diez años; su nombre es manual de circuitos preferidos.

En 1955, el departamento de defensa encargó al **Advisor Group on Reliability of Electronic Equipment (AGREE)** el estudio de todos los problemas que hacían a la confiabilidad. A fin de encontrar las mejores soluciones, el estudio se dividió en nueve campos, a saber: Determinación cuantitativa de la confiabilidad; procedimiento de diseño; definición de componentes o partes; obtención de componentes y equipos; pruebas o ensayos; embalaje; transporte, almacenamiento y mantenimiento.

En agosto en la ciudad de Filadelfia y bajo el auspicio de la fuerza aérea y de la **Radio Corporation of American** se llevo a cabo la conferencia Nacional sobre confiabilidad de equipos electrónicos militares, hecho que evidencia la importancia que se le había dado a esta disciplina, por su proyección indirecta en la conducción de las acciones bélicas.

A mediados de 1957, él **AGREE** publicó el informe final de los estudios encomendados por el departamento de defensa en 1955, con el nombre de **The Reliability of Electronic Equipment**. Los magníficos resultados obtenidos de su aplicación motivaron que varias de sus secciones fueran adoptadas por la fuerza armada como normas.

En 1958, en Argentina también existía la inquietud sobre todo lo que hacía el controlador de calidad y confiabilidad, y la necesidad de proporcionar al país de las correspondientes normas, por tanto, se insistió al **I.R.A.M** estudiar y aprobar la

norma IRAM 14 sobre Control estadístico de Calidad, y más tardes las normas IRAM 15, 16 y 17 sobre recepción por Atributos, y la 18 sobre Muestreo al Azar.

En 1960, el **Institute of Radio Engineers (I.R.E.E)** pasa a formar el actual **Institute of Electrical and Electronics Engineers (I.E.E.E)**, quien crea como organismos dependientes el **National Standards Committee for Reliability**, llamado a cumplir una importante función en el campo de la electrónica.²

En Argentina se crea la comisión Asesora de normalización integrada por los representantes de los diversos organismos estatales y privados. La presidencia de dicha comisión la ocupa un representante de la secretaria de Industria y Minería. Cumple las mismas funciones que la **C.U.M** (Comisión Asesora de Normalización) a la cual sustituye.

1.3 La situación actual: Hoy en día las industrias enfrentan una competencia global intensa, un mercado globalizado y complejo, una presión por ciclos de producción más cortos, restricciones de costos más severas, así como expectativas de mejor calidad y confiabilidad de parte de los consumidores. Este ambiente presenta retos formidables de administración, ingeniería y estadísticas.

² Tomado del libro Confiabilidad, Teoría y Práctica. Antonio Lozano Conejero.

Durante los últimos cincuenta años, ha habido cambios radicales en tecnología, de administración y de mercadeo. Esto ha generado una revolución en el uso de métodos estadísticos para mejorar la calidad de los productos y servicios.

Una extensión natural de lo que ha pasado en el mundo de la calidad se manifiesta en un cambio de enfoque hacia la mejora de la confiabilidad. En una forma práctica, confiabilidad se define como: “*calidad a través del tiempo*”. Los administradores, ingenieros y los mismos consumidores se han convencido que buena confiabilidad es una característica indispensable para tener la oportunidad de competir en los mercados globalizados, complejos y sofisticados de hoy en día.

2. DESARROLLO CONCEPTUAL

2.1 CONFIABILIDAD

La confiabilidad se ha integrado a la actividad científica desde el momento que se conoció o dio una definición que permitió transformar lo que hasta ahora era una cualidad en una cantidad, permitiendo así su medida.

La definición universalmente adoptada y cuyos términos se analizarán a continuación es la siguiente: “La confiabilidad es la característica de un elemento expresado por la probabilidad de que cumpla, durante un tiempo determinado, sus funciones específicas, cuando es colocado en las condiciones funcionales dadas”.³

Es importante que esta probabilidad sea evaluada a las condiciones ambientales o de uso encontradas por el producto, en lugar de las condiciones de trabajo para las que el producto fue diseñado.

(Lawless, 2000) Dice, La confiabilidad se refiere al funcionamiento adecuado de equipos y sistemas, lo cual incluye factores como software, hardware, humanos y ambientales. Este es un concepto mas amplio y muestra la complejidad de lo que se entiende por confiabilidad, su evaluación, el mantenimiento y su mejora.

³ Tomado del texto Confiabilidad, Teoría y Práctica. Antonio Lozano Conejero.

(Condra, 2001) Afirma, que un producto confiable es aquel que hace lo que el usuario quiere que haga cuando el usuario quiere que lo haga. De acuerdo con esto, la confiabilidad es una calidad a través del tiempo, por lo tanto es un producto que debe permanecer dentro de sus límites de especificación durante su vida tecnológica. Esto es, buena calidad es necesaria pero no suficiente para garantizar la confiabilidad del producto. Esto plantea otra dificultad, la confiabilidad de un producto se puede evaluar directamente solo después que ha estado en servicio por algún tiempo, por lo tanto la evaluación y pronóstico de la confiabilidad presenta varios desafíos técnicos.

La confiabilidad es una rama de la ingeniería. La estadística proporciona herramientas importantes para la evaluación, la mejora, el diseño, el pronóstico y el mantenimiento de la confiabilidad. Es pertinente anotar que la confiabilidad se encuentra en su infancia, por lo tanto hay gran variedad de oportunidades y retos para el trabajo interdisciplinario entre administradores, ingenieros y estadísticos para consolidar su desarrollo.

Los valores de confiabilidad por sí solos no motivan los mejoramientos, sin embargo, convirtiendo la no fiabilidad a dinero los valores cobran vida y conducen a decisiones que facilitan cambios efectivos en costos, usando éstos datos por fallas existentes en cada planta.

La confiabilidad es medible: Una probabilidad puede calcularse, medirse. Se calculan si las leyes que gobiernan los fenómenos son conocidos o suficientemente evidentes para ser admitidos; una moneda lanzada al aire tiene un posibilidad sobre dos de caer de un terminado costado, por ejemplo: “cruz”. Resulta ahora fácil calcular la probabilidad de sacar cruz tres veces seguidas.

Si por el contrario las leyes que gobiernan el fenómeno aleatorio no son conocidas ni evidentes, conviene medir la probabilidad: entramos entonces en el dominio de la estadística. Pero antes de entrar a exponer las técnicas estadísticas utilizadas para medir la confiabilidad es necesario conocer cuales son las áreas de aplicabilidad de confiabilidad existentes, dentro de los cuales tenemos:

- **Confiabilidad Humana:** Es una disciplina de la ingeniería de la confiabilidad que se encarga del estudio de los riesgos y los peligros inherentes a la actividad laboral. Sin tener en cuenta este factor, ningún método de evaluación de confiabilidad sería completo, pues bien sabemos el papel importante que juega la participación del hombre en los problemas que hacen al manejo, o bien en lo atinente al mantenimiento. Los errores humanos se presentan durante toda la vida de los sistemas desde su diseño, construcción, montaje hasta el final de su vida útil. En la vida diaria estos errores se vuelven continuos. Esta especialidad analiza, investiga y

recomienda normas, procedimientos y/o medidas apropiadas para el logro de operaciones seguras en el trabajo. Estas medidas ayudan no sólo a evitar accidentes y catástrofes sino que aumentan la productividad del Recurso Humano. En este campo participan otras disciplinas como son las Ergonomía, La salud ocupacional, etc.

- **Confiabilidad de los Materiales:** La materia prima utilizada en el proceso es un factor determinante en la calidad del producto final. Es por esto, que se hace necesario adoptar los materiales adecuados para la maquinaria existente dentro del sistema, de forma que sea la apropiada y se puedan desarrollar productos confiables.
- **Confiabilidad del Equipo:** Este es quizás el elemento que requiere de mayor atención de forma constante. Su confiabilidad no sólo depende del diseño, sino de otros factores como su montaje, condiciones de operación adecuadas a su diseño y mantenimiento recomendado por su fabricante. El objetivo principal de esta especialidad es evitar las fallas y averías mejorando así los tiempos de operación y ciclo de vida del equipo, reduciendo los costos y minimizando el stock de repuestos.

- **Confiabilidad del Medio Ambiente:** Es la especialidad dedicada al reconocimiento, evaluación y control de aquellos factores dentro del sistema que pueden dañar o afectar gradualmente al Medio Ambiente. El principal objetivo es la preservación de él y se ha convertido hoy en día en una exigencia para todas las organizaciones, las cuales han implementado Normas como la **ISO 14000** para asegurar que sus procesos no degraden al Medio Ambiente.
- **Confiabilidad del Proceso:** Desde el siglo pasado se ha vuelto parte esencial de la producción realizar control de variabilidad del proceso como medida eficaz para desarrollar productos de calidad. La introducción de los principios de Deming trajeron consigo la importancia de medir el proceso, para detectar cualquier variación inaceptable, de manera que pueda ser corregido inmediatamente y de esta manera implementar un método eficiente y seguro que una vez evaluado pueda ser mantenido y estandarizado, minimizando el desperdicio, retrasos y trabajos de poca precisión.

Para todos estos elementos que hacen parte del sistema existen técnicas prospectivas (Antes de la falla), de Desempeño (Durante la falla), retrospectivas (Después de la falla) que miden, evalúan la confiabilidad y permiten tomar la

acción de intervención temprana y que veremos con mayor profundidad en los siguientes capítulos.

2.2 LA CURVA DE LA BAÑERA

Como la tasa instantánea de fallos varía respecto al tiempo, su representación típica tiene forma de bañera, con tres etapas diferenciadas: Fallas iniciales ó experimentadas en la zona de asentamiento, fallos normales ó experimentados en la zona de fallas aleatorias y fallas de desgaste ó envejecimiento.

En la Figura 1 puede verse la representación de la curva de tasa de fallos típica, que adopta una forma en bañera, por lo que recibe este nombre.

En la primera etapa de fallas iniciales ó experimentadas en la zona de asentamiento, corresponde generalmente a la existencia de dispositivos defectuosos con una tasa de fallas superior a la normal, que están incluidos en los dispositivos normales. Esta tasa de fallas elevada (número de partes ó componentes que han fallado en un incremento de tiempo dividido por el número de partes que sobreviven) va disminuyendo con el tiempo hasta alcanzar un valor casi constante. Estas fallas son consecuencia de haber usado componentes defectuosos, por un diseño incorrecto, por montaje incorrecto, por periodo de rodaje mal efectuado y por errores humanos. Como un ejemplo, puede citarse,

soldadura de mala calidad en un circuito integrado, conexiones defectuosas, polvo ó contaminación en las superficies ó en los materiales, impurezas en los metales o en aislamientos, grietas, posicionamiento incorrecto de las piezas en el montaje, etc. En los aparatos electrónicos las dos causas que más contribuyen al fallo son la temperatura y la tensión excesiva, y otras causas normales son la humedad, ciclos de temperatura, vibración, choque térmico ó mecánico y cambios en altitud.

La segunda etapa de operación normal o de fallas aleatorias, es debida usualmente a operaciones con solicitaciones superiores a las proyectadas. Durante esta etapa, la tasa de fallos se estabiliza a un valor casi constante y los fallos que se presentan se denominan aleatorios o catastróficos, ya que ocurren de forma totalmente aleatoria e inesperada. Por ejemplo, un tanque a presión puede colapsarse si por fallo del sistema de presión es solicitado en vacío. En los primeros vuelos comerciales con aviones a reacción, la fatiga de metales que se presentó, ocasionó accidentes por despresurización de la cabina, dando lugar a una completa investigación y remodelación de la construcción de los reactores comerciales.

Su ocurrencia a menos que se consideren durante un largo período, sólo permite la determinación estadística del Tiempo Medio entre Falla (TMEF), el que se relaciona con la tasa de falla λ de la siguiente manera:

$$\lambda = \frac{1}{TMEF}$$

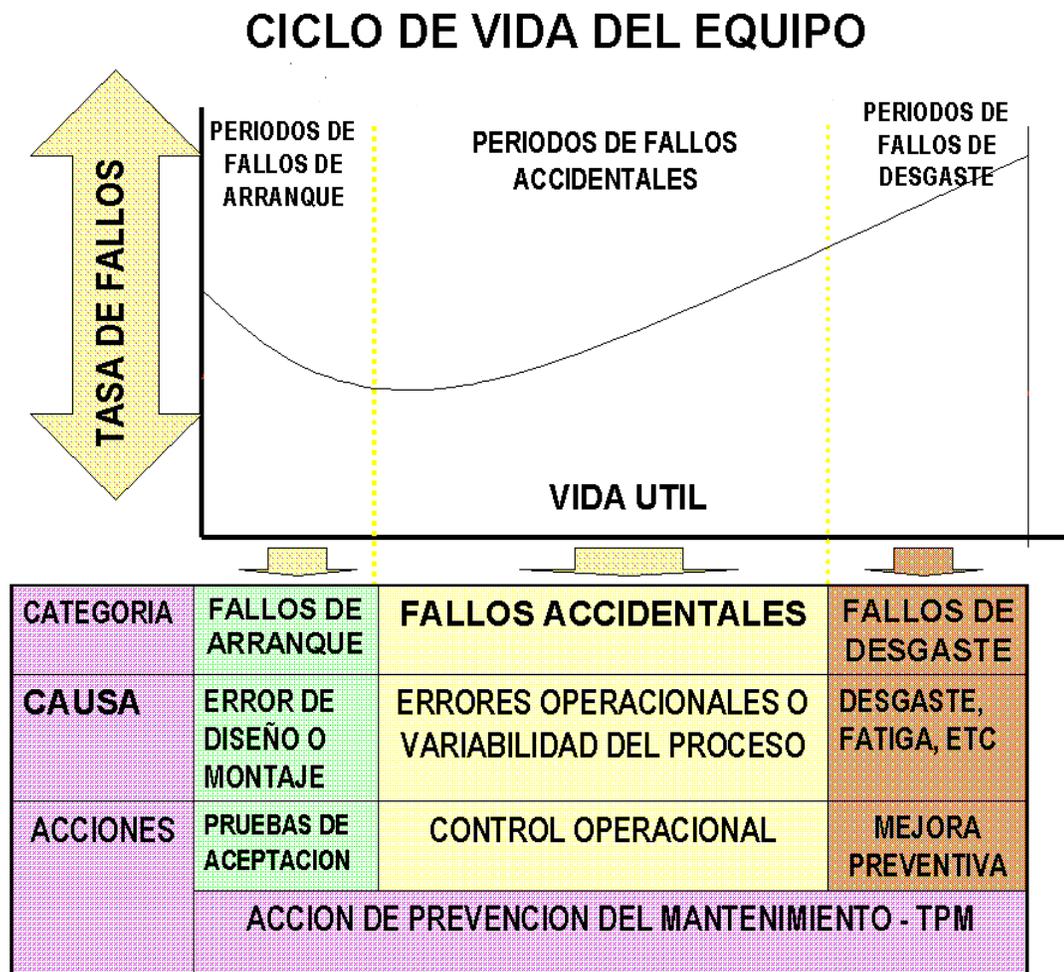
Ecuación aplicable solamente a la zona de fallas aleatorias, cuyo tiempo de duración es el determinante fundamental del sistema de confiabilidad.

La tercera etapa denominada fallas de desgaste o envejecimiento, es debida a la superación de la vida prevista del componente cuando empiezan a aparecer fallas en la degradación como consecuencia del desgaste. Se caracteriza por un aumento en la tasa de fallos, tanto más elevado cuanto mayor sea el tiempo transcurrido desde el final de la segunda etapa. En circuitos electrónicos no preparados para el ambiente de trabajo, los fenómenos de corrosión u oxidación no esperados pueden causar su destrucción. Otros fenómenos que influyen son la rotura o fuga de aislamiento, la migración química de metales o de contaminantes en el vacío o en superficies, el desgaste por rozamiento o la fatiga, la contracción o rotura en los materiales plásticos, etc.

Para retardar la aparición de la tercera etapa, puede acudirse a la sustitución completa de los componentes del dispositivo ó equipo cuando estos fallen, ó cambiarlos antes de transcurrida su vida útil con planes de mantenimiento preventivo. De este modo puede posponerse casi indefinidamente la incidencia del desgaste en el dispositivo.

Es necesario aclarar que el concepto de la curva de la bañera no constituye un estándar de comportamiento del ciclo de vida para todo tipo de equipos y por consiguiente existen una variedad de estándares de comportamientos, los cuales expondremos con mas detalle en el capítulo No4. Sin embargo podemos afirmar que cada uno de estos patrones parten del mismo concepto del ciclo de vida planteado en la bañera.

Figura 1. Curva de la Bañera



2.3 MODOS DE FALLAS

Un modo de falla podría ser definido como cualquier evento que pueda causar la falla de un activo físico (o sistema o proceso). Sin embargo anteriormente mostramos que es vago y simplista aplicar el término "falla" a un activo físico de manera general. Es mucho más preciso distinguir entre "una falla funcional" (un estado de falla) y un "modo de falla" (un evento que puede causar un estado de falla). Esta distinción lleva a la siguiente definición más precisa de un modo de falla:

“Un modo de falla es cualquier evento que causa una falla funcional”.

La mejor manera de mostrar la conexión y la diferencia entre estados de falla y los eventos que podrían causarlos es, primero, hacer un listado de fallas funcionales, y luego registrar los modos de falla que podrían causar cada falla funcional.

La descripción del modo de falla debe consistir de un sustantivo y un verbo. La descripción debe contener los detalles suficientes para poder seleccionar una estrategia de manejo de falla apropiada, pero no demasiados dado que ya se pierden grandes cantidades de tiempo en el proceso de análisis por sí solo.

Una vez que cada modo de falla ha sido identificado, es posible considerar qué sucede cuando ocurre, evaluar las consecuencias y decidir si algo debiera hacerse para anticipar, prever, detectar, corregir ó hasta rediseñar.

Entonces el proceso de selección de tareas de mantenimiento, y gran parte de manejo de estas tareas es llevado a cabo como producto de la identificación y análisis de los modos de falla.

3. IMPACTO ECONOMICO DE LA NO FIABILIDAD

Cada año, la industria estadounidense gasta más de \$300 mil millones de dólares en mantenimiento de las plantas y sus operaciones. Aproximadamente un 80% de esos dólares se gastan en corregir fallas crónicas en las máquinas y sistemas, así como, errores humanos.

Eliminando estas fallas crónicas, se puede reducir el costo de mantenimiento entre un 40% y un 60%. Esto se logra sin necesidad de grandes reestructuraciones internas o despidos de gente o sacrificios en la calidad del producto. Lo que sí se necesita es hacer cambios en las actitudes y formas de pensar acerca de los procedimientos aplicados en el mantenimiento y operación diaria de la planta. Esto está pasando a toda hora y en toda clase de industrias. (Ver Figura 2). Estas fallas traen como consecuencia las pérdidas. Existen diferentes tipos de falla que ocasionan estas pérdidas.

PÉRDIDAS POR PARADA FORZADA DEL EQUIPO

- Fallas del equipo.
- Cambios de accesorios y ajuste

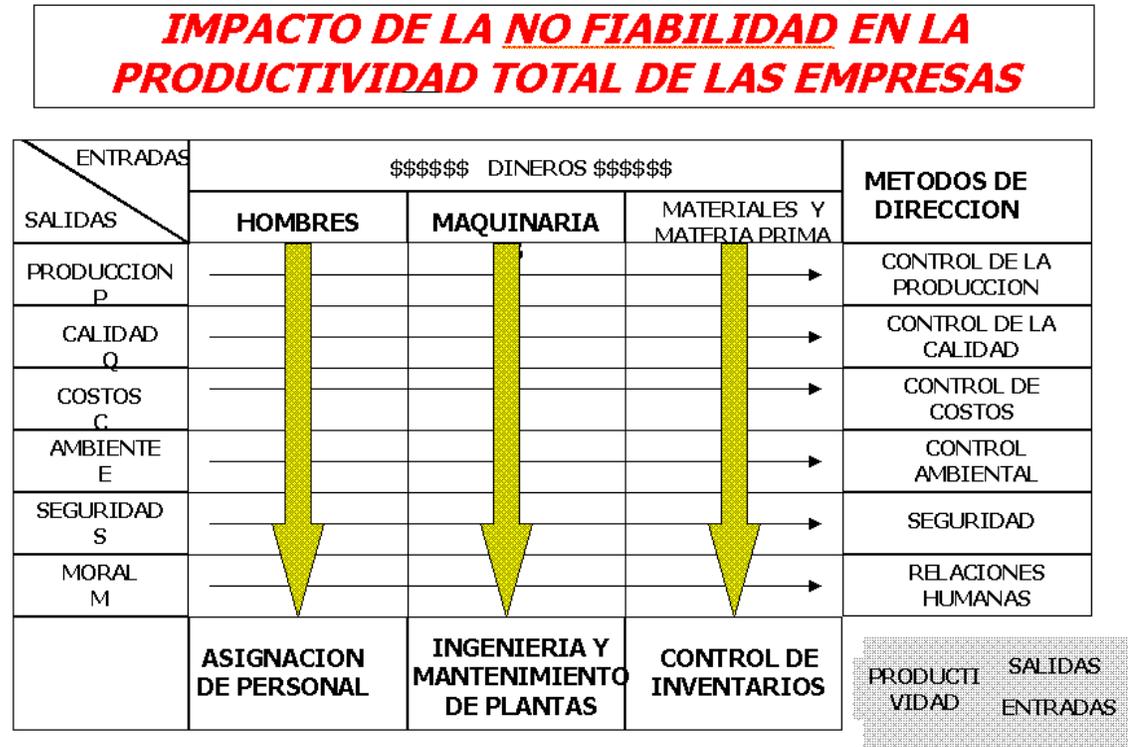
PÉRDIDAS POR VELOCIDAD O RENDIMIENTO

- Tiempos en vacío y paradas menores- debido a operación anormal de sensores, bloqueo de piezas en rampla, etc.
- Reducción de la velocidad- debido a discrepancias entre la velocidad de diseño y la velocidad con la que se opera el equipo.

PÉRDIDAS POR DEFECTOS

- Defectos de proceso-debido a defectos de calidad.
- Reducción del rendimiento desde el arranque de la maquinaria hasta su producción estable.

FIGURA 2. IMPACTO ECONÓMICO DE LA NO FIABILIDAD EN LAS EMPRESAS.



Las entradas son el valor activo de todas las compañías, cuyos activos directos son el Recurso Humano, la Maquinaria y la Materia Prima. La interacción adecuada de estos factores da como resultado una producción confiable. De esta forma, se han constituido Métodos de Direccionamiento, cuyo objetivo es optimizar la interacción de estos activos, a través de estrategias como la asignación de personal, La Ingeniería y Mantenimiento de Plantas y el Control de Inventarios. Un buen direccionamiento de la compañía dará como resultado una producción eficiente, a un costo bajo que no sacrifique la calidad del producto, garantizando al mismo tiempo la seguridad de sus empleados para que de esta forma ellos

valoren su participación en el proceso y contribuyendo a la preservación del Medio Ambiente.

3.1 BENEFICIOS DE LA FIABILIDAD

La fiabilidad actualmente es considerada una ingeniería, debido a la importancia que ha venido tomando en los últimos años, tanto que aplicar métodos de fiabilidad se ha constituido en el fundamento de programas de mantenimiento y Salud Ocupacional de las empresas. En el presente diagrama se describen algunos de los métodos y herramientas utilizadas en las compañías para conservar sus procesos productivos confiables.



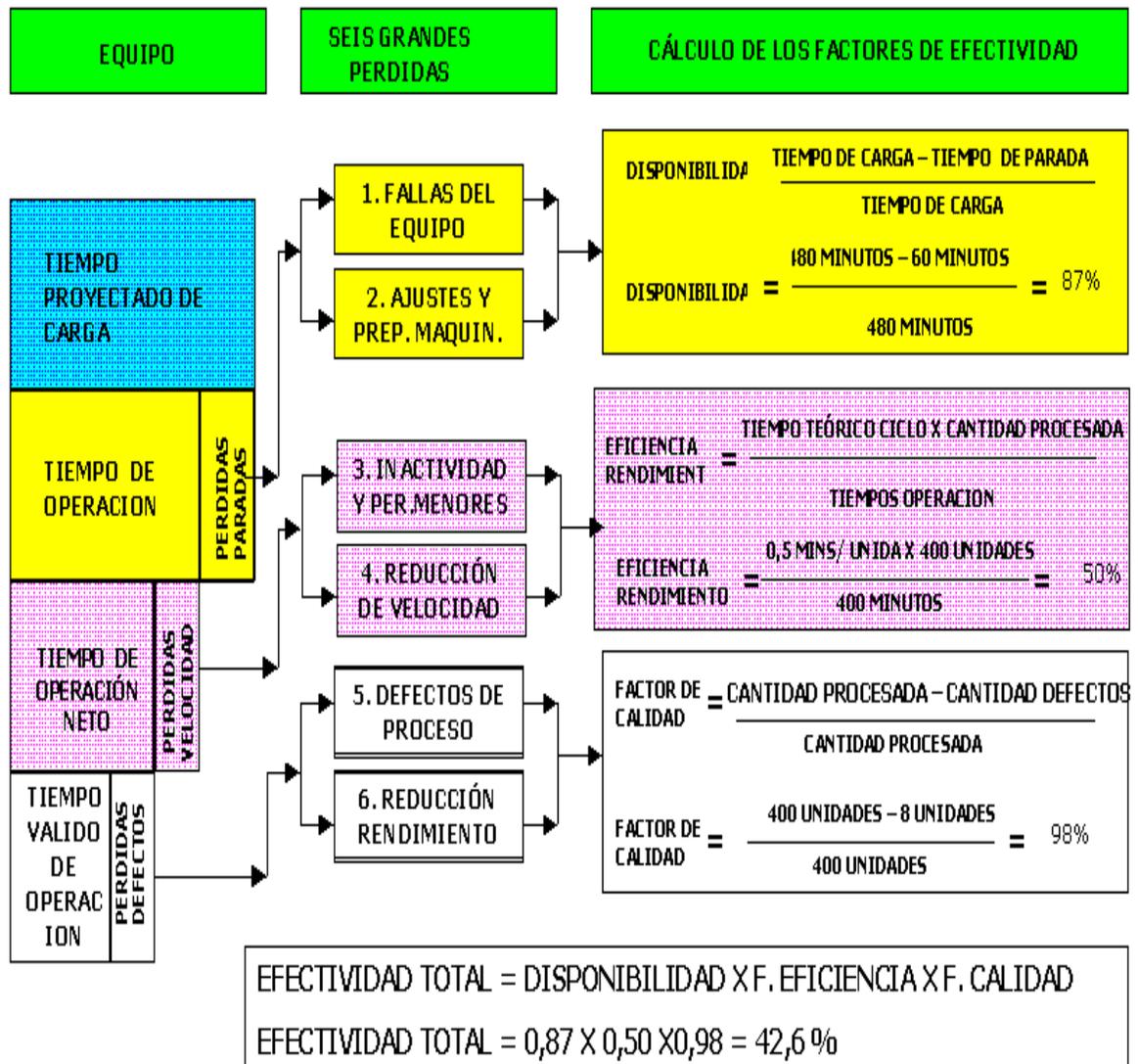
EJEMPLO:

Datos de producción:

1. Horas de trabajo por día = 60 minutos x 8 horas = 480 minutos
2. Tiempo de parada planificada por día (mantenimiento programado u otros propósitos) = 20 minutos.
3. Tiempo proyectado de carga = 1- 2 = 460 minutos

4. Pérdidas de parada por día (averías 20 min.; cambios trabajo 20 min.; ajustes 20 min.) = 60 minutos.
5. Tiempo de operación por día = 3 - 4 = 400 minutos
6. Producción por día = 400 ítem
7. Tiempo estándar del ciclo: 0,5 minutos/ ítem
8. Tiempo actual del ciclo: 0,8 minutos/ ítem
9. Porcentaje de defectuosos: 2 %
10. Costo por ítem: \$1000

SOLUCIÓN:



Perdidas:

No Disponibilidad: $60 \text{ minutos} / 0.5 \text{ min/item} = 12 \text{ ítem.}$

Ineficiencia: $200 \text{ minutos} / 0.5 \text{ min/item} = 400 \text{ ítem.}$

Items defectuosos = 8

Total = 420 ítem

Perdida Económica: $420 \text{ ítem} * \$1000 = \$420000 * 30 \text{ días} = \$10'080000$

mensuales

Perdida Económica anual : $\$10'080000 \text{ mensuales} * 12 \text{ meses} = \$120'960000$

4. ESTANDARES DE LA FIABILIDAD

MIL – HDBK –H108 SAMPLING *PRODECURES AND TABLES FOR LIFE*
AND REALIBILITY TESTING

MIL – HDBK – 189 REALIBILITY GROWTH MANAGEMENT

MIL–HDBK– 217F PREDICCIÓN DE LA FIABILIDAD PARA EQUIPOS
ELECTRONICOS

MIL – HDBK – 251 REALIBILITY/ DESIGN THERMAL APPLICATION

MIL–HDBK–263A ELECTROSTATIC DISCHARG CONTROL FOR
PROTECCION FOR ELECTRIC AND ELECTRONIC

MIL– HDBK – 338 ELECTRONIC RELIABILITY DESIGN.

MIL –STD – 690C FAILURE RATE SAMPLING PLAN AND PRODECURES.

MIL–STD–721C DEFINITION OF TERMS FOR REALIBILITY AND
MAINTAINBILITY

- MIL -STD- 721** **MODELOS Y PREDICCIÓN DE LA FIABILIDAD**
- MIL - STD-2155** **FAILURE REPORTING, ANALYSIS AND CORRECTIVE
ACCION SYSTEM (FRACAS)**
- MIL-STD-470B** **MAINTAINABILITY PROGRAM REQUERIMENTS FOR
SYSTEMS AND EQUIPMENT.**
- MIL- HDBK-472** **MANTENIBILIDAD Y PREDICCIÓN**
- DOD-HDBK-791** **MAINTAINABILITY DESIGN TECHNIQUES**
- MIL-HDBK-127** **PREDICCIÓN DE LA FIABILIDAD EN EQUIPOS
ELECTRONICOS.**
- MIL-STD-1629** **PROCEDIMIENTOS PARA EFECTUAR ANÁLISIS DE FALLOS**
- MIL-STD-883** **MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS DE ENSAYO PARA
MICROELECTRÓNICA**
- MIL-M-38510** **ESPECIFICACIONES MILITARES DE MICROELECTRÓNICA
ESTÁNDAR**

BS-9400 ESPECIFICACIONES BRITÁNICAS PARA COMPONENTES
ELECTRÓNICOS DE CALIDAD FIJADA.

IEC-319 PRESENTACION DE DATOS DE FIABILIDAD DE COMPONENTES
ELECTRÓNICOS

IEC-409 GUIA PARA LA INCLUSIÓN DE CLAUSULAS DE FIABILIDAD EN
LAS ESPECIFICACIONES DE LOS COMPONENTES O PIEZAS PARA
EQUIPO ELECTRÓNICO.

IEC-410 PLANES DE MUESTREO Y PROCEDIMIENTOS DE INSPECCION
POR ATRIBUTOS.

6. RESUMEN

En la industria, existe de modo creciente, una inquietud por la fiabilidad y la seguridad de complejos industriales y de sus métodos de producción y control, lo que ha dado lugar a métodos capaces de analizar dicha fiabilidad.

Actualmente esta emergiendo en la industria la figura del ingeniero de la fiabilidad que complementa o se solapa con la del ingeniero de seguridad dedicado al análisis de riesgos de la planta. La ingeniería de la fiabilidad trata de la disponibilidad, la operabilidad y la mantenibilidad de los sistemas técnicos, incluyendo el análisis de riesgos para la prevención de sucesos o eventos que pueden dar lugar a consecuencias indeseables. Así mismo, puede tratar aspectos relativos a la predicción y medida de la fiabilidad y a la calidad de fabricación para minimizar el costo total durante la vida global de un componente o sistema, considerando las restricciones ambientales y las normas gubernamentales.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Presentar las distintas herramientas estadísticas de la Ingeniería de la Confiabilidad, para que sean tenidas en cuenta en los programas de mejoramiento de las empresas, mediante predicción y prevención de fallas que permitan evitarlas o reducirlas y así eliminar altos costos o pérdidas.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Desarrollar habilidades en el manejo de las técnicas estadísticas que permitan calcular la confiabilidad de un componente.
- Identificar cual es la herramienta estadística que debe utilizarse para un determinado componente, equipo o sistema.

INTRODUCCIÓN

Para continuar compitiendo en los mercados nacionales e Internacionales, las industrias de cada país deben mejorar, de manera continua, la calidad de los productos y servicios que ofrece. Una parte importante de este esfuerzo por incrementar la calidad será realizado por ingenieros y científicos, ya que son ellos quienes diseñan y desarrollan nuevos productos, sistemas y procesos de fabricación, además de que perfeccionan los ya existentes. Los métodos estadísticos constituyen una herramienta importante en estas actividades porque proporcionan al ingeniero métodos descriptivos y analíticos que le permiten abordar la variabilidad de los datos que observa y facilitan la toma de decisiones.

El área de la Ingeniería de la Confiabilidad y la metodología estadística relacionada han estado creciendo continuamente durante los últimos 50 años. Sin embargo se necesita desarrollar más métodos estadísticos, procedimientos de recolección de información, planes de ensayo y herramientas enfocadas a la confiabilidad de sistemas y componentes.

En éste capítulo se pretende valorar el uso de estas técnicas, enseñar el manejo de cada una de ellas e identificar cuando deben ser usadas.

1. GENERALIDADES ESTADÍSTICAS

1.1 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

En los últimos años, se llegó a comprender que la demanda de medición y predicción de la confiabilidad podría satisfacerse en parte mediante el análisis estadístico. Por tal razón se le dio importancia a la recopilación de datos relativos a las causas de averías de los componentes de un sistema. Los datos de referencia han contribuido tanto para determinar el promedio de duración de los componentes (siendo esta una de las primeras medidas con que cuenta la confiabilidad), como para conocer las causas y formas de fallas más frecuentes, descubriendo así las piezas y circuitos de fabricación subnormal.

La estadística constituye, luego, una nueva dimensión, que los modernos sistemas de análisis han agregado a los métodos tradicionales de confiabilidad y simultáneamente han originado un sistema muy fácil de clasificación y evaluación de esta nueva disciplina técnica.

1.2 CALCULO DE PROBABILIDADES:

Si bien es cierto que este aspecto esta íntimamente ligado con el que acabamos de analizar, cabe agregar que nos da los pilares sobre los cuales se sostiene el concepto de medida de la confiabilidad. Así, por ejemplo, las expresiones: “Probabilidad de funcionamiento”, “Probabilidad de defectos o fallas” definen un conjunto de valores que hacen específicamente a la medida de la confiabilidad, la que en muchos casos está calculada mediante el empleo de formulas de probabilidad estadísticas.

1.3 CONTROL DE CONFIABILIDAD

La verificación o control puede efectuarse en dos circunstancias:

a) Durante el proceso de fabricación, etapa que no debe obviarse nunca, pues un control adecuado permite descubrir errores de diseño o fabricación que conspiraría contra la longevidad del producto. En secuencia, resulta más práctico y disminuye el costo de producción el hecho de corregir los errores durante la fabricación que efectuar los cambios sobre la base de fallas que aparecen cuando el producto está en servicio;

b) El control que se efectúa cuando el componente ó sistema está terminado y más aún cuando ya esta en servicio y empieza a fallar continuamente. No obstante, proporciona información estadística que sirve para analizar el comportamiento de las fallas, su modo y su futura ocurrencia.

Para comprobar si un dispositivo puede sufrir desperfecto durante un funcionamiento prolongado, se somete a numerosas pruebas y ensayos en servicio antes de declararse apropiado para su utilización práctica. Además de medirse sus características, el dispositivo debe someterse a una serie de pruebas físicas o de medio ambiente, tales como temperatura, vibración, golpes y resistencia al moho o baños de sal. El fin principal de las pruebas es verificar si el dispositivo cumple con los requisitos de aceptación establecidos y obtener una prueba concreta de su capacidad de rendimiento y unas condiciones normales en las que debe ser operado.

La información sobre los defectos que se obtiene con estos ensayos no solo se utiliza para analizar la confiabilidad de componentes o dispositivos, sino de equipos o sistemas completos.

Si un producto determinado presenta un número excesivo de fallas, se realiza una investigación con el fin de determinar las causas de las averías y proceder en consecuencia para aumentar la confiabilidad.

Una forma para controlar de acuerdo con el segundo concepto que expresamos, o sea cuando el componente o sistema se encuentra en servicio, es computando los informes sobre las fallas y averías que sufren estos. Ambos aspectos dan una buena medida de la confiabilidad que se ha logrado obtener en el componente ó sistema.

1.4 EVALUACIÓN DE RESULTADOS.

Para efectuar la evaluación es necesario realizar un conjunto de medidas sometiendo los aparatos a una serie de pruebas a fin de obtener información precisa sobre el número y tipos de fallas producidas. Además debe considerarse los defectos ocurridos en el periodo de servicio; y sobre la base del rendimiento alcanzando por aparatos anteriores, determinar el grado de confiabilidad que se ha logrado obtener.

Desde luego que el objetivo es obtener componente ó sistemas que se desempeñen correctamente el 100% del tiempo, lo que no ocurre normalmente en la práctica, como consecuencia de numerosos factores tales como errores de diseño, deficiencia de materiales, limitaciones de costo ó uso inapropiado del sistema ó componente. En definitiva, la importancia principal de la confiabilidad es asegurarse, con cierto grado medible de confianza, que éste cumplirá su función. Con tal fin, es indispensable definir claramente dicha función, de manera que no exista duda alguna del objetivo que debe lograrse en la disponibilidad del sistema, y así diremos que la confiabilidad es satisfactoria o mejor definiremos como confiabilidad satisfactorias a la probabilidad de que un aparato o equipo se comporte de acuerdo con el objetivo para el cual fue concebido.

1.5 PREDICCIÓN DE RESULTADOS

Predecir significa anunciar por revelación, ciencia o conjetura, algo que ha de ocurrir o acontecer. El conocimiento de ese futuro será tanto mayor, cuanto más numerosos sean los elementos de juicio o información acumulados al respecto. Si dicha información fuera infinita, el conocimiento que tendrá de ese futuro constituirá una certeza; pero en la misma forma en que se ha incrementado la información, lo ha hecho el costo del proceso, resultando antieconómico. El

cálculo de la confiabilidad general de un sistema, aplicando las herramientas estadísticas permitirá descubrir las deficiencias de diseño ó problemas que se presenten en su operación normal debido a incorrecta utilización u otros factores.

Finalmente, para el análisis del comportamiento y predicción de fallas estudiaremos ciertas técnicas estadísticas que nos ayudarán a evitarlas y consecuentemente a la reducción de costos y pérdidas.

2. TÉCNICAS ESTADÍSTICAS

2.1 DISTRIBUCIÓN BINOMIAL

- La distribución Binomial es un modelo de distribución de probabilidad DISCRETA que permite describir el comportamiento de algunas variables discretas (es decir, las que toman valores enteros: 1, 2, 3,...)
- Se deduce a partir del proceso de Bernoulli, en donde se expone que un experimento, sólo puede conducir a dos resultados probables y mutuamente excluyentes, ambos son rotulados como éxito y fracaso, la probabilidad de éxito es p y la probabilidad de fracaso es $q = 1 - p$.

El ensayo se conoce como: “Ensayo de Bernoulli”, en honor del matemático suizo “Jame Bernoulli”, y consiste en un ensayo de un experimento que sólo puede conducir a uno de dos resultados mutuamente exclusivos, tales como vivo o muerto, varón o mujer, casado o soltero, sano o enfermo, inteligente o tonto, defectuoso o no defectuoso, etc.

2.1.1 Proceso de Bernoulli: Estudia fenómenos con las siguientes características:

- ✓ Existen dos posibles resultados: Aceptable-Defectuoso, Niño-Niña,....
- ✓ La proporción (probabilidad) de aparición de cada tipo es constante:
 $P(\text{Aceptable})=\text{constante}$
 $P(\text{Defectuoso})=1-P(\text{Aceptable})$
- ✓ Las observaciones son independientes

La repetición de n experimentos de Bernoulli independientes genera una variable aleatoria X que tiene distribución Binomial.

Por lo tanto se dice que la variable aleatoria X tiene Distribución de Binomial.

2.1.2 Características: Un experimento aleatorio que consiste de n ensayos repetidos tales que:

- a. Los ensayos son independientes,
- b. Cada ensayo tiene sólo dos resultados posibles, denominados “éxito” y “fracaso”, y
- c. La probabilidad de éxito en cada ensayo, denotada por p , permanece constante

Recibe el nombre de experimento Binomial. La variable aleatoria X que es igual al número de ensayos donde el resultado es un éxito, tiene una distribución Binomial con parámetros p y $n = 1, 2, \dots$

$$f_x(x; p, n) = \binom{n}{x} p^x (1-p)^{n-x}, x = 0, 1, \dots, n$$

La expresión anterior para la probabilidad es una fórmula muy útil y aplicativa. El nombre de la distribución se tomó del desarrollo Binomial. Para las constantes a y b el desarrollo Binomial es:

$$(a + b)^n = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} a^k b^{n-k}$$

Sea p la probabilidad de un éxito en un solo ensayo. Entonces, al emplear el desarrollo Binomial con a = p y b=1-p, se observa que la suma de las probabilidades para una variable aleatoria Binomial es 1. Por otra parte, como cada ensayo del experimento se clasifica en dos resultados, {éxito, fracaso}, la distribución se conoce como binomial. Una distribución más general, que incluye a la Binomial como caso especial, es la distribución Multinomial. En ocasiones, una variable aleatoria Binomial con n=1 también recibe el nombre de **variable aleatoria Bernoulli**.

La media y la varianza de una variable aleatoria Binomial dependen sólo de los parámetros p y n. Por tanto, si X es una variable aleatoria Binomial con parámetros p y n, entonces:

$$\mu_x = E(X) = np \quad \vee \quad \sigma_x^2 = V(X) = np(1 - p)$$

2.2 DISTRIBUCIÓN POISSON

La distribución Poisson es de naturaleza discreta, llamada así por el nombre de Simeon Denis Poisson (1781-1840), quien la describió por primera vez en 1837. Esta distribución ha resultado aplicable a muchos procesos en los que ocurren determinados procesos por unidad de tiempo, espacio, volumen, área, etc. Esta distribución se caracteriza porque sus respuestas están orientadas a darle solución a problemas que se refieren al número de éxitos esperados por unidad de tiempo o espacio, etc.; tal como la distribución Binomial se caracteriza por el número de éxitos en n ensayos.

2.2.1 CARACTERÍSTICAS: La distribución Poisson se puede considerar como el límite de una Binomial cuando n es muy grande y p muy pequeño y en realidad la unidad de espacio o tiempo que suele considerarse en una distribución de Poisson equivale al número de ensayos al cual nos referimos en una Binomial. Para introducir la distribución Poisson, estudiemos:

Ejemplo 1:

Las fallas superficiales de un alambre de cobre se presentan de manera aleatoria. Sea X la variable aleatoria que cuenta el número de fallas superficiales de un alambre de cobre de longitud L milímetros, y supóngase que el número promedio de fallas en L milímetros es λ .

La longitud del alambre se divide en n subintervalos de longitud más pequeña, por ejemplo de un micrómetro cada uno. Si el subintervalo seleccionado es lo bastante pequeño, entonces la probabilidad de que en él se tengan más de una falla es insignificante. Por otra parte puede interpretarse la hipótesis de que las fallas se presentan de manera aleatoria como una implicación de que cualquier subintervalo tiene la misma probabilidad p de contener una falla. Finalmente, si se supone que la probabilidad de que un intervalo contenga una falla es independiente de la de otros subintervalos, entonces la distribución de X puede modelarse de manera aproximada con la de una variable aleatoria Binomial.

Dado que:

$$E(X) = \lambda = np$$

Se tiene entonces que:

$$P = \lambda/n$$

Esto es, la probabilidad de que un subintervalo contenga una falla es λ/n . Con subintervalos suficientemente pequeños, n es muy grande y p es muy pequeña. Por consiguiente la distribución de X se obtiene:

$$P(X = x) = \binom{n}{x} p^x (1 - p)^{n-x}$$

Finalmente, dado un intervalo de números reales, supóngase que el conteo de ocurrencias es aleatorio en dicho intervalo. Si éste puede dividirse en subintervalos suficientemente pequeños, tales que:

1. La probabilidad de más de una ocurrencia en el subintervalo es cero,
2. La probabilidad de una ocurrencia en un subintervalo es la misma para todos los subintervalos, y es proporcional a la longitud de éstos, y
3. El conteo de ocurrencia en cada subintervalo es independiente del de los demás subintervalos,

Entonces el experimento aleatorio recibe el nombre de Proceso Poisson.

2.2.2 FUNCION DE PROBABILIDAD DE POISSON: Si el número promedio de ocurrencias en el intervalo es $\lambda > 0$, la variable aleatoria X que es igual al número de ocurrencias en el intervalo tiene una distribución Poisson con parámetro λ , y la función de probabilidad de X es:

$$f_x(x; \lambda) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^x}{x!}, x = 0, 1, 2, \dots$$

A lo largo del tiempo, el término proceso Poisson se ha utilizado para sugerir la observación de un sistema con el paso del tiempo. En el ejemplo del alambre de cobre se demuestra que la distribución Poisson también puede aplicarse a intervalos tales como longitudes. Si una variable aleatoria Poisson representa el número de ocurrencias en un intervalo, entonces la media de la variable aleatoria debe ser igual al número de ocurrencias esperado en un intervalo de longitud idéntico.

Para el caso del alambre delgado de cobre, supóngase que el número de fallas está descrito por una distribución Poisson con una media de 2.3 fallas por milímetro. Determínese la probabilidad de tener exactamente dos fallas en un milímetro de alambre.

Sea X el número de fallas en un milímetro de alambre. Entonces, $E(x)=2.3$ fallas, y

$$f_x(x = 2) = \frac{e^{-2.3} 2.3^2}{2!} = 0.265$$

Calcúlese la probabilidad de tener 10 fallas en cinco milímetros de alambre. Sea x el número de fallas en cinco milímetros de alambre. Entonces x tiene una distribución Poisson con:

$$E(X) = 5\text{mm} \times 2.3 \text{ fallas/mm} = 11.5 \text{ fallas}$$

Por consiguiente,

$$f_x(x = 10) = \frac{e^{-11.5} 11.5^{10}}{10!} = 0.113$$

Determínese de tener al menos una falla en dos milímetros de alambre. Sea x el número de fallas en dos milímetros de alambre. Entonces x tiene una distribución Poisson con:

$$E(X) = 2\text{mm} \times 2.3 \text{ fallas/mm} = 4.6 \text{ fallas}$$

Por tanto,

$$P(X \geq 1) = 1 - P(X = 0) = 1 - e^{-4.6} = 0.9899$$

2.2.3 LA MEDIA Y LA VARIANZA: Si X es una variable aleatoria Poisson con parámetro λ , entonces la media y la varianza de X son:

$$\mu_x = E(X) = \lambda \quad \gamma \quad \sigma_x^2 = V(X) = \lambda$$

Ejemplo 2

Una central nuclear recibe su poder eléctrico de una reja de utilidad fuera de la planta. De la experiencia del pasado, se sabe que la pérdida de poder de la reja ocurre una vez a una velocidad de por año. ¿Cuál es la probabilidad que encima de un período de 3 años ningún paro de poder ocurrirá? ¿Que por lo menos dos paros de poder ocurrirán?

Aquí

$p = 1/\text{año}$

$t = 3\text{años}$

$X=0$, y $X \geq 2$,

$\lambda = 1 \cdot 3 = 3$

$$P(X = 0) = \frac{3^0 e^{-3}}{0!} = 0.05$$

$$P(X = 1) = \frac{3^1 e^{-3}}{1!} = 0.149$$

$$P(X \geq 2) = 1 - P(X \leq 1) = 1 - P(X = 0) - P(X = 1) = 1 - 0.05 - 0.149 = 0.80$$

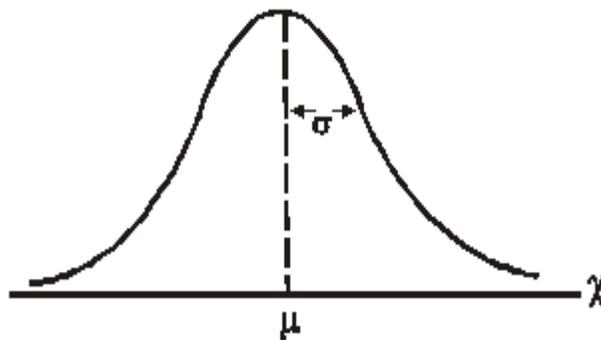
2.3 DISTRIBUCIÓN NORMAL

Una de las distribuciones continuas, y tal vez la más importante, es la distribución normal, la cual ocupa un lugar destacado en la inferencia estadística. Su grafica que recibe el nombre de curva normal es la curva en forma de campana que se muestra en la figura, la cual describe de forma aproximada muchos fenómenos que suceden en la naturaleza tales como la industria y la investigación. Las mediciones físicas en campos tales como experimentos metereológicos, los estudios acerca de las lluvias y las mediciones sobre partes manufacturadas se explican como una distribución normal de manera adecuada. Además, los errores en las mediciones científicas se aproximan hasta límites extremadamente pequeños gracias a la distribución normal, es por esto que también es aplicada para el cálculo de fiabilidades en componentes debido a su gran exactitud. A las anteriores consideraciones podemos agregar otras que nos muestra el porque de la importancia de la distribución normal, se refiere al aspecto inferencial de la estadística y particularmente a lo que tiene que ver con el análisis de datos,

puesto que las distribuciones de muchas estadísticas muestrales tienden a la distribución normal, conforme crece el tamaño de la muestra.

2.3.1 CARACTERISTICAS: Muchas distribuciones empresariales en la economía, en el control de calidad, en las ciencias sociales, no se asemejan a la normal, pero en todo caso la distribución de la media muestral se puede tratar como normal y así se hace por lo general siempre y cuando la muestra sea grande. Esta distribución puede obtenerse al considerar el modelo básico de una variable aleatoria Binomial cuando el número de ensayos se vuelve cada vez más grande.

FIGURA 1



Como ya se señaló, los valores de probabilidad de eventos definidos mediante una variable aleatoria continua se obtiene mediante valores de integrales definidas de una función llamada función de densidad continua (Área bajo la curva). Al ser la

normal una variable continua, debe tener una función de densidad que nos permita obtener valores de probabilidad relacionados con esta variable.

Para el caso de la distribución normal se tiene:

2.3.2 FUNCIÓN DE DENSIDAD NORMAL: La función de densidad de la variable aleatoria normal X , con media μ y varianza σ^2 , es:

$$f_x(x) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi})\sigma} e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2} \quad X \in \mathbb{R} \quad (1)$$

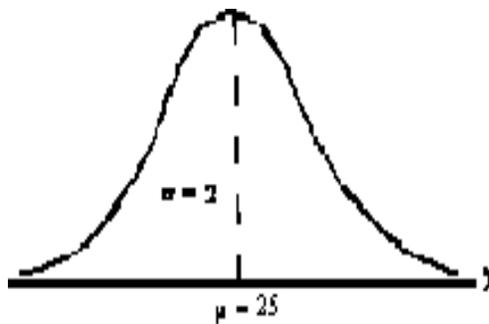
Donde, $\pi = 3.14159\dots$ Y $e = 2.711828\dots$

Cuando nos referimos a una variable aleatoria con distribución normal de media μ y varianza σ^2 , escribimos de manera simbólica $X \sim N(\mu, \sigma^2)$.

Quien primero obtuvo la función de densidad de la normal fue Abraham De Moivre (1667-1754), quien la dedujo en 1733 como límite de la Binomial. Pero no había sido conocida todavía su obra cuando la misma fórmula fue deducida por Karl Friederich Gauss (1777-1855) a propósito de sus trabajos para evaluar los errores en las observaciones astronómicas por ello esta distribución se suele llamar también Distribución Gaussiana o función normal de errores.

La curva normal queda completamente determinada una vez se especifica μ y σ . Por ejemplo, si $\mu = 25$ y $\sigma = 2$, entonces $F_x(X)$ puede calcularse para varios valores de X y dibujarse la curva para obtener una representación como la muestra en la figura 2.

FIGURA 2



2.3.3 LA MEDIA Y LA VARIANZA NORMAL: En general, la función de densidad de la normal dada en (1) depende además de los valores de X , valores de la variable aleatoria, de los números (parámetros) μ y σ . El parámetro μ como se dijo en la definición, corresponde a la medida o valor esperado y σ corresponde a la desviación estándar. Los valores de la media μ y de la desviación estándar σ determinan la situación y forma de la curva normal. Dada σ una variación de μ traslada la curva como un todo a lo largo del eje X . La figura 3 por ejemplo, muestra tres curvas normales que tienen la misma desviación estándar, pero diferentes medias. Por otra parte, las tres curvas normales de la figura 4 tienen la

misma media, pero desviaciones estándares diferentes. La figura 4 muestra que cuanto mayor sea la desviación estándar más aplanada aparece la curva; cuanto menor es la desviación estándar más aguda es la cima. Si la desviación estándar fuera cero, no habría distribución y todas las observaciones tendrían el mismo valor, o sea, la media μ .

FIGURA 3

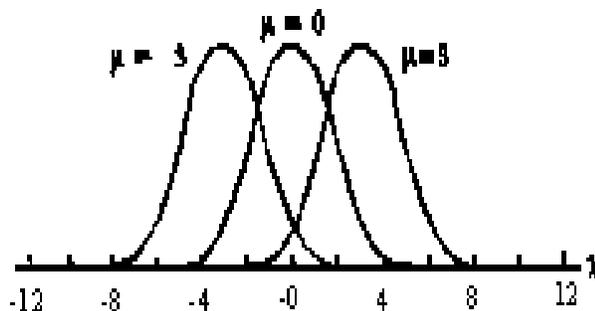
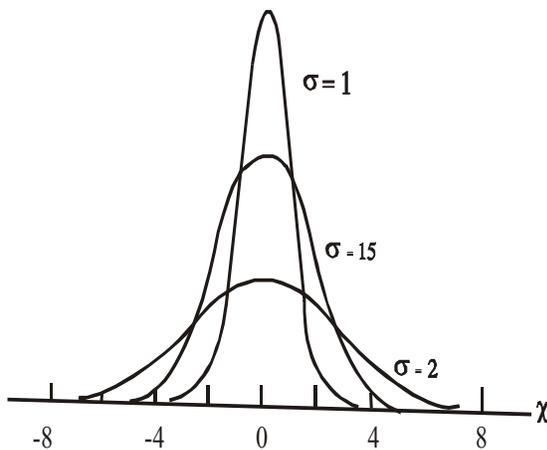


FIGURA 4



2.3.4 PROPIEDADES DE LA CURVA NORMAL: A partir de un análisis de las figuras anteriores, y del examen de la primera y segunda derivada de $F_x(X)$, se encuentran las siguientes propiedades de la curva normal:

1. La moda, que es el punto sobre el eje horizontal donde la curva tiene su máximo, ocurre en $X = \mu$.
2. La curva es simétrica respecto de la vertical $X = \mu$. Así que en $X = \mu$ también se encuentra la mediana.
3. La curva tiene sus puntos de inflexión en $X = \mu \pm \sigma$, es cóncava hacia abajo en el intervalo $(\mu - \sigma, \mu + \sigma)$ y es cóncava hacia arriba en cualquier otro punto.
4. La curva normal se acerca al eje horizontal en forma asintótica en cualquiera de las dos direcciones y se aleja de la media.
5. El área total limitada por la curva y el eje horizontal es igual a 1.

Ejemplo 3

Un fabricante dice que sus bombillas tienen una vida media de 1700 horas y una desviación de 280 horas. Asumiendo las vidas de la bombilla son normalmente distribuidas, calcule la probabilidad que una bombilla dada durará menos de 1000 horas.

Solución:

Primero, el valor de Z correspondiente se obtiene:

$$Z = (1000-1700)/280 = -2.5$$

Cuando el valor más bajo de la función de densidad normal tiende a $-\infty$ se desprecia y se coloca 0.

Así, nosotros tenemos:

$$P(0 < X < 1000) = P(-\infty < X < 1000) = P(-\infty < Z < -2.5) = 0.0062$$

Teóricamente, el dominio de la función de densidad de la normal $F_x(X)$ es infinito y así todo intervalo no vacío a lo largo del eje X tiene una posibilidad no nula. Pero, en la práctica, los valores X de la variable se consideran reducidos en un intervalo finito, ya que es un hecho que el 99.73% de las observaciones quedan incluidas en el intervalo $(\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma)$. Esto es, $P(\mu - 3\sigma < X < \mu + 3\sigma) = 0.9973$. La probabilidad de que X quede a menos de 1 desviación estándar es 68.45%, esto es, $P(\mu - \sigma < X < \mu + \sigma) = 0.6845$; El 95.45% de las observaciones quedan

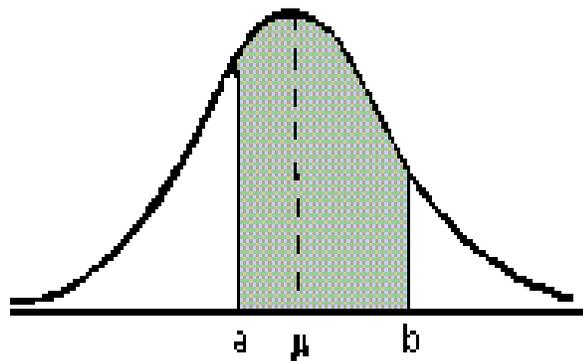
comprendidas en el intervalo $(\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma)$, esto es, $P(\mu - 2\sigma < X < \mu + 2\sigma) = 0.9545$.

La curva de cualquier distribución continua de probabilidades o función de densidad, está construida de manera tal que el área bajo la curva limitada por dos puntos $x_1 = a$ y $x_2 = b$ es igual a la probabilidad de que la variable aleatoria asuma un valor entre $x_1 = a$ y $x_2 = b$. Entonces, para la curva normal. (Ver la figura 5).

$$P(a < X < b) = \int_a^b \frac{1}{(\sqrt{2\pi})\sigma} e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2} dx$$

Está representada por la región sombreada.

FIGURA 5



Ejemplo 4

Cierto tipo de pieza para automóvil tiene un promedio de duración de 3 años, con una desviación estándar de 0.5 años. Suponga que la duración de las piezas son normalmente distribuidas y encuentre la probabilidad de que una pieza determinada tenga un tiempo de duración de mas de 3.5 años.

Primero se realiza un grafico en donde se muestra la distribución establecida para la pieza y el área que se desea calcular. Para encontrar $P(x>3.5)$ es necesario evaluar el área bajo la curva normal a la derecha de 3.5. Esta se obtiene al localizar el área a la derecha del correspondiente valor z. Esto corresponde a

$$Z = \frac{3.5 - 3}{0.5} = 1 \text{ y así tenemos,}$$

$$P(X>3.5) = P(Z>1) = 1 - P(X \leq 1) = 1 - 0.8413 = 0.1587.$$

Una variable aleatoria normal con $\mu = 0$ y $\sigma^2 = 1$ recibe el nombre de variable aleatoria normal estándar y se denota como Z. Si X es una variable aleatoria normal con $E(X) = \mu$ y $V(X) = \sigma^2$, entonces la variable aleatoria:

$$Z = (x - \mu) / \sigma$$

Es una variable aleatoria normal con $E(Z)=0$ y $V(Z)=1$. Esto es, Z es una variable aleatoria normal estándar. La creación de una variable aleatoria con esta transformación se conoce como Estandarización. La variable aleatoria X representa la distancia de X a partir de su media en términos de desviaciones estándar. Esto tiene mucha utilidad en el análisis de probabilidades asociadas con una variable aleatoria normal arbitraria.

Ejemplo 5

Supóngase que las mediciones de corrientes realizadas en una pista de alambre conductor siguen una distribución normal con media de 10 mili amperes y varianza de 4 (mili amperes)². ¿Cuál es la probabilidad de que el valor de una medición sea mayor que 13 mili amperes?

Solución:

Sea X la corriente en mili amperes. La probabilidad pedida puede representarse como $P(X>13)$. Sea $Z = (X-10)/2$. La figura indica la relación que existe entre varios valores de X y los valores transformados de Z . Nótese que $X>13$ corresponde a $Z>1.5$. En consecuencia:

$$P(X>13) = P(Z>1.5) = 1 - 0.93319 = 0.06681$$

En lugar de hacer uso de la figura, la probabilidad puede hallarse mediante una transformación algebraica de la desigualdad $X > 13$, así:

$$P(X > 13) = P((X - 10)/2) = P(Z > 1.5) = 0.06681$$

Se puede ver como el valor de 13 se transforma en 1.5 mediante la estandarización y 1.5 se conoce con frecuencia como el valor de z asociado con una probabilidad. En resumen, el cálculo de probabilidades para variables aleatorias normales viene dado por:

$$P(X \leq x) = P\left(\frac{X - \mu}{\sigma} \leq \frac{x - \mu}{\sigma}\right) = P(Z \leq z)$$

Donde,

Z es una variable aleatoria normal estándar, y $Z = (x - \mu)/\sigma$ es el valor z obtenido a través de la estandarización de X .

2.4 DISTRIBUCIÓN WEIBULL

La distribución Weibull es una de las distribuciones más usadas en la ingeniería de fiabilidad. Esto es una distribución versátil que puede tomar las características de otros tipos de distribuciones, basadas en valor del parámetro de forma.

Desde hace algunos años la distribución Weibull ha sobresalido dentro de la familia de distribuciones para análisis de fallas. Su aplicabilidad a diferentes situaciones de falla fue presentada por Weibull en 1951. Se utilizó para describir fallas en rodamientos (Lieblein y Zelen, 1956).

Aunque los test de duración de vida de componentes, durante el período de vida útil se basan generalmente en el modelo exponencial, ya hemos indicado que la tasa de fallos de una componente puede no ser constante en el periodo bajo investigación. En algunas ocasiones, el período de fallo inicial puede ser tan grande, que el uso más importante de la componente se presenta durante este período y, en otras ocasiones, el propósito principal de un test de duración de vida puede ser el de determinar el tiempo de los fallos por uso, en lugar de el de fallos casuales. En tales casos, el modelo exponencial no se aplica en general y es necesario sustituirlo por una hipótesis más general que la de la constancia de la tasa

de fallos. La distribución Weibull describe adecuadamente los tiempos de fallo de las componentes cuando su tasa de fallo aumenta o disminuye con el tiempo.

Considerando que la distribución exponencial está limitada, debido a que hace la suposición de una tasa de falla o función de riesgo constante, la distribución de Weibull puede ser definida para incluir una tasa de falla o tasa de riesgo creciente o decreciente. Ya que la mayor cantidad de fallas en campo, especialmente las partes mecánicas, muestran un aumento en la tasa de falla (debido a desgaste o deterioro del material), la distribución de Weibull es muy útil en describir patrones de falla de este tipo.

2.4.1 FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD DE WEIBULL:

- **La Distribución Weibull de Tres parámetros:** La función de densidad de Weibull de tres parámetros esta dada por:

$$f(T) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{T - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{T-\gamma}{\eta} \right)^{\beta}}$$

Donde,

$$f(T) \geq 0, T \geq 0 \text{ or } \gamma, \beta > 0, \eta > 0, -\infty < \gamma < \infty$$

Y,

η = Parámetro escalar.

β = Parámetro de forma.

γ = Parámetro de posición.

- **La Distribución Weibull de Dos parámetros:** La función de densidad de Weibull de dos parámetros es obtenido poniéndose $\gamma = 0$ y está dada por:

$$f(T) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{T}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{T}{\eta} \right)^\beta} \quad (2)$$

- **La Distribución Weibull de un parámetro:** La función de densidad de Weibull de un parámetro es obtenido poniéndose $\gamma = 0$ y, asumiendo que $\beta = C = \text{constante}$

$$f(T) = \frac{C}{\eta} \left(\frac{T}{\eta} \right)^{C-1} e^{-\left(\frac{T}{\eta} \right)^C} \quad (3)$$

Donde el único parámetro desconocido es el parámetro de escala. Note que en la formulación de Weibull de un parámetro asumimos que el parámetro de forma es conocido a priori, de la experiencia pasada sobre productos idénticos o similares.

La ventaja de hacer este, es en aquellos juegos de datos con pocos o ningunos fracasos para ser analizados.

2.4.2 Propiedades Estadísticas de la Distribución Weibull

- **La Media o MTTF:** La Media, (también llamó MTTF o MTBF por algunos autores) de la función de densidad de Weibull está dada por:

$$\bar{T} = \gamma + \eta \cdot \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right) \quad (4)$$

Donde $\Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)$ es la función gama evaluada en el valor de $\frac{1}{\beta} + 1$.

La función gama es definida como,

$$\Gamma(n) = \int_0^{\infty} e^{-x} x^{n-1} dx$$

Esta función es proporcionada dentro de Weibull para calcular los valores $\Gamma(n)$ en cualquier valor de n. Para el caso de dos parámetros, Eqn. (4) puede ser reducido a,

$$\bar{T} = \eta \cdot \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)$$

Note que algunos practicantes erróneamente asumen que es igual al MTBF o MTTF. Este es sólo verdadero para el caso de $\beta = 1$ desde entonces

$$\Gamma\left(\frac{1}{1} + 1\right) = \Gamma(2) = 1.$$

➤ **La Mediana:** La mediana, es dada por:

$$\check{T} = \gamma + \eta (\ln 2)^{\frac{1}{\beta}} \quad (5)$$

➤ **La Moda:** La moda \tilde{T} , esta dada por:

$$\tilde{T} = \gamma + \eta \left(1 - \frac{1}{\beta}\right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (6)$$

- **La desviación estándar:** La desviación estándar σ_T , esta dada por:

$$\sigma_T = \eta \cdot \sqrt{\Gamma\left(\frac{2}{\beta} + 1\right) - \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)^2} \quad (7)$$

- **La Función de Fiabilidad Weibull:** A veces es difícil estimar los parámetros forma y posición de la distribución de Weibull. Aunque existen métodos analíticos para estimar estos parámetros, implican la solución de sistemas de ecuaciones trascendentes. Existe un método más rápido y más utilizado basado en una técnica grafica partiendo de la función de densidad y de fiabilidad.

Suponga que T es el tiempo de espera entre la descompostura sucesivas de una maquina. Entonces T es una variable aleatoria continua y es aceptable suponer que tiene la distribución Weibull. La ecuación para la función de densidad Weibull acumulativa de tres parámetros, cdf, es dada por:

$$F(T) = 1 - e^{-\left(\frac{T-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (8)$$

T podría ser la duración de algún componente, como una válvula o un motor y podría suponerse que T sigue la distribución Weibull. Para determinar si esta suposición es la adecuada, es necesario considerar la función de la razón de fallar $R(t)$ del componente que se está estudiando. El valor $R(t)$, en el tiempo t, es la razón de falla instantánea de los componentes que aun existen en el periodo t, y los componentes que presentan desgaste deben tener funciones de razón de fallas que aumenten conforme envejece el componente. La función de razón de falla se determina por medio de la función de distribución de probabilidad, la cual se emplea como un modelo para la duración de un componente. La función de fiabilidad para la distribución Weibull de tres parámetros es dada por,

$$R(T) = e^{-\left(\frac{T-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (9)$$

➤ **La Vida Weibull Confiable:** La vida confiable, de una unidad para una fiabilidad especificada, comenzando la misión en el cero de edad, es dada:

$$T_R = \gamma + \eta(-\ln[R(T_R)])^{\frac{1}{\beta}} \quad (10)$$

Esta es la vida para la cual la unidad funcionará con éxito con una fiabilidad de $R(T_R)$ si $R(T_R) = 0.50$ entonces $T_R = \tilde{T}$, la vida mediana, o la vida por la cual la mitad de las unidades sobrevivirá.

- **La Función de Tasa de Fallos Weibull:** La función de tasa de fallos Weibull $\lambda(T)$, es definida por:

$$\lambda(T) = \frac{f(T)}{R(T)} = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{T - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \quad (11)$$

2.4.3 Características de la Distribución Weibull: Como fue mencionado antes, la distribución Weibull es extensamente usada en fiabilidad y análisis de datos de vida debido a su carácter polifacético. Según los valores de los parámetros, la distribución Weibull puede ser usada para modelar una variedad de comportamientos de vida. Examinaremos ahora como los valores del parámetro de forma β , y el parámetro de escala η , afectan tales características de distribución como la forma de la curva de pdf, la fiabilidad y la tasa de fallos.

Note que en el resto de esta sección asumiremos la mayor parte de forma general de la distribución Weibull, es decir la forma de tres parámetros. Las substituciones apropiadas para obtener las otras formas, como la forma de dos parámetros donde $\gamma = 0$, o la forma de un parámetro donde $\beta = C = \text{constante}$, pueden ser fácilmente hechas.

- **Efectos Característicos del Parámetro de Forma, β :** Los valores diferentes del parámetro de forma pueden haber marcado efectos sobre el

comportamiento de la distribución. De hecho, algunos valores del parámetro de forma harán que las ecuaciones de distribución reduzcan a aquellos de otras distribuciones. Por ejemplo, cuando $\beta = 1$, el pdf de Weibull de tres parámetros se asemeja a la distribución exponencial de dos parámetros o,

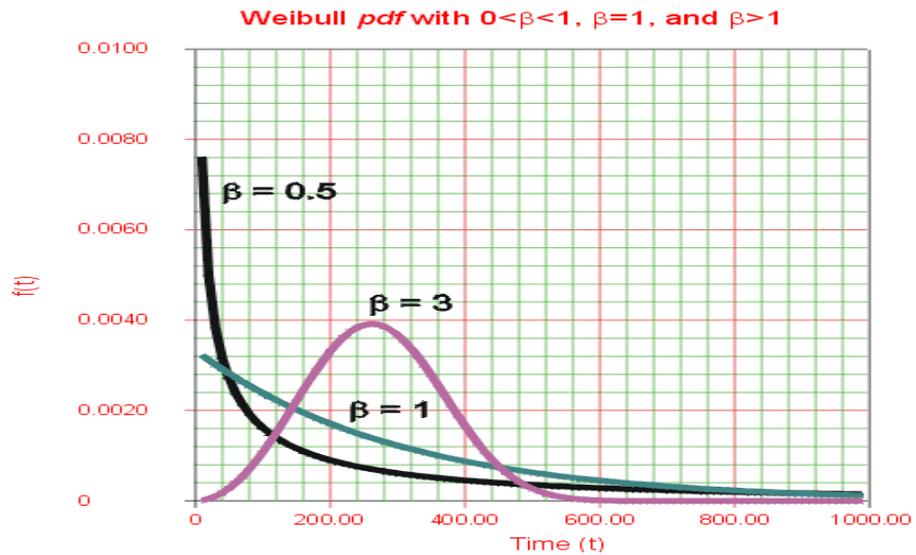
$$f(T) = \frac{1}{\eta} e^{-\frac{T-\gamma}{\eta}} \quad (12)$$

Donde $\frac{1}{\eta} = \lambda$ = rata de falla.

El parámetro β es un número puro, es decir es sin dimensiones.

- **Los Efectos de β sobre la función de densidad:** La figura debajo muestra el efecto de valores diferentes del parámetro de forma β , sobre la forma de la función de densidad. Uno puede ver que la forma de la función de densidad puede tomar una variedad de formas basadas en el valor de β .

FIGURA 6. EFECTO DE PARÁMETRO DE FORMA WEIBULL SOBRE LA DENSIDAD



El efecto del parámetro de forma de Weibull sobre la Función de densidad.

Para $0 < \beta \leq 1$:

- Como $T \rightarrow 0$ (o γ), $f(T) \rightarrow \infty$.
- Como $T \rightarrow \infty$, $f(T) \rightarrow 0$.
- $F(T)$ disminuye y es convexo como T , aumenta más allá del valor de γ .
- La moda es inexistente.

Para $\beta > 1$, esta es similar a la distribución exponencial, como un caso especial,

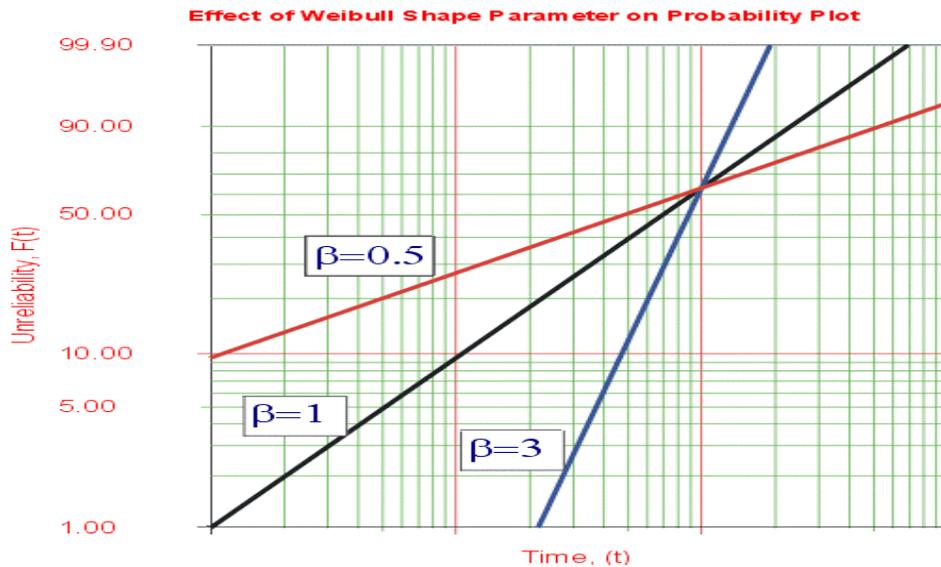
o

- $f(T) = 0$ en $T = 0$ (o γ).
- $f(T)$ aumenta como $T \rightarrow \tilde{T}$ (la moda) y disminuye a partir de entonces.
- Para $\beta < 2.6$ la función de densidad de Weibull es positivamente sesgado (tiene una cola derecha),
- Para $2.6 < \beta < 3.7$ su coeficiente de la oblicuidad se acerca al cero (ninguna cola). Por consiguiente, esto puede acercarse sobre la función de densidad normal.
- Para $\beta > 3.7$ es negativamente sesgado (cola izquierda).

Por consiguiente, el valor de β se relaciona con el comportamiento físico de los artículos modelados se hace más aparente cuando observamos como sus diferentes valores afectan funciones de tasa de fallos y la fiabilidad. Nótese esto para $\beta = 0.999$, $f(0) = \infty$, pero para $\beta = 1.001$, $f(0) = 0$, esto muestra un cambio muy abrupto en la forma de la curva cuando se acerca a uno.

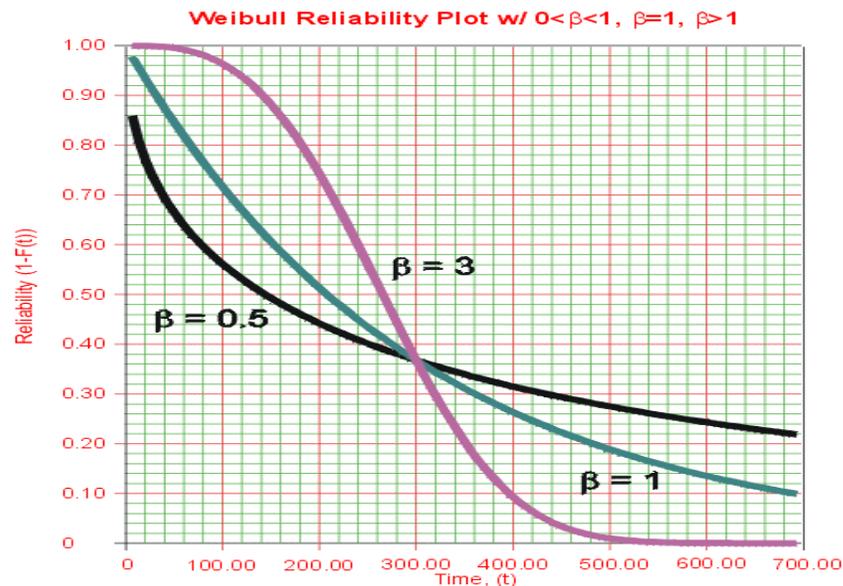
➤ EL EFECTO DE β SOBRE EL CDF Y FUNCIÓN DE FIABILIDAD

FIGURA 7: EFECTO DE β SOBRE EL CDF SOBRE UNA PROBABILIDAD WEIBULL TRAZANDO PAPEL CON UN VALOR FIJO DE τ .



La figura 8 muestra el efecto del valor de β sobre el cdf. Es fácil ver por qué este parámetro es a veces referido como la cuesta. Note que los modelos representados por las tres líneas todos tienen el mismo valor de τ . La figura 9 muestra los efectos de estos valores variados de β sobre el complot de fiabilidad, que es un análogo lineal del complot de probabilidad.

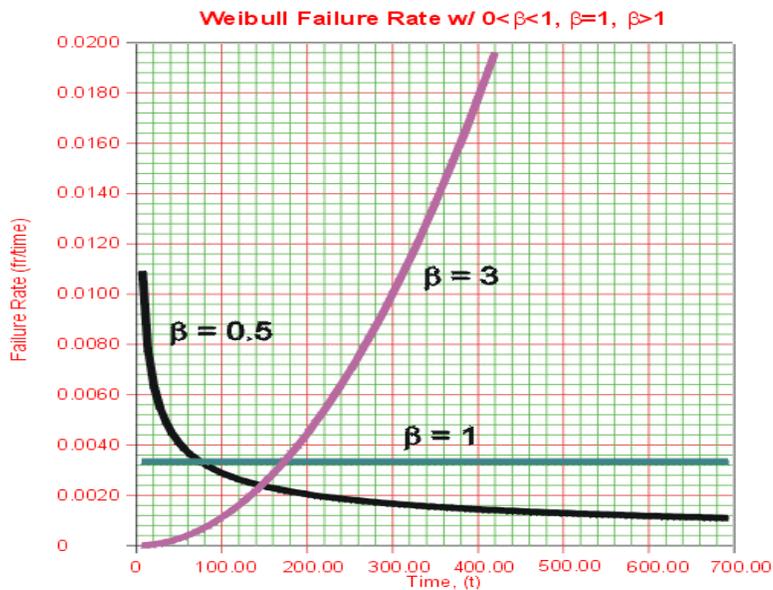
FIGURA 8. EL EFECTO DE VALORES DE β SOBRE EL COMPLIT DE FIABILIDAD WEIBULL.



- $R(T)$ disminuye bruscamente para $0 < \beta < 1$, y es convexo.
 - Para $\beta = 1$, $R(T)$ disminuciones, pero menos bruscamente que para $0 < \beta < 1$, y es convexa.
 - Para $\beta > 1$, $R(T)$ disminuye como T aumenta. Cuando la curva pasa por un punto de inflexión se disminuye bruscamente.
- **El Efecto de β sobre la Función de Tasa de Fallos Weibull:** El valor de β tiene un efecto marcado sobre la tasa de fallos de la distribución Weibull y las inferencias pueden ser dibujadas sobre las características de fracaso de una

población solamente considerando si el valor de β es menos que, igual a, o mayor que uno.

FIGURA 9. EL EFECTO SOBRE LA FUNCIÓN DE TASA DE FALLOS WEIBULL.



Como indicado por la Figura 10, las poblaciones con $\beta < 1$ exponen una tasa de fallos que se disminuye con el tiempo, las poblaciones con $\beta = 1$ tienen una tasa de fallos constante (consecuente con la distribución exponencial), y las poblaciones con $\beta > 1$ tienen una tasa de fallos que aumenta con el tiempo. Tres etapas de vida de la curva de bañera pueden ser modeladas con la distribución Weibull y valores variantes de β . La tasa de fallos Weibull para $0 < \beta < 1$ es ilimitada en $T = 0$ (o γ).

A tasa de fallos, $\lambda(T)$, se disminuye a partir de entonces y es convexa, acercándose al valor de cero como $T \rightarrow \infty$ o $\lambda(\infty) = 0$. Este comportamiento lo

hace conveniente para representar la tasa de fallos de unidades que exponen fracasos de tipo temprano, para los cuales la tasa de fallos se disminuye con la edad. Encontrando tal comportamiento en un producto fabricado, puede ser indicativo de problemas en el proceso de producción, quemadura inadecuada - en, partes de calidad inferior y componentes, o problemas con embalaje y embarque.

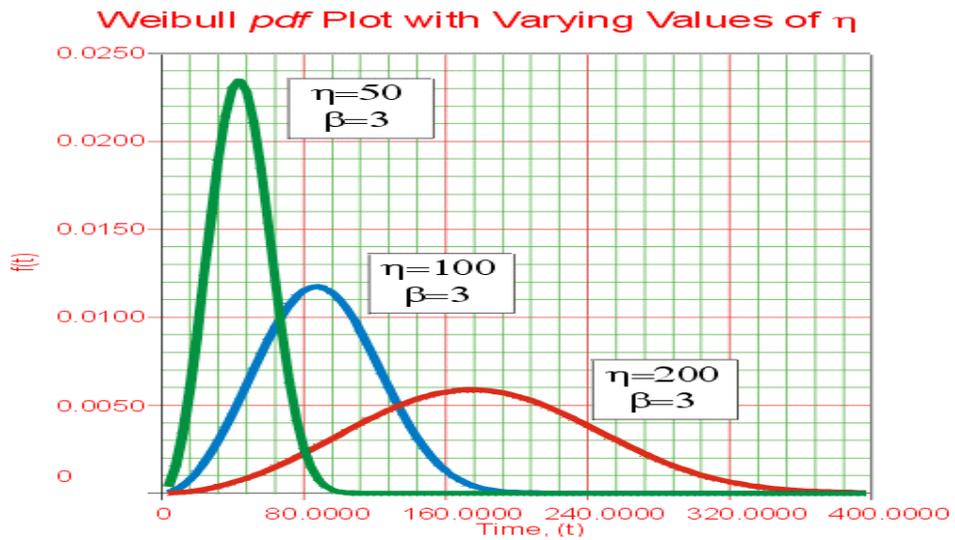
Para $\beta = 1$, $\lambda(T)$ cede un valor constante de $\frac{1}{\eta}$, o,

$$\lambda(T) = \lambda = \frac{1}{\eta}$$

Este lo hace conveniente para representar la tasa de fallos de fracasos de tipo de probabilidad y la tasa de fallos de unidades en un período de tiempo.

➤ EFECTOS CARACTERÍSTICOS DEL PARÁMETRO DE ESCALA, η

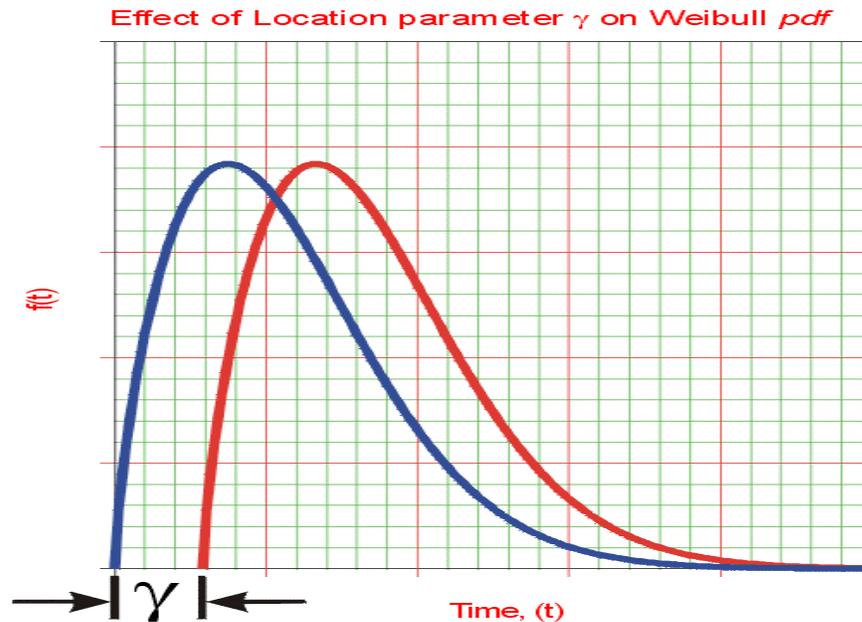
FIGURA 10. LOS EFECTOS DE η SOBRE LA FUNCIÓN DE DENSIDAD DE WEIBULL PARA UN COMÚN β .



Un cambio del parámetro de escala η tiene el mismo efecto sobre la distribución que un cambio de la escala de la abscisa. El aumento del valor de η sosteniendo β constante tiene el efecto de estirar la función de densidad. Ya que el área bajo una curva de pdf es un valor constante de uno, "el pico" de la curva de la función de densidad se disminuirá también con el aumento de η , como indicado en la Figura 10.

- Si η es aumentado, mientras β y γ son constantes, la distribución es estirada hacia la derecha y disminuye su altura, manteniendo su forma y posición.
 - Si η disminuye, mientras β y γ son constantes, la distribución es empujada en hacia la izquierda (es decir hacia su principio o hacia 0), y aumenta su altura.
 - η tiene las mismas unidades que T , como horas, millas, ciclos, impulsiones, etc.
- **Efectos Característicos del Parámetro de Posición γ :** El parámetro de posición γ , como el nombre implica, localiza la distribución a lo largo de la abscisa. El cambio del valor de γ tiene el efecto "de deslizar" la distribución y su función hacia la derecha (si $\gamma > 0$) o a la izquierda (si $\gamma < 0$).

FIGURA 11. EL EFECTO DE UN PARÁMETRO DE POSICIÓN POSITIVO γ , SOBRE LA POSICIÓN DE LA FUNCIÓN DE DENSIDAD DE WEIBULL



- Cuando $\gamma = 0$ la distribución comienza en $T = 0$, o en el origen.
- Si $\gamma > 0$ la distribución comienza en la posición γ a la derecha del origen.
- Si $\gamma < 0$ la distribución comienza en la posición γ a la izquierda del origen.
- γ proporciona una estimación del tiempo a fracaso más temprano de tales unidades.
- El parámetro γ puede asumir todos los valores y proporciona una estimación del tiempo más temprano que un fracaso puede ser observado. Una negativa γ puede indicar que los fracasos han ocurrido antes del principio de la prueba, a saber durante la producción, en el

almacenaje, en el tránsito, durante la comprobación antes del principio de una misión, o antes del uso actual.

- γ tiene las mismas unidades que T , como horas, millas, ciclos, impulsiones, etc.

2.4.4 Valoración del Parámetro Weibull: Las estimaciones de los parámetros de la distribución Weibull pueden ser encontradas gráficamente trazando el papel, o analíticamente, usando regresión lineal.

El tercer parámetro de la distribución Weibull es utilizado cuando los datos no se caen sobre la línea recta, pero se caen sobre un cóncavo. Las declaraciones siguientes pueden ser hechas en cuanto al valor de γ :

Caso 1: Si la curva para MR es $0 < \gamma < \frac{T}{T_1}$ o γ tiene un valor positivo y es cóncava hacia abajo

Caso 2: Si es negativa γ la curva será cóncava.

- **Regresión Lineal de Weibull sobre Y:** La realización de la regresión de fila sobre Y requiere que una línea recta matemáticamente encaje a un juego de datos, tal que la suma de los cuadrados de las desviaciones verticales de los puntos a la línea es minimizada.

El primer paso debe traer nuestra función en una forma lineal. Para la distribución Weibull de dos parámetros, el pdf (función de densidad acumulativa) es,

$$F(T) = 1 - e^{-\left(\frac{T}{\eta}\right)^\beta} \quad (13)$$

La toma del logaritmo natural de ambos lados de las producciones de ecuación,

$$\begin{aligned} \ln [1 - F(T)] &= -\left(\frac{T}{\eta}\right)^\beta \\ \ln \{-\ln [1 - F(T)]\} &= \beta \ln \left(\frac{T}{\eta}\right) \\ \ln \{-\ln [1 - F(T)]\} &= -\beta \ln(\eta) + \beta \ln(T) \end{aligned} \quad (14)$$

Ahora deje,

$$y = \ln \{-\ln [1 - F(T)]\} \quad (15)$$

$$a = -\beta \ln(\eta) \quad (16)$$

Y,

$$b = \beta \quad (17)$$

Que causa la ecuación lineal de,

$$y = a + bx$$

$$a = \frac{\sum x^2 \sum y - \sum x \sum xy}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad \text{O} \quad \hat{a} = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N} - \hat{b} \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} = \bar{y} - \hat{b} \bar{x} \quad (18)$$

Y,

$$b = \beta = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad \text{O} \quad \hat{b} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i - \frac{\sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i}{N}}{\sum_{i=1}^N x_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^N x_i)^2}{N}} \quad (19)$$

$$\eta = e^{-\frac{a}{\beta}}$$

En este caso la ecuación para y_i y x_i son:

$$y_i = \ln \{ -\ln[1 - F(T_i)] \}$$

Y

$$x_i = \ln(T_i)$$

Los $F(T_i)$ son estimados de las filas medianas. Una vez \hat{a} y \hat{b} son obtenidos, entonces $\hat{\beta}$ y $\hat{\eta}$ puede ser fácilmente obtenido de Eqns. (16) (y 17).

Ejemplo 1

Asuma que seis unidades idénticas son la fiabilidad probada en la misma aplicación y niveles de tensión de operación. Todas estas unidades fallan durante la prueba después de hacer funcionado el número siguiente de horas T_i 93, 34, 16, 120, 53 y 75. Estime los valores de los parámetros para una distribución Weibull de dos parámetros y determine la fiabilidad de las unidades a las 15 horas en una regresión de Y.

Solución

Los pasos para determinar los parámetros del Weibull son la representación de los datos, usando la planificación de probabilidad, son perfilados en las instrucciones siguientes:

1. Alinee los tiempos a fracaso en orden ascendente así:

| Tiempo a Fallar (horas) | Orden de numero de fallas |
|-------------------------|---------------------------|
| 16 | 1 |
| 34 | 2 |
| 53 | 3 |
| 75 | 4 |
| 93 | 5 |
| 120 | 6 |

Se Obtiene la mediana trazando posiciones. Las posiciones de fila medianas son usadas en vez de otros métodos de clasificación porque las filas medianas están en un nivel de confianza específico (el 50 %). Las filas medianas pueden ser encontradas tabuladas en muchos libros de fiabilidad. Ellos pueden ser también estimados usando la ecuación siguiente,

$$MR\% \sim \frac{i - 0.3}{N + 0.4} \cdot 100$$

Donde i es el número de orden de fracaso y N es el tamaño total de la muestra. Los tiempos a fracaso, con sus filas correspondientes medianas, son las siguientes:

| Tiempo a Fallar (horas) | F (T) |
|-------------------------|-------|
| 16 | 10.91 |
| 34 | 26.44 |
| 53 | 42.14 |
| 75 | 57.86 |
| 93 | 73.56 |
| 120 | 89.1 |

| TIEMPO A FALLAR | F(T) | Y | X | XY | X2 | Y2 |
|------------------|-------|---------|-------|-----------|---------|------------|
| 16 | 10.91 | -2,15 | 2,77 | -5,9555 | 7,6729 | 4,6225 |
| 34 | 26.44 | -1,18 | 3,52 | -4,1536 | 12,3904 | 1,3924 |
| 53 | 42.14 | -0,6 | 3,97 | -2,382 | 15,7609 | 0,36 |
| 75 | 57.86 | -0,1459 | 4,31 | -0,628829 | 18,5761 | 0,02128681 |
| 93 | 73.56 | 0,285 | 4,53 | 1,29105 | 20,5209 | 0,081225 |
| 120 | 89.1 | 0,7958 | 4,78 | 3,803924 | 22,8484 | 0,63329764 |
| Sumatoria | | -2,9951 | 23,88 | -8,024955 | 97,7696 | 7,11070945 |

$$a = \frac{\sum x^2 \sum y - \sum x \sum xy}{n \sum x^2 - (\sum x)^2}$$

$$a = \frac{(97.76 * -2.99) - (23.88 * -8.0249)}{6(97.7696 - (23.88^2))} = -6.15$$

$$b = \beta = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2}$$

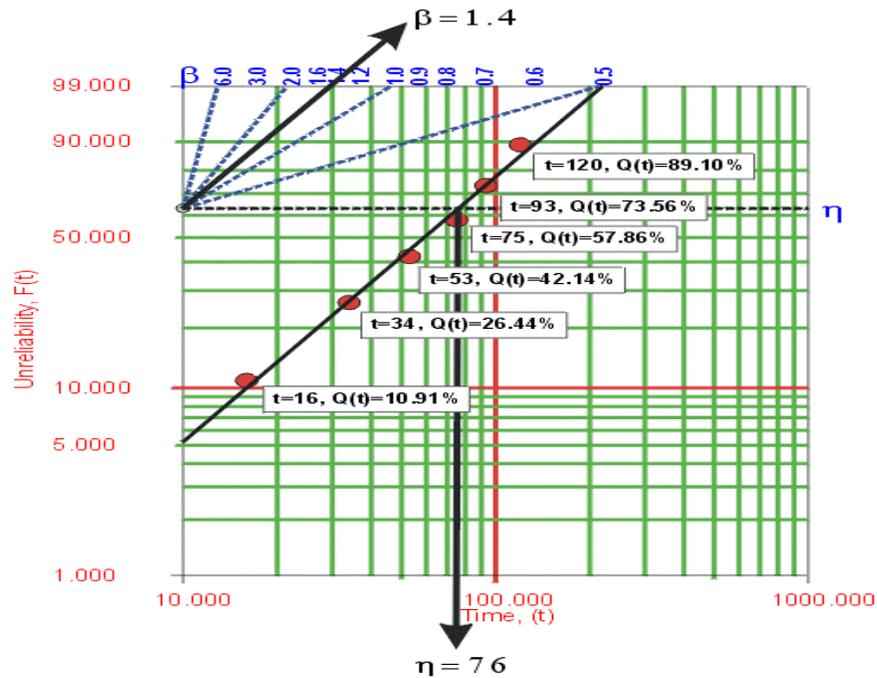
$$b = \frac{6(-8.0249 - (23.88 * -2.99))}{6(97.7696 - (23.88^2))} = 1.42$$

$$Y = -6.15 + 1.42x$$

Dibuje la línea recta mejor posible por estos puntos, como mostrado debajo, luego obtenga la cuesta de esta línea dibujando una línea, paralela al que solamente obtenido, por el indicador de la cuesta.

$$\eta = e^{\frac{-6.15}{-1.42}} = 76$$

FIGURA 12. COMPLIT DE PROBABILIDAD DE DATOS EN PROBABILIDAD TRAZANDO



$$R(t = 15) = e^{-\left(\frac{15}{\eta}\right)^\beta} = e^{-\left(\frac{15}{76}\right)^{1.4}} = 90.2\%$$

- **El Coeficiente de Correlación:** El coeficiente de correlación es definido como sigue,

$$\rho = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \quad (20)$$

Donde, σ_{xy} = covarianza de X y Y, σ_x = desviación estándar de x, y σ_y = desviación estándar de y.

El perito ρ de es el coeficiente de correlación de la muestra $\hat{\rho}$, dado por,

$$\hat{\rho} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}}$$

El coeficiente de correlación del ejemplo anterior puede ser estimado usando Eqn. (20),

$$\hat{\rho} = 0.9956$$

- **Regresión Lineal de Weibull sobre X:** La realización de una regresión de fila sobre X es similar al proceso para la regresión de fila sobre Y, con la

diferencia que es que las desviaciones horizontales de los puntos a la línea son minimizadas, más bien que el vertical.

Otra vez la primera tarea es traer nuestra función de cdf, Eqn. (8), en una forma lineal. Este paso es exactamente el mismo como en la regresión sobre el análisis Y y Eqns. (9), (10), (11), (y 12) se aplican en este caso también. La derivación del análisis anterior comienza sobre la menor, donde en este caso tratamos x como la variable dependiente y y como la variable independiente.

La línea recta que encaja lo mejor a los datos, para la regresión sobre X es la línea recta,

$$x = \hat{a} + \hat{b}y \quad (21)$$

Las ecuaciones correspondientes para \hat{a} y \hat{b} son,

$$\hat{a} = \bar{x} - \hat{b}\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} - \hat{b} \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N}$$

Y

$$\hat{b} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i - \frac{\sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i}{N}}{\sum_{i=1}^N y_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^N y_i\right)^2}{N}}$$

Donde,

$$y_i = \ln \{ -\ln[1 - F(T_i)] \}$$

Y,

$$x_i = \ln(T_i)$$

Y los $F(T_i)$ valores son otra vez obtenidos de las filas medianas. Una vez \hat{a} y \hat{b} son obtenidos, solucionan Eqn. (16) para y , que corresponde a,

$$y = -\frac{\hat{a}}{\hat{b}} + \frac{1}{\hat{b}}x$$

La solución para los parámetros de Eqns. (16), (y 17) nos ponemos,

$$a = -\frac{\hat{a}}{\hat{b}} = -\beta \ln(\eta) \quad (22)$$

Y

$$b = \frac{1}{\hat{b}} = \beta \quad (23)$$

El coeficiente de correlación es evaluado como antes de usar Eqn. (20).

Ejemplo 2

Repita el Ejemplo 1 regresión de fila de utilización sobre X.

Solución con Ejemplo 2

La tabla 1, construido en el Ejemplo 1, puede ser también aplicada a este ejemplo. Usando los valores de esta tabla nos ponemos,

$$\hat{b} = \frac{\sum_{i=1}^6 (\ln T_i) y_i - \frac{\sum_{i=1}^6 \ln T_i \sum_{i=1}^6 y_i}{6}}{\sum_{i=1}^6 y_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^6 y_i\right)^2}{6}}$$

$$\hat{b} = \frac{-8.0699 - (23.9068)(-3.0070)/6}{7.1502 - (-3.0070)^2/6}$$

O

$$\hat{b} = 0.6931$$

Y

$$\hat{a} = \bar{x} - \hat{b}\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^6 \ln T_i}{6} - \hat{b} \frac{\sum_{i=1}^6 y_i}{6}$$

O,

$$\hat{a} = \frac{23.9068}{6} - (0.6931) \frac{(-3.0070)}{6} = 4.3318$$

Por lo tanto, de Eqn. (23),

$$\hat{\beta} = \frac{1}{\hat{b}} = \frac{1}{0.6931} = 1.4428$$

Y de Eqn. (22),

$$\hat{\eta} = e^{\frac{\hat{a}}{\hat{b}} \cdot \frac{1}{\hat{\beta}}} = e^{\frac{4.3318}{0.6931} \cdot \frac{1}{1.4428}} = 76.0811 \text{ hr.}$$

El coeficiente de correlación es encontrado usando Eqn. (20):

$$\hat{\rho} = 0.9956$$

♦ **Regresión Weibull de Tres parámetros:** El objetivo en este caso es encajar una curva, en vez de una línea, por los puntos de datos, usando la regresión no lineal. El método Gauss-Newton puede ser usado para solucionar para los parámetros β , η y γ , realizando una extensión de serie de Taylor sobre $F(T_i; \beta, \eta, \gamma)$. Entonces el modelo no lineal es acercado con términos lineales y ordinario la menor parte de cuadrados son empleados para estimar los parámetros. Este procedimiento es iterado hasta que una solución satisfactoria sea alcanzada.

Para desarrollar ejercicios de este tipo el parámetro de posición toma un valor distinto de cero y es reemplazado en la formula de fiabilidad para realizar el

calculo. El procedimiento en el cálculo de los demás parámetros sigue siendo el mismo.

Ejemplo 1: Tomamos el ejemplo anterior y los valores de los parámetros escalares y de forma donde $\beta=1.42$ y $\eta=76$, entonces aplicamos la función de fiabilidad de Weibull con tres parámetros suponiendo que este ítem empezó a funcionar a los 5 días de haber sido comprado.

$$R(t = 55h) = e^{-\left(\frac{55-40}{76}\right)^{1.42}} = 0.9049$$

La tasa de fallas es del 90.49%. Entonces la fiabilidad del ítem es:

$$F = 1 - 0.9049 = 0.0951$$

3. EJERCICIOS PARA RESOLVER

1. El tiempo no disponible de una maquina en una industria manufacturera en un mes tiene una distribución normal con media 100 horas y desviación estándar de 20 horas.
 - a. ¿Cuál es la probabilidad de que el tiempo no disponible del siguiente mes se encuentre entre 50 y 80 horas?
 - b. ¿Cuánto tiempo no disponible deberá planearse para que la probabilidad de excederlo sea sólo del 10%?

2. La duración de un láser semiconductor a potencia constante tiene una distribución normal con media 7000 horas y desviación estándar de 600 horas.
 - a. ¿Cuál es la probabilidad de que el láser falle antes de 5000 horas?
 - b. ¿Cuál es la duración en horas excedidas por el 95% de los láseres?
 - c. Si se hace estudio de tres láseres en un producto y se supone que fallan de manera independiente, ¿Cuál es la probabilidad de que los tres sigan funcionando depuse de 7000 horas?

3. La resistencia a la compresión de una serie de muestras de cemento puede modelarse con una distribución normal con media 6000 kilogramos por

centímetro cuadrado, y una desviación estándar de 100 kilogramos por centímetro cuadrado.

- a. ¿Cuál es la probabilidad de que la resistencia de una muestra sea menos que 6250 Kg. /cm²?
 - b. ¿Cuál es la probabilidad de que la resistencia de una muestra se encuentre entre 5800 y 5900 Kg. /cm²?
 - c. ¿Cuál es el valor de la resistencia que excede el 95% de las muestras?
4. Un artículo electrónico contiene 40 circuitos integrados. La probabilidad de que cualquier circuito electrónico falle es 0.01, y los circuitos integrados son independientes. El artículo trabaja sólo si ninguno de sus circuitos falla. ¿Cuál es la probabilidad de que el artículo trabaje?
5. La variable aleatoria X tiene una distribución Binomial con $n=10$ y $p=0.01$. Calcule las probabilidades siguientes:
- a. $P(X=5)$
 - b. $P(X \leq 2)$
 - c. $P(X \geq 9)$
 - d. $P(3 \leq X < 5)$

6. Sea X el número de bits recibidos de manera incorrecta en un canal de comunicación digital, y suponga que X es una variable aleatoria Binomial con $p=0.001$. Si se transmiten 1000 bits, calcule lo siguiente:
- $P(X=1)$
 - $P(X \geq 1)$
 - $P(X \leq 2)$
7. El número de defectos superficiales de los paneles de plástico utilizados en los interiores de automóviles tiene una distribución Poisson con una media 0.5 defectos por pie cuadrado de panel. Suponga que el interior de un automóvil contiene 10 pies cuadrados de este material.
- ¿Cuál es la probabilidad de que no haya defectos superficiales en los interiores de un automóvil?
 - Si se venden 10 automóviles a una compañía que los renta ¿Cuál es la probabilidad de que los interiores de cualquiera de ellos no tengan defectos superficiales?
 - Si se venden 10 automóviles a una compañía que los renta, ¿Cuál es la probabilidad de que, como máximo, uno de ellos tenga defectos superficiales en sus interiores?

8. El número de fallas de un instrumento de prueba debido a las partículas contaminantes de un producto, es una variable aleatoria Poisson con media 0.02 fallas por hora.
- ¿Cuál es la probabilidad de que el instrumento no falle en una jornada de ocho horas?
 - ¿Cuál es la probabilidad de que se presente al menos una falla en un periodo de 24 horas?
9. Suponga que X tiene una distribución Poisson con media 4. Calcule las probabilidades siguientes:
- $P(X=0)$
 - $P(X \leq 2)$
 - $P(X=4)$
 - $P(X=8)$
10. Diez especímenes de fatiga se pusieron en prueba. Ellos eran todos probados al fracaso. Los tiempos de fracasos en horas eran como sigue: 150, 85, 250, 240, 135, 200, 240, 150, 200, 190. Ordene los datos y anote esos tiempos de fracaso idénticos asignando números del orden secuenciales. Busque la posición de las medianas.

10.1 Como es la curva según el parámetro β y qué clase de modo de falla es esta?

10.2 Qué porcentaje de las muestras se espera que falle a las 200 horas?

10.3 Cual es la fiabilidad a las 300 horas?

11. La Distribución Weibull con suspensiones. Ha habido fracasos en ocho partes en servicio. Los tiempos en horas de las partes son los siguientes:

| | | | | | | | | |
|--------|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| Serial | 831 | 832 | 833 | 834 | 835 | 836 | 837 | 838 |
| Time | 9 | 6 | 14.6 | 1.1 | 20 | 7 | 65 | 8 |

11.1 Cuanto es β y η ?

11.2 Qué clase de modo de falla indica este β ?

12. Entendamos bien Weibull.

12.1 Que indica el parámetro de posición γ ?

12.2 Que diferencia tiene este método con los demás?

12.3 Que es el parámetro de la curva β . ¿Qué otro nombre del recibe?

12.4 Que otro nombre se usa para una distribución del weibull con $\beta = 1$, y $\eta =$ MTTF?

12.5 Cuando se debe aplicar el método análisis Weibull?

12.6 Que indica el parámetro escalar η ?

13. Con los siguientes datos obtenidos de pruebas en 5 fresadoras puestas a funcionar dos semanas después de haber sido instaladas, calcule:

Tiempos de falla: 1500, 2250, 4000, 4300, 7000

- a. Posiciones de las medianas.
- b. Parámetro de forma, escalar y de posición a través de Regresión lineal en Y.
- c. Parámetro de forma, escalar y de posición a través de Regresión lineal en X.
- d. Función de fiabilidad para un tiempo t.
- e. Calcule la fiabilidad al cabo de 3500 horas.

14. Con los siguientes datos calcule:

$$\beta=3.4$$

$$\eta=204 \text{ h}$$

- a. El tiempo en que se tiene una fiabilidad del 2%.
- b. El tiempo en que se tiene una fiabilidad del 99%
- c. Con un parámetro de posición de 54 h calcule la fiabilidad a las 1000 h..

4. RESUMEN

El área de la Ingeniería de la Confiabilidad y la metodología estadística relacionada han estado creciendo continuamente durante los últimos 50 años.

Sin embargo se necesita desarrollar más métodos estadísticos, procedimientos de recolección de información, planes de ensayo y herramientas enfocadas a la confiabilidad de sistemas y componentes.

Los métodos estadísticos permiten definir correctamente la calidad de los productos, siendo este un paso fundamental para determinar la confiabilidad de los mismos; dar un fundamento científico a las operaciones de control industrial. Con el cambio continuo de la tecnología, el conocimiento continuo creciente y las nuevas fuentes de información y datos, surgen nuevos problemas y retos de gran interés.

Debido a que la confiabilidad es un factor medido en una probabilidad de ocurrencia, la estadística continuará desempeñando un papel fundamental en el área de la confiabilidad. Los modelos estadísticos nos permiten actualmente identificar un tipo de comportamiento de fallas de manera que aplicando estas técnicas podamos predecirlas y tomar medidas preventivas. Pero esto no es suficiente, la estadística hoy en día nos proporciona una perspectiva de lo que

puede ocurrir, sin embargo no es la solución a los problemas de nuestros sistemas, he aquí que es necesario trabajar en la causa raíz que originan las fallas de los equipos. El trabajo en este aspecto es lo que verdaderamente logrará un gran impacto en la disponibilidad del sistema.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Estructurar el cuerpo de conocimientos que se refieren a la predicción, análisis y reducción del error humano, enfocándose sobre el papel de la persona en las operaciones de diseño, de mantenimiento, uso y gestión del sistema socio técnico de una empresa.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Desarrollar la teoría y conceptualización del error y fallo humano en los procesos productivos.
- Desarrollar el modelo de control y tratamiento del comportamiento subestándar del hombre en los procesos socio técnico de los procesos productivos de la empresa.
- Desarrollar las metodologías de análisis de error humano que le permiten mantener dentro de límites determinados, las variaciones del rendimiento de la actividad laboral humana, para asegurar la efectividad del sistema y evitar fallos.

INTRODUCCIÓN

La confiabilidad en términos del ser humano se puede medir en lo posible por la precisión con que el individuo realiza la tarea. De todas las áreas que afectan la confiabilidad, ninguna tiene una mayor incidencia que la precisión que se puede lograr a través del hombre. La gente no solamente agrega la mayoría del valor a la tarea, es también la forma más sensible de precisión y por lo tanto, tiene la influencia más grande en la confiabilidad.

La gente por lo general cree que cuando ha alcanzado niveles altos de competencia, no existe la oportunidad que en algún momento hayan fallas. La precisión verdadera puede ser lograda, cuando el individuo entiende que debe ser verdaderamente PROACTIVO y que como tal debe aprovechar las oportunidades de contar con excelente tecnología para el desarrollo de sus tareas.

Los costos de mantener y operar en las empresas se han elevado de una manera acelerada con el paso de los años. Actualmente existen nuevas técnicas que permiten disminuir los costos y/o mejorar la Confiabilidad y por ende el desempeño de las mismas. Un factor importante en el logro de estos objetivos es el hombre, porque es éste quien en forma directa o indirecta manipula los equipos

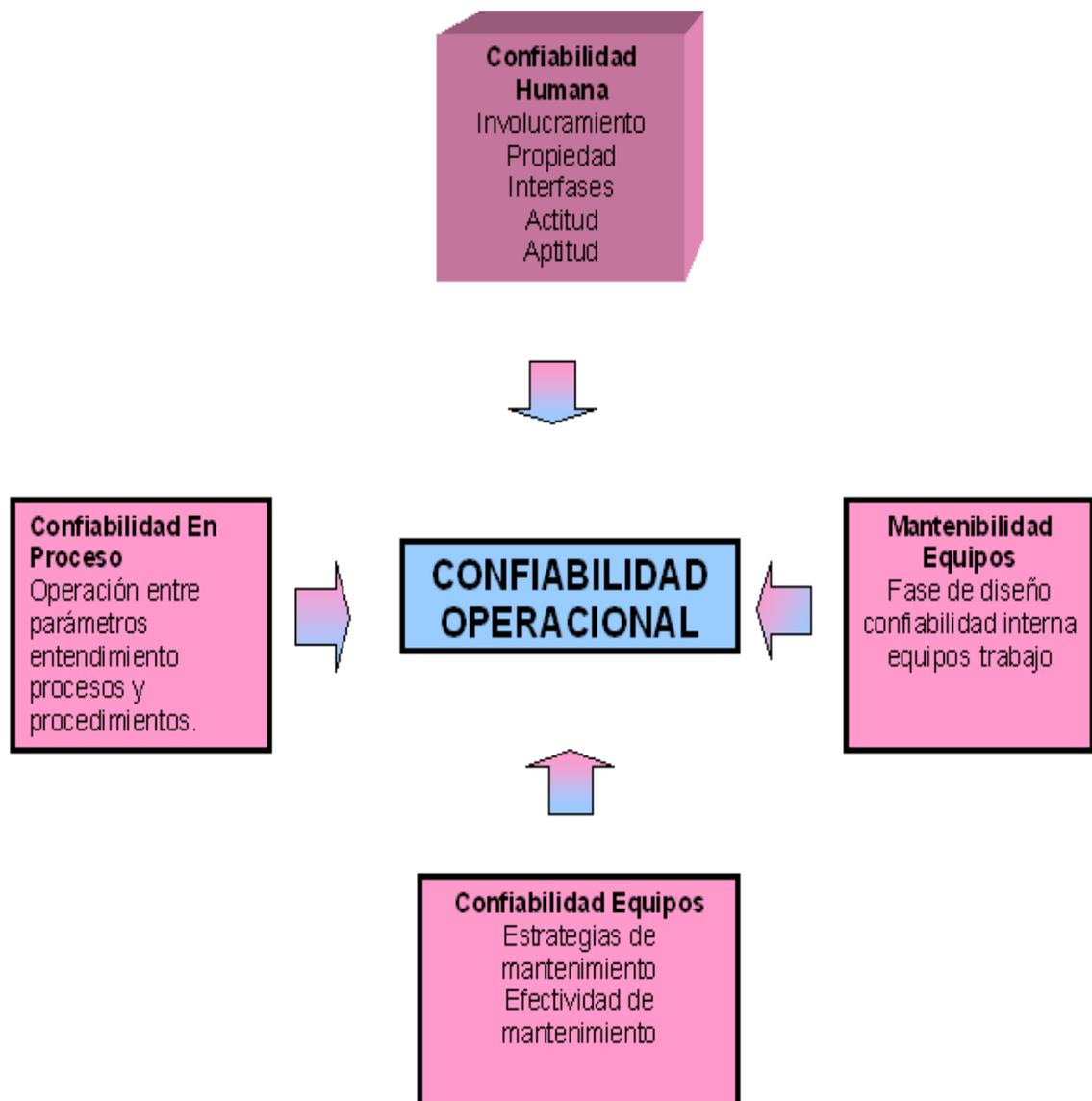
y materiales de la empresa, es por ello que la Confiabilidad Humana ha tomado tanta importancia en los procesos productivos de las empresas.

La Confiabilidad Humana lo que busca es que el sistema sea capaz de cumplir la función para la cual fue diseñado, en un intervalo específico de tiempo y bajo unas condiciones establecidas.

Las empresas gastan mucho dinero en Reingeniería, Nueva Tecnología, etc., para mejorar la calidad de sus productos y de las personas pertenecientes a su empresa y los resultados son muchas veces decepcionantes e inexistentes. Entonces, ¿Qué hace la Confiabilidad Humana diferente?, ¿Cómo contribuye ésta a la mejora y transformación de grandes empresas? Se mostrará a lo largo del capítulo, porque es importante que el hombre conozca adecuadamente el funcionamiento de los equipos, porque es importante que el hombre encuentre en condiciones óptimas y porque se deben prevenir los errores humanos.

1. CONTEXTO DE LA CONFIABILIDAD HUMANA

A continuación se ilustra en la gráfica, el posicionamiento de la confiabilidad humana, dentro del contexto de la confiabilidad operacional.



2. DEFINICIÓN DE LA CONFIABILIDAD HUMANA

“Es la probabilidad de mantener el rendimiento al nivel exigido por la tarea laboral, durante un espacio de tiempo determinado”.

2.1 PORQUE ES IMPORTANTE MEJORAR EL DESEMPEÑO HUMANO?

¿Cuál es la causa de la facilidad que existan fallos en los procesos? ¿El problema de Calidad? ¿El último accidente? ¿Qué cambios son los culpables del error humano?

Históricamente la alta gerencia tiene cimentado que el error humano es un factor significativo en casi todos los problemas de calidad, fuerzas de producción, o facilidades de accidentes. Un estudio de 190 accidentes en empresas químicas encontró que éstos eran generados por 4 causas: Insuficiencia de Conocimiento (34%), Error de Diseño (32%), Error de Procedimiento (24%) y Error del Operador (16%). Claramente el Error Humano fue considerado la causa de una fracción de los accidentes que fueron evaluados en este estudio. Pero cuando nos detenemos a pensar acerca de los resultados, ellos no son realmente culpables porque existe un potencial de error humano en todos los aspectos de manufactura.

Es importante mejorar el desempeño humano para evitar tantos fallos en los sistemas y accidentes en las empresas. Los gerentes deben diseñar formas para prevenir un accidente, deben enseñar y entrenar sobre la cultura de confiabilidad a los operadores para disminuir los accidentes y desaparecerlos si es posible. La recompensa de crear e implementar estos programas será muy tangible en la compañía porque los procesos se convertirán en más seguros, productivos y de mejor calidad.

3. DEFINICIÓN DEL ERROR HUMANO

El error humano es considerado como un Comportamiento que excede el límite de tolerancia definido para la seguridad de un sistema. Se excluyen en esta definición, los sabotajes (conductas malintencionadas) y las violaciones (transgresiones deliberadas, sin intención de daño y no necesariamente censurables). Además, el término error no tiene una connotación moral de fallo personal o culpa, pues ésta no tiene utilidad para la determinación de las causas originales de los accidentes e incidentes.

3.1 TIPOS DE ERROR:

3.1.1 ERROR HUMANO: Se produce cuando un comportamiento humano o su efecto sobre el sistema exceden los límites de aceptabilidad del mismo; ésta definición de error plantea, al menos, los siguientes problemas:

- El mismo término se utiliza tanto para referirse a la consecuencia de la actividad (el resultado erróneo), como a la causa de ésta.

- La apreciación del carácter erróneo de una acción o de una actividad humana difiere según la referencia utilizada. Una misma acción puede considerarse adecuada o errónea en función del sistema de referencia (persona, sistema técnico, colectivo de trabajo, organización del trabajo) y del punto de vista adoptado (producción, seguridad, calidad, fiabilidad).

3.1.2 ERROR NO INTENCIONAL: Son acciones cometidas y omitidas sin prioridad de pensamiento.

Ejemplo:

Tropezar el switch, leer en forma errada el manómetro, olvidar abrir la válvula, derramar el café en la sala de control, entre otras.

3.1.3 ERROR INTENCIONAL: Son acciones que cometemos deliberadamente u omitimos, por cualquier razón creemos que nuestra acción es correcta o que ella será mejor (más rápida, más económica, más fácil, más segura, etc.)

Ejemplo:

Adicionar un poco de catalizador extra para acelerar el inicio de una reacción, etc.

3.1.4 DIFERENCIA ENTRE ERROR INTENCIONAL Y UN ERROR MALEVOLO (SABOTAJE): Un error intencional no tiene como finalidad causar daños al sistema, sin embargo, sus efectos sobre éste pueden llegar a ser indeseados.

Un comportamiento malévolo no es del todo un error, es una acción mal intencionada para causar daños al sistema.

3.2 CARACTERISTICAS DEL ERROR

3.2.1 SLIPS (DESLICES): Los Slips conciernen a la ejecución de una acción que no es la que uno se proponía realizar. Pueden suceder cuando un esquema de acción sufre un defecto de activación o un defecto en su desarrollo. Los errores llamados Slips, son relativamente fáciles de tratar porque no reflejan intenciones inadecuadas.

3.2.2 EQUIVOCACIONES: Corresponden a errores en la formación de la intención y/o en la determinación de objetivos. Son acciones realizadas como se proponían, cuyos efectos inmediatos o en una etapa posterior no están en concordancia con el logro del objetivo que pretendía la persona.

Cuando los errores ocurren por malentendidos (mala comprensión), mistakes (equivocaciones), el usuario puede necesitar una explicación antes de aceptar la conclusión de que su elección fue errónea.

3.2.3 CLASIFICACION DE LOS ERRORES: Se basan en la distinción de las características o rasgos generales del error las cinco categorías siguientes:⁴

- ✓ Error de omisión.
- ✓ Error de ejecución.
- ✓ Error de corrección.
- ✓ Error de secuencia.
- ✓ Error de demora.

⁴ CHEMICAL MANUFACTURERS ASSOCIATION. A manager's guide to reducing human errors.

4. FALLOS HUMANOS

Por un **fallo** entendemos el fracaso del hombre al ejecutar una actividad. Puede tratarse de errores elementales o de la ejecución falsa de acciones más complejas.

4.1 Tipos de fallos:

- ✓ Tropezar
- ✓ Errar al tratar de coger algo
- ✓ Derramar
- ✓ Equivocarse hablando
- ✓ Equivocarse escribiendo (por ejemplo: escribir una letra pensando en una palabra que va después)
- ✓ Perder o dejar de hacer (en el sentido de que no se comprende la necesidad de la acción)
- ✓ Olvidar Pasar por alto (en el sentido de la ausencia de concentración de la atención).
- ✓ Equivocarse (en el sentido del ordenamiento inadecuado entre señales y reacciones).
- ✓ Error en el cálculo.
- ✓ Error en la planificación.

- ✓ Errores debidos a la reacción habitual.
- ✓ Errores debidos a las expectativas (lo que es Errores de estereotipia y expectación esperada no coincide con lo que ocurre por un cambio de las condiciones).

4.2 CLASIFICACION DE LOS FALLOS:

2. Fallos producidos por la falta de información necesaria para la regulación de la conducta:
 - a. La falta de las bases de regulación visual y táctil en movimientos dirigidos.
 - b. La falta de posibilidades de diferenciación táctil entre elementos de manejo.
 - c. La falta de aferencia o retroalimentación para la regulación de la conducta (por ejemplo cuando uno habla y no se puede escuchar a si mismo).
3. Fallos producidos por un aprovechamiento insuficiente de la información:
 - ✓ Todos ellos están relacionados con varios problemas psicológicos.
4. No hay un aprovechamiento de la información, actual o anteriormente recibida, de una manera intencional o voluntaria

- ✓ Esto sería el caso de la violación consciente de medidas de protección. (pueden ser motivos muy diferentes los que forman la base de esta conducta).
- ✓ Puede tratarse de una diferencia personal entre los resultados del trabajo o ante la responsabilidad por valores materiales y personales y/o el deseo predominante de comodidad, pero puede tratarse también de la intención de ahorrar tiempo y movimientos para lograr una productividad más alta.

4.3 ACCIDENTE:

El **accidente** es una de las consecuencias posibles del fallo sí bien la más grave. Por un lado no todo fallo lleva necesariamente al accidente y por otro lado no todo accidente resulta de un fallo (es decir, por ejemplo, un accidente provocado por causas naturales o por causas exclusivamente técnicas).

El accidente laboral incluye siempre la existencia de lesiones corporales; el accidente del tránsito implica además daños sin perjuicios del hombre.

El tipo de consecuencia de un fallo puede resultar sólo en un riesgo sin perjuicios o en pérdida de tiempo o en desechos o en un accidente.

5. ANÁLISIS DE LA FIABILIDAD HUMANA (HRA)

5.1 DEFINICIÓN:

El análisis para la fiabilidad humana (HRA) es un término general para métodos por el cual las probabilidades de los errores humanos están estimadas por algún aspecto de los procesos de fabricación, incluyendo investigación, diseño, construcción, operación, mantenimiento, gestión, y otras.

En un HRA, esas acciones humanas que pueden contribuir al sistema de fallas son evaluadas cualitativa y cuantitativamente. Los gerentes a menudo pueden emplear directamente los resultados cualitativos del HRA sólo para identificar los caminos prácticos para reducir los errores humanos. Si es necesario, los gerentes pueden extender el HRA para cuantificar la probabilidad del error humano y evaluar los beneficios de los cambios propuestos en procedimientos, equipos u otros. Los gerentes deberían considerar usar el HRA cuando lo necesite como en el siguiente listado:

TABLA 1. MOTIVACIONES DEL HRA

- ✓ El potencial de confiabilidad humana asociado con actividades específicas deben ser identificadas como medidas preventivas apropiadas y los factores de recuperación que pueden ser identificadas e implementadas.

- ✓ Los cálculos de las probabilidades de la confiabilidad humana son necesarios como contribución para Costo / Beneficio de estudios de diseños de alternativas, procedimientos o políticas.

- ✓ Los cálculos de las probabilidades humanas son necesarios como contribución para cálculos de riesgos cuantitativos.

Cuando las necesidades de mejoramientos generales en la actuación humana son deseadas, los gerentes deberían emplear especialistas de factores humanos para sugerir mejorías en situaciones de trabajo conjunto. Los resultados del HRA pueden ser muy útiles en la ayuda para justificar los factores generales y los factores específicos humanos de las mejorías de ingeniería. Sin embargo, es usualmente más eficiente corregir algunas deficiencias de ingeniería en los factores generales humanos antes de invertir en detallados análisis de fiabilidad

cuantitativa humana, porque tales deficiencias tendrían un mayor impacto en los resultados del HRA.

Una vez se decide usar el HRA para satisfacer una necesidad particular, se debe prestar atención a tres áreas claves que son descritas en las siguientes páginas:

- ✓ Graficar los análisis
- ✓ Seleccionar técnicas apropiadas
- ✓ Entender las suposiciones y las limitaciones.

Éstas áreas están interrelacionadas, y las decisiones sobre uno afecta a los otros. La primera y la tercera áreas involucran las acciones que principalmente; el usuario primordial debe tomar (cuidadosamente definir por escrito los objetivos para el equipo de proyecto del HRA). Otras acciones en éstas áreas requerirán su interacción cuidadosa y negociación con el equipo HRA (definir los alcances de los análisis y los recursos disponibles) asegurar que conozcan el producto final que necesita. La segunda área conlleva a decisiones que influenciarán, pero deberán ser dejados a la discreción del equipo (selección de técnicas de análisis específicos).

Las decisiones concernientes a estas áreas no son hechas simplemente una vez, serán consideradas de nuevo. Se deben revisar cada área periódicamente mientras los resultados intermedios son desarrollados.

5.2 DIAGRAMACION DEL ANÁLISIS

Sí un HRA sirve para satisfacer eficientemente sus requerimientos, se debe definir específicamente el diagrama para el análisis. La figura 1 contiene los elementos de un diagrama HRA. Definir estos elementos requiere un entendimiento de las razones de para qué el estudio, una descripción de los requerimientos de la administración y un resumen del tipo de información requerida. Los elementos del diagrama se basan en el conocimiento obtenido durante el tiempo de estudio. El equipo HRA debe entender y sustentar el diagrama de análisis, sino puede resultar un producto poco útil.

FIGURA 1. ELEMENTOS DE UN DIAGRAMA HRA²



² IBÍD. Pág. 131

5.3 OBJETIVO DE ESTUDIO

Un tema importante y difícil consiste en traducir sus requerimientos a objetivos de estudio de tipo HRA. Por ejemplo, si necesita decidir entre dos métodos para fabricar un químico peligroso, usted debe determinar el objetivo específico, “yo quiero saber cuál es la diferencia relativa de la probabilidad de error humano entre los dos métodos”, no el objetivo más general “yo quiero saber cuál es la probabilidad que un error humano se presente para los dos métodos” y preguntándole a su equipo HRA por más de lo que es necesario para satisfacer sus necesidades particulares es contra productivo.

Por ejemplo, si los resultados cualitativos pueden proveer la información adecuada, no se debe gastar sus recursos persiguiendo estimativos cuantitativos de probabilidades de error humano, para que cualquier HRA produzca eficientemente el tipo de resultados necesarios, usted debe comunicar claramente sus requerimientos a través de objetivos bien escritos.

La tabla 2 nos da algunos ejemplos prácticos de objetivos HRA para llevar a cabo.

TABLA 2: EJEMPLOS DE TÍPICOS OBJETIVOS HRA³

| |
|---|
| <ul style="list-style-type: none">▪ Determinar la probabilidad de un error humano que cause el derrame de un químico tóxico durante la carga de camiones. ▪ Identificar los errores humanos más recurrentes que pueden causar una reacción de huída e identificar la mejor manera para implementar la seguridad ▪ Comparar tres procedimientos y compararlos de acuerdo a sus probabilidades de error humano ▪ Determinar la probabilidad de que pueda ser no disponible como los resultados de un error de mantenimiento. ▪ Identificar las formas costo-efectivo más efectivas, para reducir la probabilidad de que un error humano pueda causar una interrupción de procesos. ▪ Estimar como a través de un segundo ingeniero independiente que revise los parámetros de procesos, se puede reducir la probabilidad de tener productos por fuera de las especificaciones. |
|---|

³ IBÍD. Pág. 131

5.4 ALCANCE

Establecer y documentar las bondades y asunciones físicas y analíticas para un HRA son temas de alguna dificultad, inclusive se puede proveer un entender, el alcance de la definición puede ser largo si se hace por el grupo del proyecto HRA, de todos los ítems listados en la figura 1. La selección de un apropiado nivel de detalles es el elemento de alcance más crucial para desarrollar un HRA eficiente, debe animar a su equipo HRA para usar los datos en pantalla y gruesos niveles de resolución durante los primeros niveles del HRA, particularmente si los resultados HRA pueden ser usados como la entrada para un QRA. (Análisis Confiable de Calidad).

Una vez que el analista determina los temas que son contribuidores significantes de riesgo, ellos pueden aplicar selectivamente esfuerzos más detallados a las cuestiones específicas como lo es el análisis de progresos, ésta estrategia puede ayudar a conservar los recursos de análisis para enfocarlos solo en áreas importantes para desarrollar riesgos improbables de entendimiento, por tanto se debe revisar las condiciones y asunciones con el equipo HRA durante el curso del estudio y revisarlos, y observar como se aprende acerca de las sensibilidades claves. Al final la habilidad para usar efectivamente el HRA se estima que puede ser determinada por su apreciación acerca del importante estudio de las asunciones y limitaciones resultantes del alcance de la definición. Sin embargo, es

crítico que tanto las asunciones físicas y analíticas sean claramente documentadas.

5.5 ACERCAMIENTO TÉCNICO

El equipo de proyecto HRA puede seleccionar el acercamiento técnico apropiado cuando se especifique los objetivos de estudio y juntos pueden definir el alcance. Una variedad de técnicas de modelaje y recursos generales de datos pueden ser usadas para producir los resultados deseados.

El equipo HRA debe tener cuidado de seleccionar una técnica HRA que pueden satisfacer sus objetivos de estudio debido a que muchas técnicas son modelos teóricos con aplicabilidad práctica.

Se debe considerar obtener remisiones de aseguramiento de la calidad del estudio (para sacar afuera los errores en modelaje, datos, etc.) independientemente de las revisiones de los resultados HRA puede ayudar a presentar puntos de vista alternos, y se debe incluir expertos foráneos (tales como consultores o personal de otras plantas) en el panel de revisión del HRA.

Deben configurar un mecanismo en el cual las disputas entre los miembros del equipo HRA (e.q. argumentos técnicos acerca de las respuestas del sistema)

pueden ser revisadas y solucionadas. Todos estos factores juegan un rol esencial en la producción de alta calidad del HRA.

Una vez que el HRA está completo se debe preparar un documento formal con su respuesta al equipo de proyectos final como especie de reporte y con cualquier recomendación que el reporte contenga.

5.6 RECURSOS

Los administradores pueden usar HRA para estudiar empresas tanto de pequeña como de gran escala. Por ejemplo un HRA puede ser desarrollado en una sola actividad, como lo es el procedimiento de carga dependiendo de los objetivos de estudio una HRA completa (con un árbol de evento HRA y un estimativo de las probabilidades de error humano) puede requerir unos pocos días o unas pocas semanas de esfuerzo técnico. Por otro lado un estudio mayor para identificar todos los errores humanos contribuye a las precauciones asociadas con una unidad de procesos larga (e.q. una unidad con un capital asociado invertido de 50 millones) puede requerir 1-3 personas por mes de esfuerzo y una completa HRA de la misma unidad puede requerir unas 1-2 personas – años de esfuerzo.

Sí una HRA es comisionada, usted debe organizar adecuadamente el equipo HRA en orden para desarrollar sucesivamente el trabajo. Una mezcla apropiada de

ingeniería y disciplinas científicas deben ser asignadas al proyecto. Si el estudio envuelve una actividad de producción, operaciones y mantenimiento el personal debe jugar un papel esencial para asegurar que el modelo HRA representa el sistema real y las prácticas de la planta.

En adición a los analistas HRA, un equipo típico debe además requerir asistencia de analistas de sistemas, ingenieros de procesos, operadores experimentados, ingenieros de diseños, ingenieros de instrumentación, supervisores de mantenimiento y/o inspectores que estén familiarizados con el sistema. Sin importar que su compañía tenga una experiencia propia significativa, se debe comparar con de fuera de la compañía para ayudar a desarrollar un análisis más largo o complejo. Si los contratistas son usados por largo período de tiempo, se debe requerir que el personal conocedor sea parte integral del equipo HRA.

5.7 SELECCIONANDO Y APLICANDO TÉCNICAS HRA

Dependiendo de sus objetivos, un HRA encierra uno o más de los siguientes cuatro pasos básicos:

1. Factores humanos en la ingeniería de evaluación
2. Análisis de temas
3. Cuantificación

4. Análisis de sensibilidad e incertidumbre.

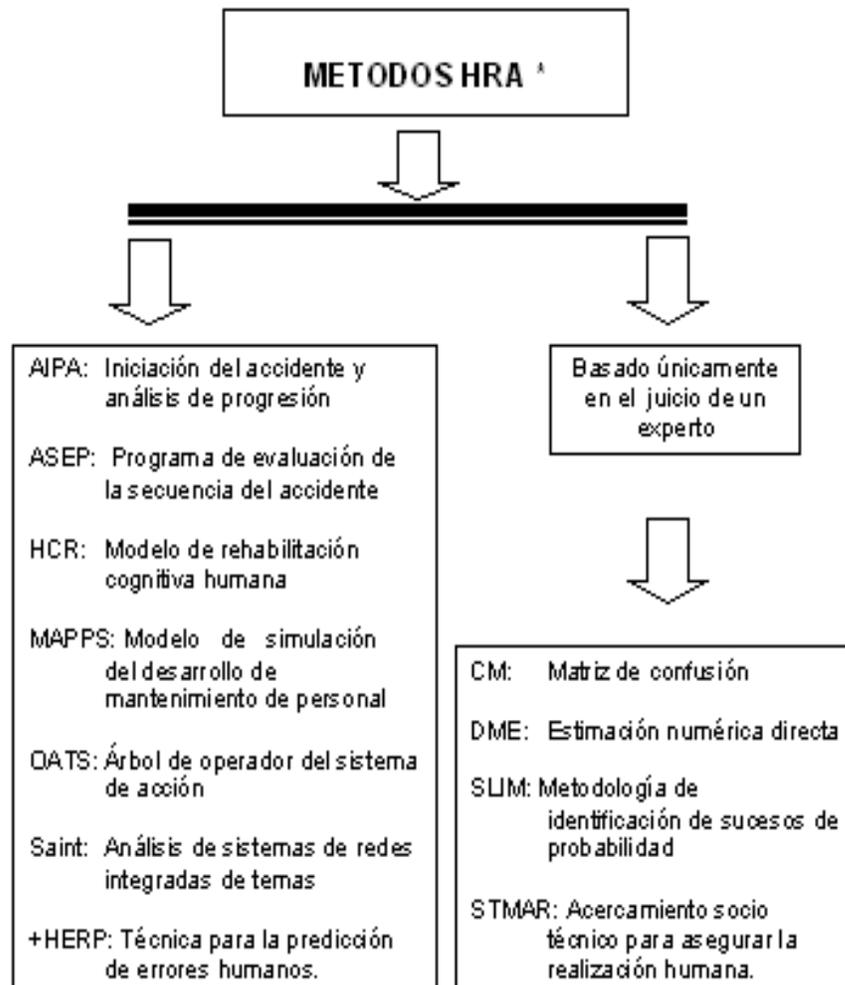
Numerosas técnicas de análisis y modelos tienen que ser desarrollados para ayudar en el desarrollo de estos 4 pasos (figura 2), cuántas referencias existen para métodos específicos, severas y recientes publicaciones dan aviso específico y detalles de “cómo hacer” para la variedad de técnicas, usted no tiene que seleccionar técnicas específicas - su equipo HRA puede hacerlo, pero usted debe verificar que las técnicas seleccionadas son utilizables, prácticas y aceptables. (Vea la Figura 1 para una evolución de varias técnicas HRA).

Una técnica utilizable puede ceder información que puede ser usada como la base para recomendar mejoras de seguridad u operabilidad, si menos relación de cualquier análisis cuantitativo es desarrollado. Pero, si la cuantificación es requerida, una técnica utilizable puede y debe arrojar estimativos válidos y consistentes de características de desarrollo humano necesarias para un QRA, tal como respuestas a tiempo, probabilidades de errores humanos condicionales y dudas.

Las técnicas seleccionadas deben ser aplicables al rango de los temas humanos, siendo evaluadas y suficientemente flexibles para dirigir las condiciones específicas de la planta.

FIGURA 2. SINOPSIS DE LOS MÉTODOS HRA⁴

- Algunos de estos métodos HRA tienen aplicaciones limitadas



⁴ IBÍD. Pág. 131

En adición de ser utilizable, una técnica HRA debe ser práctica para aplicar, brindando el tiempo, el dinero y los recursos humanos disponibles para el análisis. Algunas técnicas no son prácticas debido a que ellas son tan complejas que solo unos pocos expertos pueden aplicarlas, o los datos requeridos simplemente no están disponibles para los temas a ser evaluados.

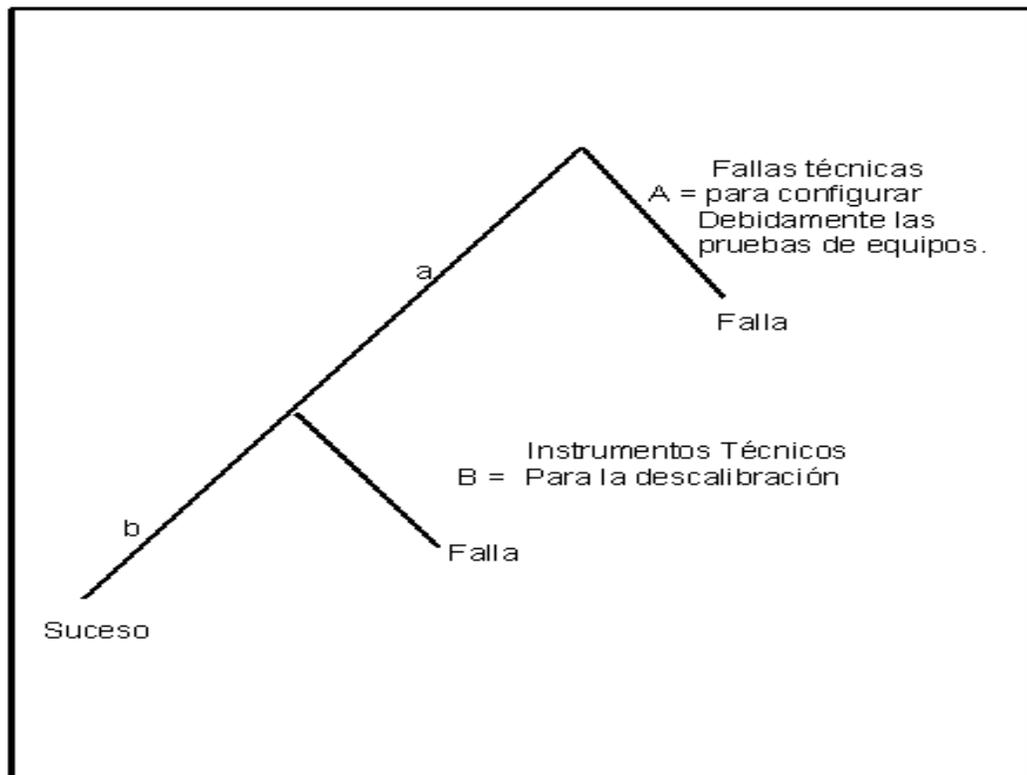
Finalmente, una técnica debe producir resultados que puedan ser aceptados para su propósito establecido. Aunque muchas de las técnicas tienen que experimentar una revisión, unas pocas han estado en el mercado con datos actuales de la actividad industrial. Varias tienen que ser utilizadas en QRA's si fueron aceptadas por las autoridades gubernamentales usando licencias y permisos o escuchando la conducta pública.

Cuando el análisis de los temas está completo, el analista HRA puede iniciar el proceso de cuantificación, muchos analistas comienzan por construir un árbol de eventos como los ilustrados en las figuras 3 y 4 y proceden a estimar las probabilidades nominales de error humano (HEPs) para cada error potencial (un típico error HEP puede ser 0.003 para un error específico de omisión o comisión como lo son mezclar un ítem en una lista de verificación o hacer una lectura errónea de un método análogo).

El HEP nominal es modificado para contar para el desarrollo de una planta específica, factores (PSF) y los efectos de suceso o fallas en los temas de procedimiento (dependencia). (Los HEP's modificados pueden ser factores de 10 o más altos o bajos que los HEP's nominales).

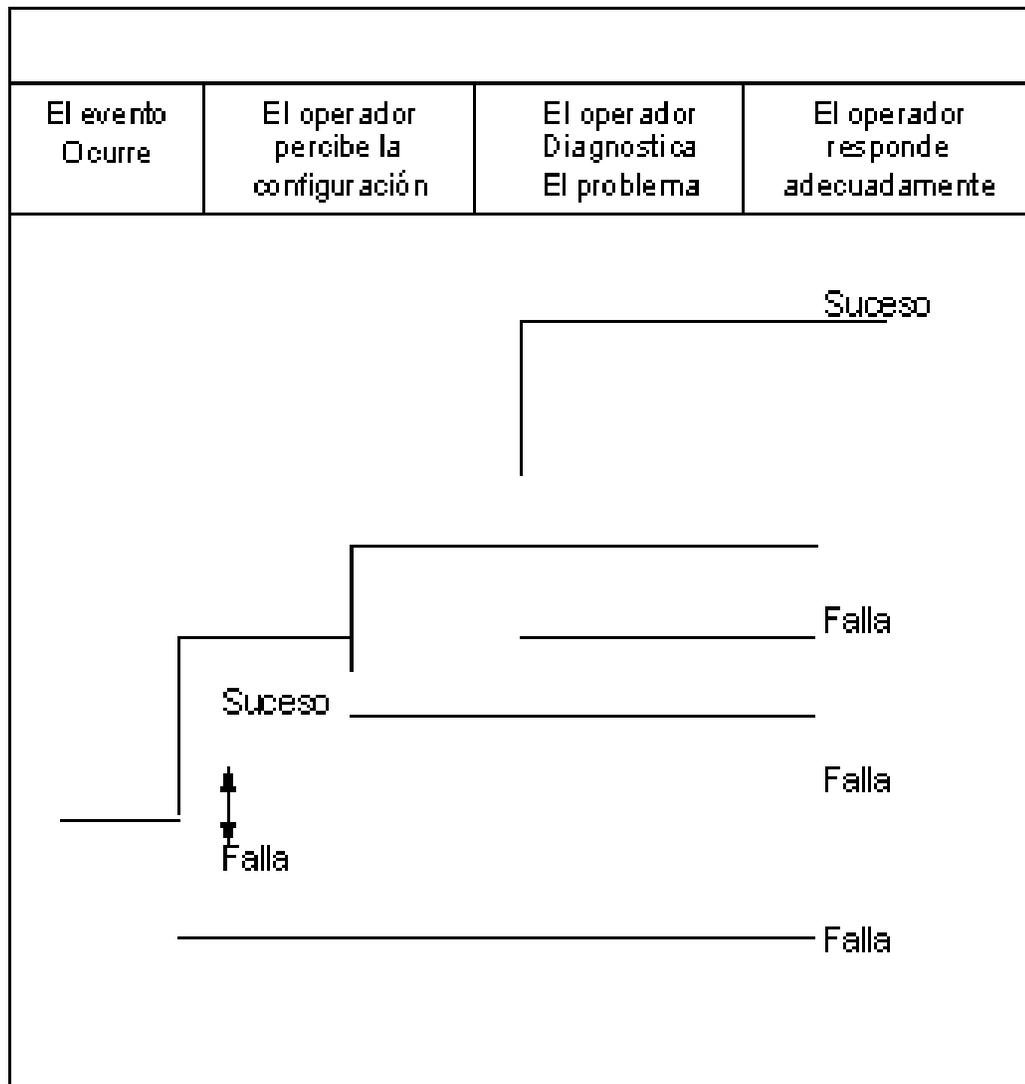
Finalmente los beneficios de cualquier factor de recuperación son contados para calcular un total de probabilidades de error humano. Los resultados cuantitativos también pueden estar sujetos a los análisis de sensibilidad e incertidumbre.

FIGURA 3. ÁRBOL DE EVENTOS HRA DE CALIBRACIÓN HIPOTÉTICA DE TRABAJO⁵



⁵ IBÍD. Pág. 131

FIGURA 4. ÁRBOL DE ACCIÓN TÍPICA DE UN OPERADOR⁵



Los análisis de sensibilidad son muy útiles para los gerentes debido a que ellos muestran cómo los cambios en las asunciones o condiciones pueden alterar los

⁶ IBID. Pág. 131

resultados HRA. Los análisis de incertidumbre de las variaciones en los resultados atribuibles a las incertidumbres de datos son generalmente menos útiles, las incertidumbres de muchas causas diferentes (modelos analistas de juicio, etc.) y las incertidumbres de datos no son siempre los más significantes para que las decisiones involucren unos resultados HRA, los gerentes pueden realizar un mejor estimativo y resultado, de sensibilidad, usando el buen juicio y la intuición para hacer algunos por incertidumbre.

5.8 ENTENDIENDO LAS LIMITACIONES

El análisis de la confiabilidad humana sufre esencialmente las mismas limitaciones que el análisis de riesgo cuantitativo. La tabla 3 es una lista de 5 de las mayores limitaciones de un HRA. Algunas de estas pueden ser de relativo desinterés para un estudio específico y otros pueden ser minimizados por el uso calificado de analistas con recursos adecuados. Sin embargo, se debe ser cuidadoso de estas limitaciones cuando diagrame una HRA y cuando use los resultados para propósitos de toma de decisiones y debe entender que las asunciones hechas durante un HRA son tan importantes como cualquier resultado.

Por otro lado, las asunciones deben ser cuidadosamente documentadas como los resultados HRA de estas limitaciones. HRA es una herramienta de gran valor para identificar y evaluar formas para reducir errores humanos.

Tabla 3. LIMITACIONES MAYORES DEL HRA⁷

| Trabajo | Descripción |
|---------------------------|---|
| Complemento | Estas nunca pueden ser una garantía de que todos los errores humanos son actos extensivos, y los factores de recobro deben ser considerados; no es que todas las conductas humanas deben ser consideradas. |
| Validación/especificación | Los modelos probabilísticos no pueden ser completamente verificados. Las conductas humanas son observadas en experimentos y se usan en modelos de correlación, pero los modelos son las mejores aproximaciones de circunstancias específicas, algunos modelos HRA están basados en asunciones debatibles acerca de la conducta humana, el HRA no puede proveer una buena representación de PSF y temas de planta específicos. |

⁷ IBÍD. Pág. 131

| | |
|------------------------|---|
| I Incertidumbre | La falta de datos específicos en probabilidades de error humano y modelos de diagnóstico de accidente limitan severamente y pueden producir largas incertidumbres, especialmente para la predicción de muy pocas probabilidades de conductas humanas. |
|------------------------|---|

6. RESUMEN

La Confiabilidad Humana es una de las herramientas más importantes de la Ingeniería de la Confiabilidad porque a través de ella podemos estudiar mejor el talento humano de nuestra empresa y podemos trabajar en la mejora de los procesos productivos de ésta, trabajando en equipo y con la ayuda de expertos en el tema que nos ayuden a fortalecer nuestras debilidades y a solidificar las fortalezas.

La confiabilidad Humana nos brinda herramientas de mejora para detectar probabilidades de error humanos y trabajar en la mejora de ellos, para lo cual nos brinda la Técnica del Análisis de la Fiabilidad Humana que es un completo estudio sobre todos los errores probables en nuestra empresa y del que hacen parte todas las personas que poseen contacto con ella: proveedores, personal, contratistas, socios, etc.

Es importante anotar que para que los resultados sean los esperados, todos los involucrados con la empresa deben tomar parte al poner en práctica ésta técnica. Además es importante que exista un buen control administrativo y excelente entrenamiento y capacitación para las personas que lideren el proceso en la compañía, sin obviar las demás personas de la empresa.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Proporcionar diferentes tipos de herramientas cuya finalidad sea mejorar la disponibilidad y mantenibilidad de los equipos.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Conocer los Principios Básicos de cada una de las Herramientas
- Identificar que tipo de herramienta debe utilizarse para un evento específico.
- Comprender la importancia de implementar acciones proactivas y preventivas.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas industriales complejos interaccionan en forma complicada y a veces imprevista. Un fallo en una parte del sistema puede repercutir en el resto en varios modos simultáneos independientes entre sí, o bien puede darse el caso de que una combinación de fallas sin importancia pueda tener consecuencias importantes. En un gran sistema es a veces imposible ensayar cada componente y mucho menos todas las combinaciones posibles. Las técnicas de Análisis de Riesgos que figuran a continuación pueden ser útiles para analizar las interacciones potenciales entre las partes del sistema.

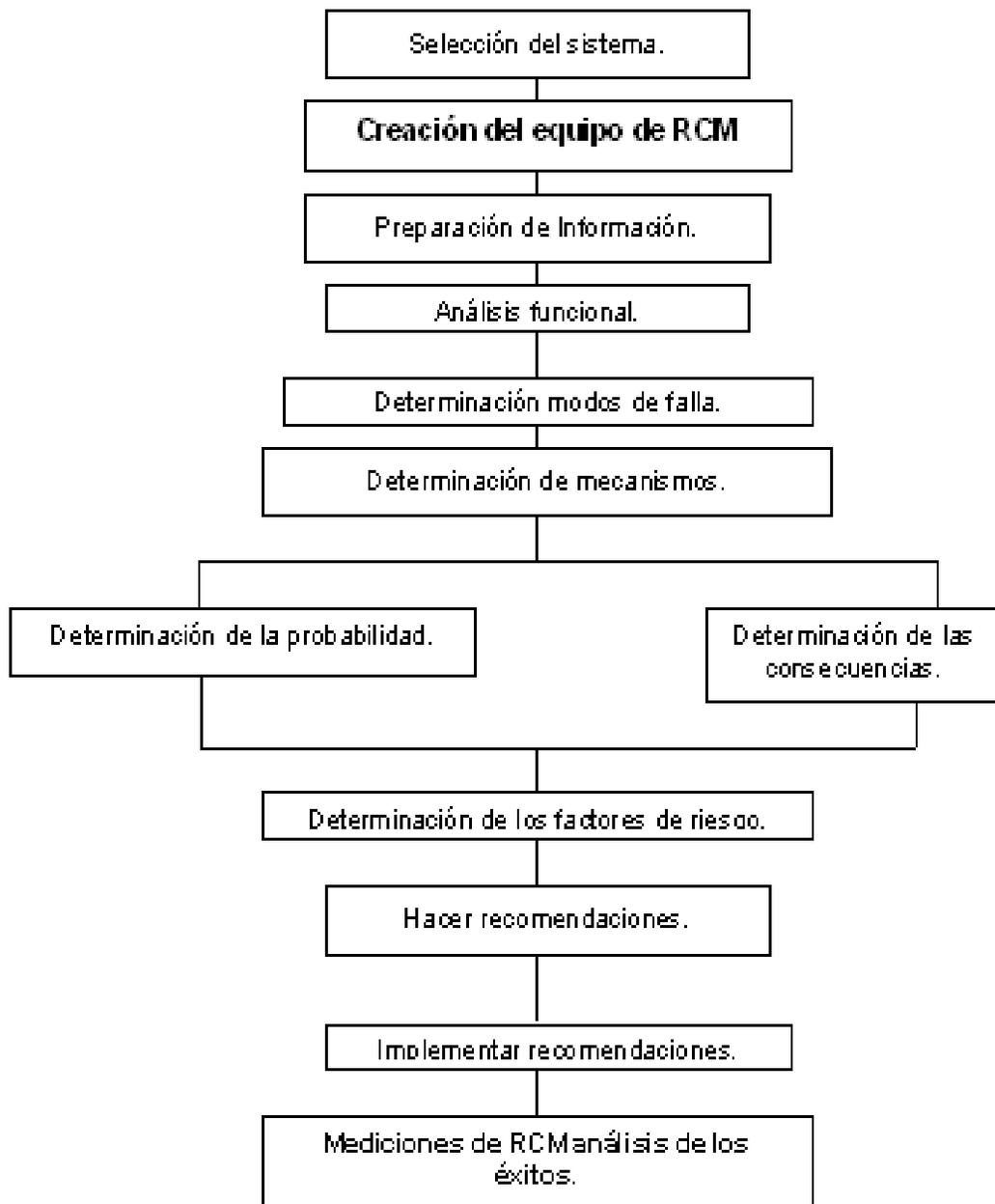
Pertencen a las Técnicas Prospectivas los Análisis de FMEA y HAZOP, cuyo objetivo es prever las consecuencias de las desviaciones en el comportamiento normal del proceso. Estos análisis son de tipo cualitativo.

Es importante tener en cuenta el análisis de las fallas reales para esto existen herramientas retrospectivas y de desempeño, cuya finalidad no es otra sino descubrir la causa – origen de la falla, para tomar las acciones correctivas y preventivas del caso.

1. HERRAMIENTAS PROSPECTIVAS (ANTES)

1.1 FAILURE MODE EFFECT ANALYSIS (FMEA): MODOS DE FALLA.

FIGURA 1. MODOS DE FALLA



1.1.1. DEFINICION: Es un método inductivo, por medio del cual se identifica todas las formas de falla de la pieza o componente de un equipo y de los efectos potenciales de fallo sobre el sistema y determina los medios de detección para cada tipo de fallo (**MIL – STD – 1629**)

El propósito del FMEA es analizar cada componente del sistema contra la función identificada para determinar si la falla de este podría resultar en la falla del sistema para el desempeño de la función.

1.1.2 OBJETIVOS DE FMEA: Los principales objetivos de FMEA son:

- FMEA identifica los *Modos de falla* que tiene más posibilidad de pérdida de una función.
- FMEA identifica cual es la causa origen de cada falla.
- FMEA asegura que no se malgasta el tiempo y esfuerzo tratando de buscar síntomas, en lugar de causas.

1.1.3 PREGUNTAS PARA EL FMEA: En el estudio FMEA se analiza:¹

- **¿Qué pasa si falla?** Se definen las dificultades de producción que se puedan observar, si hay fallas. Por tanto, se debe hacer una definición de la falla, establecer cuáles son las consecuencias para el proceso; se puede hacer más fácilmente utilizando un diagrama sencillo de flujo de proceso.
- **¿Como puede fallar el componente?** Los modos de falla son los eventos (operadores, componentes o sistemas distribuidos) que causan la pérdida de la función, (lo que se observa, se escucha o se huele). Por ejemplo una válvula puede fallar a la apertura o una bomba fallar por rotura o una fuga de aceites o alarmas de alto nivel, etc.
- **¿Que causa que falle?** Se refiere a “El efecto” que produce la falla observada. Los mecanismos de falla o causa de la falla son una descripción de la secuencia de los eventos que apuntan hacia la forma en que la falla ocurrió, con estos se describe en forma suficiente el modo de falla que finalmente es la causa raíz del o de los problemas. Es decir, la “Combinación de Causas” que llevan al equipo y/o sistemas a no funcionar

¹ www.rcmingeneria.com

bajo las condiciones para la que fue diseñado. (Mecánicos, Eléctricos o Combinación).

Las razones por las cuales ocurren las fallas (**Root Cause Análisis**), pueden ser:²

1. Falla por diseño.
 2. Defecto en los materiales.
 3. Fabricación y/o error del proceso.
 4. Ensamble o defecto de instalación.
 5. Fuera de diseño o condiciones de servicio sin plantación.
 6. Deficiencias en el mantenimiento.
 7. Operaciones apropiadas.
- **¿Que tan frecuente falla?** En este punto es importante recolectar datos en los que se incluyan:
 1. Tiempos improductivos de la instalación o el equipo, con causa, duración y costo.
 2. Incidentes Ambientales, con causa, duración y costo.
 3. Incidentes de Seguridad Industrial con causa.
 4. Costo de mantenimiento por cada equipo, incluyendo MTBF(tiempo medio entre fallas) o MTBR(tiempo medio entre reparaciones),

² IBID. Pág. 159

causa, número de órdenes de trabajo, reparaciones realizadas, costo, etc.

5. Estadística, tales como: baja confiabilidad, disponibilidad de utilización y mantenibilidad.³

1.1.4 EVALUACIÓN DE LA CRITICIDAD: La determinación de los efectos de falla es direccionar a todos los efectos, de todas las áreas concernientes al proceso (calidad del producto, económicos, regulatorios, seguridad personal y medio ambiente).

En la realización de un buen discernimiento de modo de falla, el efecto esta directamente relacionado con los costos.

◆ **CRITERIOS DE SEVERIDAD:** Los efectos de las fallas se consideran de acuerdo a las siguientes áreas:

- Shutdown de producción.
- Reducción de la salida de producción.
- Violación a políticas regulatorias.

³ IBID. Pág. 159

- Costo alto del mantenimiento.
- Personal en peligro.
- Peligros ambientales.

◆ **IMPACTO DE LA FALLA:** La descripción de los efectos debe contener suficiente información para que los equipos de RCM (Mantenimiento Centrado en Confiabilidad) evalúen las consecuencias de la falla, alguna de estas son:

- El personal es afectado en su seguridad?
- Es un potencial de daño ecológico?
- Como afecta la producción?
- Cuanto cuesta su reparación?

◆ **¿COMO SE HACE LA EVALUACIÓN DE LA CRITICIDAD?:** Se realiza con en cálculo o por histórico de el conocimiento de la frecuencia, MTBF (tiempo medio entre fallas) y cuantificación de la falla.

El MTBF en un promedio que se aproxima a una probabilidad de falla y puede tener un ancho de variación de acuerdo a la cantidad de puntos de los datos.

EJEMPLO DE EVALUACIÓN DE LA CRITICIDAD.

RPN= PO X PS X PD

◆ **(PO) PROBABILIDAD DE OCURRENCIA**

TABLA 1. PROBABILIDAD DE OCURRENCIA

| PUNTOS | PROBABILIDAD DE FALLA | FRECUENCIA DE FALLA |
|---------------|---|----------------------------|
| 1 | REMOTA O RARO : No es razonable que este modo de falla ocurra | Fallas mayores de 3 años. |
| 2 | MUY BAJA O AISLADO: Basado en diseños similares y teniendo numero de fallas bajo. | 1 / 10000 |
| 3 | BAJA O ESPORADICO: Basado en diseños similares que han experimentado fallas esporádicas | 1/1000 |
| 4 | CONCEBIBLE: Basado en diseños similares que han causado problemas. | 1/100 |
| 5 | RECURRENTE: Hay certeza que loas fallas se repetirán | 1/10 |

◆ **(PS) PROBABILIDAD DE LA SEVERIDAD**

TABLA 2. PROBABILIDAD DE SEVERIDAD

| PUNTOS | CIRTERIO DE SEVERIDAD |
|---------------|--|
| 1 | MENOR : No hay efecto informado |
| 2 | MARGINAL: Fastidiosa. No hay degradación de sistema. |
| 3 | MODERADO: Causa insatisfacción. Alguna degradación en el sistema. |
| 4 | CRITICA: Causa un alto grado de insatisfacción. Perdida de la función del sistema. |
| 5 | CATASTROFICA: Una falla que puede causar muerte(s) o daños graves a la propiedad. |

◆ **(PD) PROBABILIDAD DE DETECCION**

TABLA 3. PROBABILIDAD DE DETECCION.

| PUNTOS | PROBABILIDAD DE FALLA | FRECUENCIA DE FALLA |
|---------------|--|----------------------------|
| 1 | Muy alta probabilidad de detección de la falla hasta que esta ocurra. Casi siempre hay señal de precaución. | 80 % - 100% |
| 2 | Alta probabilidad de detección de la falla hasta que esta ocurra. La mayoría de las veces está precedida por una señal de precaución. | 60 % - 80% |
| 3 | Probabilidad de detección moderada de la falla hasta que esta ocurra. Cerca del 50% de oportunidad de tener una señal de precaución | 40 % - 60% |
| 4 | Baja probabilidad de detección de la falla hasta que esta ocurra. La mayoría de las veces hay una pequeña o ninguna señal de precaución. | 20 % - 40% |
| 5 | Remota probabilidad de detección de la falla hasta que esta ocurra. Siempre sin ninguna señal de precaución | 0 % - 20% |

1.1.5 ¿COMO SELECCIONAR LAS TAREAS?: La selección de las tareas se determina de acuerdo a la matriz de riesgos:

Criticas: Las tareas que están con factor de riesgo rojo (8-12) son las que el equipo de RCM tomara para realizar las mejores recomendaciones de mantenimiento.

Medio: Las tareas de riesgo amarillo (5-7) son las tareas en que el equipo de RCM decide si hacerle recomendaciones de mantenimiento para prevenir las fallas.

Baja: Las tareas en riesgo verde (1-4) son equipos que generalmente se llevan a falla o por mantenimiento correctivo (Runt Failure)

1.1.6 REGISTRO DE FUNCIONES: Las funciones se listan en la columna izquierda de la Hoja de Información RCM. Se debe escribir primero las funciones principales, y además se deben enumerar como lo muestra la tabla 4.

TABLA 4. REGISTRO DE FUNCIONES

| | | |
|-----------------|--|-------------|
| HOJA DE | | Sistema |
| INFORMACIÓN RCM | | Sub-sistema |
| FUNCIÓN | | |
| 1 | | |
| 2 | | |
| 3 | | |
| 4 | | |
| 5 | | |

1.1.7. REGISTRO FALLAS FUNCIONALES: éstas son descritas en la segunda columna de la Hoja de Trabajo de Información. En la tabla 5 se ilustra.

TABLA 5. FALLAS FUNCIONALES

| HOJA DE | | Sistema: | |
|-----------------|--|------------------|-----------------|
| INFORMACIÓN RCM | | Sub-sistema: | |
| FUNCIÓN | | | FALLA FUNCIONAL |
| 1 | | A B C D | |
| 2 | | A | |
| 3 | | A | |
| 4 | | A B | |
| 5 | | A | |

1.1.8 MODOS DE FALLA: Son especificados todos aquellos eventos que causan fallas funcionales. Se le adiciona otra columna a la Hoja de Información, se ilustra en la Tabla 6.

TABLA 6. MODOS DE FALLA

| HOJA DE | | Sistema: | | |
|-----------------|--|--------------|-----------------|-----------------------------|
| INFORMACIÓN RCM | | Sub-sistema: | | |
| FUNCIÓN | | | Falla Funcional | Modo de Falla (Causa Falla) |
| 1 | | A B | 1 2 | |

1.1.9 CUADRO RESUMEN APLICACIÓN FMEA:

En este cuadro registramos toda la información referente al estudio hecho, incluyendo los controles que se le deben hacer, acompañados de las recomendaciones del caso, el responsable de ejecutar y la fecha límite para la cual las mejoras se deben realizar. Después de realizadas las acciones, se procede a evaluar nuevamente el sistema para saber cual es el porcentaje de reducción que se logró, la Tabla 7 nos ilustra esto.

TABLA 7. CUADRO RESUMEN APLICACIÓN FMEA.

| MODO DE FALLA | FALLA FUNCIONAL | SEVERIDAD | CAUSA POTENCIAL | OCURRENCIA | DISEÑO DE CONTROLES | DETECCION | RPN |
|---------------|-----------------|-----------|-----------------|------------|---------------------|-----------|-----|
| | | | | | | | |

| RECOMENDACIONES | RESPONSABLE | FECHA LIMITE | ACCIONES TOMADAS | DESPUES DE ACCIONES TOMADAS | | | | |
|-----------------|-------------|--------------|------------------|-----------------------------|------------|-----------|-----|------------|
| | | | | SEVERIDAD | OCURRENCIA | DETECCION | RPN | %REDUCCION |
| | | | | | | | | |



1.1.10 TIPOS DE ACCIONES DE MANTENIMIENTO A RECOMENDAR POR

FMEA: Las actividades fundamentales que deben realizarse son:

1. Monitoreo por condición: Temperaturas, presión, flujos.
Predicción: Vibración, Termografía.
2. Preventiva NO Intrusiva: Cambio de aceite. Engrase.
3. Acciones que son Operativas funcionales: Pruebas funcionales equipos stand by.
4. Tareas Funcionales de mantenimiento: Pruebas de protecciones.
5. Preventivo Intrusivo: Inspecciones internas y por frecuencias.
6. Renovación de partes y componentes: Cambio de rodamientos, etc.
7. Mantenimiento de tiempo directo intrusivo: Una completa reconstrucción Overhaus.
8. Re-diseño: Diseñar nuevamente el sistema o compra de otro equipo.

1.2 HAZOP

1.2.1 DEFINICION DE HAZOP: El concepto de Hazop es repasar la planta en una serie de reuniones, durante las cuales un equipo multidisciplinario "se inspira metódicamente" en el diseño de planta, siguiendo la estructura proporcionada por las palabras guías y la experiencia del líder del equipo.

La ventaja principal de esta reunión de reflexión es que estimula creatividad y genera ideas. Esta creatividad resulta de la interacción del equipo y de sus fondos diversos. Por lo tanto el proceso requiere que participen todos los miembros del equipo.

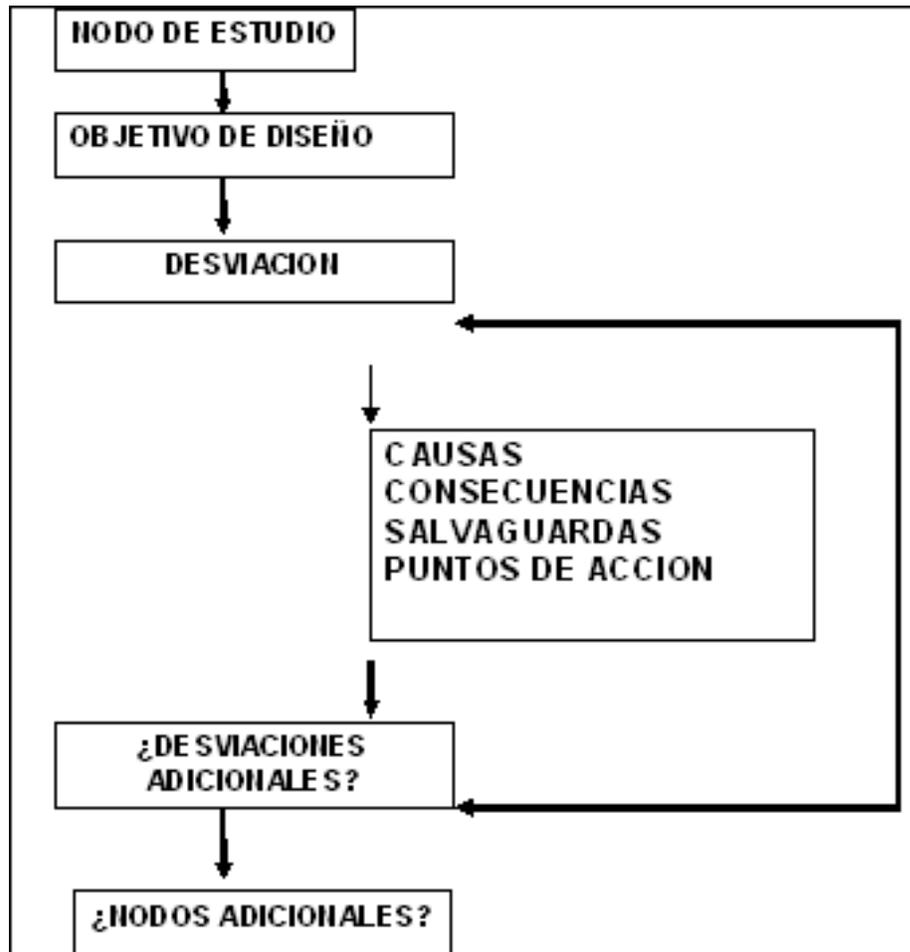
El equipo se centra en los puntos específicos del diseño (llamado los "nodos del estudio"), uno a la vez. En cada uno de estos nodos del estudio, las desviaciones en los parámetros de proceso se examinan usando las palabras guías. Así el equipo debe identificar un número bastante grande de las desviaciones, cada una de las cuales debe entonces ser considerada de modo que su potencial de causar consecuencias pueda ser identificado.

HAZOP es entonces, una técnica para identificación de riesgos industriales y es aplicable a equipos e instrumentos, y consiste en preguntarse Que Pasaría si tal equipo o instrumento o cualquier variable del proceso fallaran o se desviara con respecto a su función y valor. Se basa en una serie de palabras sencillas denominadas Palabras Guías, con las cuáles se estimula el pensamiento creativo.

HAZOP interpreta el proceso, cuestiona sistemáticamente cada parte del diseño, descubre como se pueden presentar las desviaciones con respecto a la intención de la parte analizada y decide si dichas desviaciones originan riesgos industriales. La metodología HAZOP tiene por objetivo obligar a la mente a pensar por sí misma, sin estar enteramente sujeta a considerar la materialización de los riesgos únicamente bajo la óptica de las leyes físicas y químicas conocidas por quienes aplican la metodología.

1.2.2 HAZOP COMO PROCESO: HAZOP como proceso requiere del desarrollo secuencial de actividades que permita el logro final de sus objetivos. Este orden de actividades se ilustra en el diagrama de procesos que se ilustra en la figura 2.

FIGURA 2. HAZOP COMO PROCESO.



1.2.3 ESTUDIO DEL NODO: La unidad de proceso se divide en pequeñas secciones llamadas nodos, el tamaño del nodo depende de la función y/o complejidad. El nodo cambia cuando hay un cambio en el objeto del diseño, cambio en las condiciones del proceso o la introducción de un equipo de proceso mayor.

El nodo es el punto focal de las discusiones del equipo, las causas para las desviaciones del proceso se limitan a lo que ocurre en el nodo objeto de estudio. Las consecuencias de las desviaciones del proceso pueden trascender mas allá del nodo específico.

1.2.4 PALABRAS GUIAS: La base para aplicar las Palabras Guías es la intención o el Hacer. La calidad de la definición del Hacer es clave para lograr resultados útiles a través del uso de esta metodología. Se puede asegurar que la definición del Hacer es la parte más importante una vez que el equipo se ha reunido para ejecutar los estudios HAZOP y cuenta con planos actualizados. La definición del Hacer depende de la conformación, del interés y de los conocimientos del equipo.

Una vez definida la intención del equipo o sistema, que consiste en establecer que producto se maneja con las propiedades de interés, tales como: composición, presión, temperatura, nivel y otras, y las actividades propias del equipo, tales

como bombear, controlar, almacenar, y otras, se procede a aplicar la Palabra Guía NO HACER, o sea que se asume que no hay la materia prima o no hace lo que tiene que hacer; se identifican las causas para esta desviación, las consecuencias y las acciones que eliminen las causas y minimicen las consecuencias, señalando un responsable de la ejecución. Sobre las acciones se destaca que se puede hacer para que un diseño subestándar cumpla con una norma aceptada y aplicada en las prácticas sanas de Ingeniería, o para mejorar un diseño debido a experiencia local o conocida, sin que la deficiencia identificada obligue a corregirla según normas locales e internacionales.

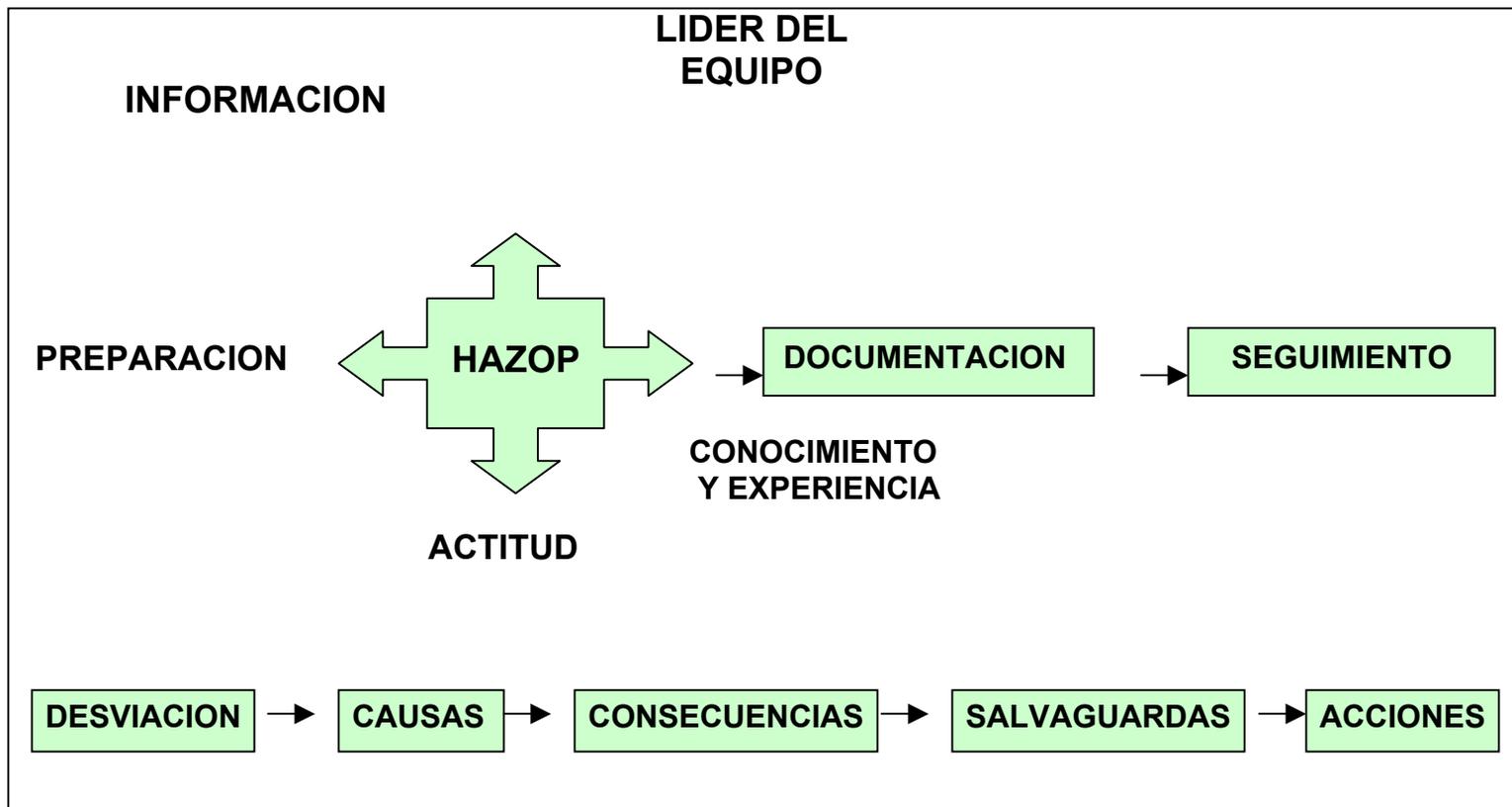
Con la Palabra Guía MÁS HACER se simula que hay más de la cantidad de materia prima que debiera haber, o hace más de la actividad que se espera que haga. Igualmente se identifican las causas, las consecuencias y se proponen las acciones correspondientes.

Con la Palabra Guía MENOS HACER, se asume que hay una cantidad inferior del material necesario; se identifican las causas, consecuencias y se propone las acciones correspondientes.

Después de esto, se aplica la Palabra Guía ASI COMO TAMBIEN HACER, en la que se asume que hay un componente adicional. Seguidamente, la Palabra Guía PARTE DE HACER, en la que a uno o más componentes les falta un material

definido como primordial. Luego, la Palabra Guía LO CONTRARIO HACER, en la que el material entregado es opuesto al solicitado. Por último, la Palabra Guía OTRA COSA QUE HACER, en la que se simula que el material solicitado no tiene nada del material entregado. Al igual que para las Palabras Guía anteriores, se identifican las causas, consecuencias y se proponen las acciones correspondientes.

1.2.5 DESARROLLO ESQUEMATICO DEL HAZOP: En la grafica que se indica a continuación, se puede ver el ciclo completo de desarrollo del HAZOP, donde se destacan las actividades principales que se deben cubrir, desde su inicio hasta el final.



1.2.6 QUIEN EJECUTA LOS ESTUDIOS HAZOP?: Los estudios HAZOP los ejecuta un grupo de personas, y se necesitan aportes de disciplinas diversas. Lo que persigue, entonces, es una interpretación multidisciplinaria, de manera que se piense en las desviaciones realistas, posibles y probables, y en su evaluación desde ángulos diversos. Por lo general se cuenta en el equipo de trabajo con una sola persona por especialidad necesaria.

El número óptimo de personas que pueden conformar el grupo de trabajo debe ser de cinco a seis. Además debe tenerse muy en cuenta la capacidad de trabajar en equipo que posea cada miembro que ha sido seleccionado y su interés en hacer parte de éste.

1.2.7 CONFORMACION DEL EQUIPO DE TRABAJO:

- Líder del equipo HAZOP
- Ingeniero de Proceso
- Supervisor de Producción/Operaciones
- Ingeniero Mecánico
- Ingeniero de Diseño de Control/Instrumentación
- Soporte logístico

1.2.8 PREPARACIÓN PARA LOS ESTUDIOS HAZOP: Para que los estudios Hazop sean efectivos, debemos tener presente que es una metodología para expertos en el diseño u operación de interés de manera que en forma sistemática usen sus conocimientos y experiencia para identificar riesgos operativos y personales asociados con una planta o proceso específico para así, mediante acciones de control, reducir la probabilidad de que se materialicen, aumentando la confiabilidad del sistema.

El éxito de los estudios Hazop depende no solo de la calidad del equipo de trabajo sino también del preparatorio. Existen seis pasos que hacen parte del trabajo que se debe realizar antes y después del estudio, son:

1. DEFINICION DE OBJETIVOS Y ALCANCE: El propósito, los objetivos, y el alcance del estudio se deben hacer tan explícitos como sea posible. Estos objetivos son fijados por la persona responsable de la planta, asistido por el líder del estudio de Hazop (quizás la planta o el oficial de seguridad corporativo). Es importante que esta interacción ocurra para proporcionar la autoridad competente al estudio y para asegurarse de que el mismo está enfocado. También, aunque el objetivo general es identificar peligros y problemas de operación, el equipo debe centrarse en el propósito o la razón subyacente del estudio. Los ejemplos de las razones de un estudio pudieron ser:

- Compruebe la seguridad de un diseño
- Decida si y donde construir
- Desarrolle una lista de preguntas claves.
- Compruebe los procedimientos de operación/seguridad
- Mejore la seguridad de una facilidad existente
- Verifique que la instrumentación de seguridad esté reaccionando a los mejores parámetros.

Es también importante definir qué consecuencias específicas deben ser consideradas:

- Seguridad del empleado (en planta o centro de investigación vecino)
- Pérdida de planta o de equipo
- Pérdida de producción (pérdida de los límites competitivo en mercado)
- Responsabilidad
- Asegurabilidad
- Seguridad pública
- Consecuencias para el medio ambiente.

2. ELECCIÓN DEL EQUIPO DE TRABAJO: Idealmente, el equipo consiste en cinco a siete miembros, aunque un equipo más pequeño podría ser suficiente para una planta más pequeña. Si el equipo es demasiado grande, el acercamiento del grupo falla. Por otra parte, si el grupo es demasiado pequeño, puede carecer la anchura del conocimiento necesitada. Para asegurarse lo completo. El líder del equipo debe tener experiencia en conducir un Hazop. El resto del equipo debe ser experto en las áreas relevantes a la operación de planta.

Las personas que hagan parte de este equipo de trabajo deben ser con experiencia, entusiastas y capaces. Es importante que la administración invite a hacer parte de éste equipo a aquellas personas que se hayan considerado como candidatos, en vez de aquellos a quienes se les exige ser parte. Seguramente al final del trabajo todos estarán agradecidos por la oportunidad y la responsabilidad.

3. PREPARACIÓN PARA EL ESTUDIO: Adjunto con la selección del equipo de trabajo, la dependencia responsable del estudio debe tener disponible copias actualizadas de los diagramas de Flujo y Diagramas de Tuberías e Instrumentos, y de los manuales de operación de la planta con los equipos específicos, si existen y están disponibles. Cabe anotar que sin éstos no es posible realizar el estudio Hazop. En la figura 2 se ilustra las necesidades de información primaria de diseño que el equipo debe disponer para su estudio.

FIGURA 2. INFORMACION PRIMARIA DE DISEÑO.



4. REALIZACION DEL ESTUDIO: El paso más importante para lograr resultados con este estudio es la ejecución de los mismos. Para ello, cada miembro del equipo ha debido recibir capacitación y entrenamiento necesario en cuanto al liderazgo o por lo menos en el uso de las Palabras Guías. La recomendación que debe cumplirse es que para ser Líder de estos estudios es necesario haber recibido entrenamiento de una organización formal o persona de reconocido

manejo técnico de ésta metodología, y además que se participe en capacitaciones regulares por lo menos cada cuatro o cinco meses.

Hacer parte de este estudio a personas con entrenamiento poco o nulo es llevarlo al fracaso. Las sesiones de trabajo pueden ser aproximadamente por un tiempo de 2 a 3 horas y de dos a cuatro días por semana, se debe escoger un sitio sin distracción y con abundante espacio y facilidades para desplegar planos, y con el líder dirigiendo el estudio. En la medida en que se detectan riesgos, se deben realizar anotaciones para corregirlos o consultar. Hasta donde sea posible el equipo de trabajo debe evitar dedicar mucho tiempo en la búsqueda de soluciones difíciles, y en cálculos matemáticos inmediatos ya que esto afecta el proceso de creatividad y disminuye la velocidad de trabajo del equipo. Otra razón es que la primera responsabilidad del equipo en las sesiones de trabajo es identificar riesgos ya que su eliminación o prevención muchas veces requiere de trabajo posterior por unos o más miembro del equipo u otra persona responsable.

5. ANOTACION DE RESULTADOS: Hace parte también de la realización del estudio la necesidad de anotar los resultados de las discusiones y de las recomendaciones definiendo responsables de la acción esperada. Es necesario resaltar la necesidad de anotar las causas, las consecuencias de las desviaciones, las acciones de control que han sido recomendadas, el responsable y la fecha esperada de ejecución, ya que algunas veces el equipo tiende a considerar innecesario hacerlo. Es importante hacer las anotaciones. En el futuro puede

necesitarse hallar el por qué de alguna recomendación, legalmente puede ser requerido; pueden utilizarse para demostrar acciones, servirán de guías para trabajos o capacitaciones posteriores. Cada plano e información usada deberá quedar registro, debe ser firmada por el equipo, y archivada.

6. TRABAJO DE SEGUIMIENTO: El trabajo de seguimiento es diverso y normalmente incluye llegar a aclaraciones de dudas, a cambio de especificaciones, cambios en el proceso y desarrollo de programas de entrenamiento y capacitación. También debe realizarse un seguimiento a alteraciones o cambios de equipos, o preparación de procedimientos. La responsabilidad del seguimiento es compartida por todos los miembros del equipo, pero cada uno con una asignación específica. Las ejecuciones de las acciones también tendrán sus propios responsables.

1.2.9 PALABRAS GUÍAS Y SUS SIGNIFICADOS

| PALABRAS GUIAS Y LOS SIMBOLOS | APLICACIÓN A LA MATERIA PRIMA | APLICACIÓN A LA ACTIVIDAD DESEADA | OTROS MODOS DE EMPLEO |
|----------------------------------|---|---|---|
| (HACER) | Se define el material prescrito, incluyendo cantidad, composición química y condiciones físicas de entrada. | La actividad prescrita puede ser una actividad principal y una o más actividades menores dependientes. | Otras intenciones, como por ejemplo las fuentes o destinos. |
| NO (HACER) | El material prescrito no está presente, pero no hay material sustituto alguno presente. | La actividad prescrita no ocurre, pero no hay una actividad sustituta directa que tenga lugar. | |
| MAS (HACER) | Una mayor cantidad del material prescrito, por ejemplo, peso o volumen. Hay una condición física más alta, por ejemplo, “una presión más alta.” | Hay una actividad mayor de la prescrita, por ejemplo, mayor rata de flujo, subida de presión, entrada mayor de calor, reacción química más rápida, etc. | |

| | | | |
|---|--|--|---|
| MENOS (HACER) | Hay una cantidad inferior del material prescrito, por ejemplo, peso o volumen. Hay una condición física inferior, por ejemplo, “presión más baja”. | Hay una actividad menor que la prescrita, por ejemplo, rata de flujo menor, entrada de calor menor, reacción química más lenta, etc. | |
| ASI COMO TAMBIEN O ADICIONAL (HACER) | Hay presente un componente adicional, por ejemplo, una impureza extra, o hay una condición física adicional, por ejemplo, material caliente en lugar de ambiental. Hay una condición física que está tanto por encima como por debajo de lo deseado, por ejemplo presión que oscila por encima y por debajo de lo aceptable. | Hay una actividad adicional a lo prescrito, por ejemplo, “caliente y vibra”, cuando solo existe el propósito de calentamiento, o reacciones secundarias no deseadas, o en general, algo que también ocurre pero que no es deseado. | Son tomados de fuentes adicionales no deseadas o van a destinos adicionales no deseados, por ejemplo, escape por los sellos, o alimentación que se toma de una fuente adicional equivocada, o producto que va a un destino adicional al definido. |
| PARTE DE (HACER) | A uno o más de los componentes les falta un material definido; faltan las impurezas de grado normal. Hace falta cierta condición física, por ejemplo, la materia prima no está a la presión requerida. | Falta una o más actividades deseadas, por ejemplo, “transfiere, pero no calienta”, deseándose ambas cosas, o “bombea pero no mezcla”, siendo necesarias ambas actividades. | Son tomadas de la fuente prescrita, pero falta uno de los componentes. |

| | | | |
|---|---|--|--|
| <p>LO CONTRARIO (HACER)</p> | <p>Opuesto lógico al material deseado, por ejemplo "Ácido" en lugar de "Alcalino". Opuesto lógico de una condición física de entrada, por ejemplo, "Caliente" en lugar de "Frío".</p> | <p>Opuesto lógico a la actividad deseada, por ejemplo, una reacción química contraria, un cambio contrario de una condición física, por ejemplo, "Enfriar" en lugar de "Calentar", "Condensar" en lugar de "Evaporar", dirección contraria de la corriente</p> | <p>Es tomada del destino hacia la fuente prescrita en lugar de ser lo contrario, posiblemente por la ruta indirecta.</p> |
| <p>OTRA COSA QUE (HACER)</p> | <p>Un material totalmente diferente, sin nada del material deseado presente. Una condición física totalmente diferente, como por ejemplo, "Espuma" en lugar de "En Reposo". La fase equivocada, como por ejemplo "Vapor" en lugar de "Líquido".</p> | <p>Una actividad totalmente diferente, como por ejemplo, "contamina" en lugar de "transferir", "hace ruido y vibra" en vez de "bombear", o "abre o cierra" en vez de "controlar"</p> | <p>Todo el material se ha tomado de fuentes totalmente diferentes y va para destinos totalmente diferentes.</p> |

2. HERRAMIENTAS DE DESEMPEÑO (DURANTE)

2.1 RCM

El mantenimiento centrado en Confiabilidad (RCM), es actualmente una de las herramientas más importantes para mejoras en la disponibilidad y mantenibilidad de equipos, existen muchos autores que escriben acerca de éste. Sin embargo, el Curso de Aladon RCM I y RCM II, lo encontramos con el lenguaje más explícito y claro para el lector, sin desconocer el estándar SAE JA1011 y otros aportes realizados por otras instituciones también referenciados en esta sección.

2.1.1 INTRODUCCIÓN AL MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD

(RCM): Durante los últimos veinte años, el Mantenimiento ha cambiado, quizás más que cualquier otra disciplina gerencial. Estos cambios se deben principalmente al importante aumento en número y variedad de los activos físicos (planta, equipamiento, edificaciones) que deben ser mantenidos en todo el mundo, diseños más complejos, nuevos métodos de mantenimiento, y una óptica cambiante en la organización del mantenimiento y sus responsabilidades.

El Mantenimiento también está respondiendo a expectativas cambiantes. Éstas incluyen una creciente toma de conciencia para evaluar hasta qué punto las fallas en los equipos afectan a la seguridad , al medio ambiente y a la calidad del

producto; conciencia de la relación entre el mantenimiento y la calidad del producto, y la presión de alcanzar una alta disponibilidad en la planta y mantener controlados el costo.

Estos cambios están llevando al límite las actitudes y habilidades en todas las ramas de la industria. El personal de Mantenimiento se ve obligado a adoptar maneras de pensar completamente nuevas, y actuar como ingenieros y como gerentes. Al mismo tiempo las limitaciones de los sistemas de mantenimiento se hacen cada vez más evidentes, sin importar cuánto se haya informatizado.

En este capítulo, se pretende describir una filosofía que provee ciertamente dicha estructura, llamada Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, o RCM. (Reliability Centered Maintenance). RCM aplicado correctamente tiene el potencial de transformar las relaciones entre quienes lo usan, los activos físicos existentes, y las personas que los operan. A su vez permite que nuevos bienes o activos sean puestos en servicio con gran efectividad, rapidez y precisión.

2.1.2 EVOLUCIÓN HISTÓRICA:⁵ El RCM es uno de los procesos desarrollados durante 1960 y 1970 con la finalidad de ayudar a las personas a determinar las

⁵ SOPORTE & CIA. LTDA. El camino hacia el RCM – Mantenimiento Centrado en confiabilidad.

políticas para mejorar las funciones de los activos físicos y manejar las consecuencias de sus fallas. De éstos procesos el RCM es el más efectivo.⁶

A mediados de 1970, el gobierno de los Estados Unidos de América quiso saber más acerca de la filosofía moderna en materia de mantenimiento de aeronaves. Y solicitaron un reporte de éste a la industria aérea. Dicho reporte fue escrito por Stanley Nowlan y Howard Heap de United Airlines. Ellos lo titularon “RELIABILITY CENTERED MAINTENANCE” (MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD), fue publicado en 1978, y aún sigue siendo uno de los documentos más importantes en la historia del manejo de los activos físicos. Está disponible en el Servicio de Información Técnica Nacional del Gobierno de los estados Unidos de América, en Springfield, Virginia. Este reporte fue la culminación de 20 años de investigación y experimentación, con la aviación comercial de los Estados Unidos de América, un proceso que produjo inicialmente el documento presentado en 1968, llamado MSG – 1, Manual: Evaluación del Mantenimiento y Desarrollo del Programa, y el documento presentado en 1970: MSG – 2 Planeación de Programas de Mantenimiento para Fabricantes / Aerolíneas, ambos documentos fueron patrocinados por la ATA (Air Transport Association of America – Asociación de Transportadores Aéreos de los EEUU).

⁶ IBID, Pág. 187

El reporte de Nowlan y Heap representó un considerable avance en la filosofía MSG 2 y fue usado como base para el MSG 3, el cual fue promulgado en 1980: Documento para la Planeación de programas de Mantenimiento para Fabricantes / Aerolíneas. El MSG 3 fue influenciado por el libro de Nowlan y Heap (1978), el MSG 3 ha sido revisado tres veces, la primera vez en 1988, de nuevo en 1993, y la tercera en 2001. Una próxima revisión será promulgada en el presente año.⁷

Hasta el presente es usada para desarrollar programas de mantenimiento prioritarios al servicio para nuevos tipos de aeronaves (incluyendo recientemente el boeing 777 y el Airbus 330/340). Copias de MSG 3.2001 se encuentran en Air Transport Association, Washington, DC.

El reporte de Nowlan y Heap ha sido desde entonces usado como base para varios modelos de RCM de tipo militar, y para aquellas actividades no relacionadas con la aviación.

Otros especialistas en la formulación de estrategias se interesaron en la aplicación del RCM en industrias diferentes a la aviación. Dentro de éstos, el principal fue John Moubray y sus asociados.

⁷ IBID, Pág 187

Este grupo trabajó inicialmente con el RCM en industrias mineras y de manufactura en Sudáfrica bajo la asesoría de Stan Nowlan, y luego se ubicaron en el Reino Unido. Desde allí, sus actividades se han expandido para cubrir la aplicación de RCM en casi todos los campos del esfuerzo humano organizado, abarcando más de 42 países. Moubray y sus asociados se han fundamentado en el trabajo de Nowlan mientras mantienen su enfoque original en la seguridad y confiabilidad del equipo. Por ejemplo, incorporaron temas ambientales al proceso de toma de decisiones en materia de RCM, clasificaron las formas en las cuales las funciones del equipo deberían ser definidas, desarrollaron reglas más precisas para seleccionar labores de mantenimiento e intervalos para las labores y también incorporaron directamente criterios de riesgo cuantitativo a un grupo de intervalos para labores en busca de fallas. Su versión mejorada del RCM se conoce actualmente como RCM2.⁸

RCM está posicionándose rápidamente en la Tercera Generación de los mantenimientos, pero ésta sólo puede ser vista en perspectiva, y a la luz de la Primera y Segunda generación.

⁸ IBID, Pág 187

Primera Generación: La Primera Generación cubre el período que se extiende hasta la Segunda Guerra Mundial. En esos días la industria no estaba altamente mecanizada, por lo que el tiempo de parada de máquina no era de mayor importancia. Esto significaba que la prevención de las fallas en los equipos no era una prioridad para la mayoría de los gerentes. A su vez la mayor parte de los equipos eran simples, y una gran cantidad era sobredimensionado. Estas características los hacían confiables y fáciles de reparar. Como resultado no había necesidad de un mantenimiento sistemático más allá de una simple rutina de limpieza, servicio y lubricación y un desarrollo de habilidades para su restauración.

Segunda Generación: Durante la Segunda Guerra Mundial todo cambió drásticamente. La presión de los tiempos de guerra aumentó la demanda de todo tipo de bienes, al mismo tiempo que decaía abruptamente el número de los trabajadores industriales. Esto llevó a un aumento en la mecanización. Ya en los años '50 había aumentado la cantidad y complejidad de todo tipo de máquinas, y la industria estaba empezando a depender de ellas.

Al incrementarse esta dependencia, se centró la atención en el tiempo de parada de máquina. Esto llevó a la idea de que las fallas en los equipos deberían ser prevenidas, llegando al concepto de mantenimiento preventivo. En la década del sesenta esto consistió principalmente en reparaciones mayores a intervalos regulares prefijados.

El costo del mantenimiento comenzó a elevarse rápidamente en relación a otros costos operacionales. Esto llevó al crecimiento de sistemas de planeamiento y control del mantenimiento. Estos ciertamente ayudaron a tener el mantenimiento bajo control y han sido establecidos como parte de la práctica del mantenimiento. Por último, la suma de capital ligado a activos fijos junto con un elevado incremento en el costo del capital, llevó a la gerentes de las empresas a buscar la manera de maximizar la vida útil de estos activos/ bienes.

Tercera Generación: Desde mediados de la década del setenta el proceso de cambio en la industria ha adquirido aún más impulso. Los cambios han sido clasificados en: nuevas expectativas, nuevas investigaciones, y nuevas técnicas.

El tiempo parada de máquina siempre ha afectado la capacidad de producción de los activos físicos al reducir la producción, aumentar los costos operacionales, e interferir con el servicio al cliente. En las décadas de los sesenta y setenta esto ya era una preocupación en las áreas de minería, manufacturas, y transporte. En la manufactura los efectos del tiempo de parada de máquina fueron agravados por la tendencia mundial hacia sistemas "**just-in-time**", donde los reducidos inventarios de material en proceso hacen que una pequeña falla en un equipo probablemente hiciera parar toda la planta.

Actualmente el crecimiento en la mecanización y la automatización han tomado a la confiabilidad y a la disponibilidad en factores claves en sectores tan diversos como el cuidado de la salud, el procesamiento de datos, las telecomunicaciones, la administración de edificios y el manejo de las organizaciones.

Una mayor automatización también significa que más y más fallas afectan nuestra capacidad de mantener parámetros de calidad satisfactorios. Esto se aplica tanto para parámetros de servicio como para la calidad del producto. Por ejemplo, hay fallas en equipos que pueden afectar el control del clima en los edificios y la puntualidad de las redes de transporte, así como interferir con el logro de las tolerancias deseadas en la producción.

◆ **Nuevas Expectativas y Exigencias:** La figura 3 muestra la evolución de las expectativas de mantenimiento.

FIGURA 3. EXPECTATIVAS DE MANTENIMIENTO CRECIENTES

| | | | | | | | |
|---------------------------|------|---------------------------------|------|------|--------------------------------|-------|--|
| | | | | | Tercera Generación | | |
| | | Segunda Generación | | | Mayor disponibilidad y | | |
| Primera Generación | | Mayor disponibilidad de | | | confiabilidad | | |
| | | La planta. | | | Mayor costo-efectividad | Mayor | |
| | | Mayor vida útil de los equipos. | | | seguridad | | |
| Reparar en caso de avería | | Más bajos costos | | | No deteriorar el medio | | |
| | | | | | ambiente | | |
| | | | | | Mejor calidad de los productos | | |
| | | | | | Mayor duración de los equipos | | |
| 1940 | 1950 | 1960 | 1970 | 1980 | 1990 | 2000 | |

Cada vez aparecen más fallas que acarrear serias consecuencias para el medio ambiente o la seguridad. La dependencia del manejo integral de la seguridad, el medio ambiente, la calidad y la seguridad de las personas, cobra ahora una nueva magnitud que va más allá del costo, y que se toma una cuestión de supervivencia de la organización.

Al mismo tiempo que crece nuestra dependencia de los activos físicos, crece también el costo de tenerlos y operarlos. Para asegurar la amortización de la inversión que representan, deben funcionar eficientemente siempre que se los necesite.

Por último el costo de mantenimiento aún está ascendiendo, en términos absolutos y como proporción del gasto total. En algunas industrias representa ahora el segundo ítem más alto, o hasta el más alto costo operativo. En consecuencia, en sólo treinta años ha pasado a la primera prioridad en el control de costos.

◆ **Nuevas Investigaciones:** Las nuevas investigaciones están cambiando muchas de nuestras creencias más profundas referidas a la relación entre edad y las fallas. En particular, parece haber cada vez menos conexión entre la edad de la mayoría de los activos y la probabilidad de que éstos fallen.

La figura 4 muestra cómo en un principio la idea era simplemente que a medida que los activos envejecían eran más propensos a fallar. Una creciente conciencia de la "mortalidad infantil" llevó a la Segunda Generación a creer en la curva de "bañera".

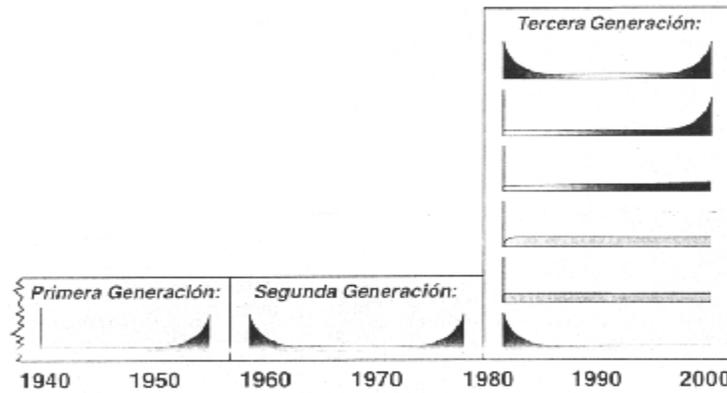
Sin embargo, las investigaciones en la Tercera Generación revelan no uno sino varios patrones de falla que realmente ocurren en la práctica y que le dan una mayor cobertura al concepto de la bañera. Este tema abordado en detalle más adelante.

◆ **Nuevos desarrollos tecnológicos:** Nuevos conceptos y técnicas de mantenimiento han sido desarrollados en los últimos quince años, y emergen aún más cada semana.

La Figura 5 muestra cómo ha crecido el énfasis en los clásicos sistemas administrativos y de reparaciones mayores para incluir nuevos desarrollos en diferentes áreas. Los nuevos desarrollos incluyen:

1. Herramientas de soporte para la toma de decisiones, tales como el estudio de riesgo, análisis de modos de falla y sus efectos y sistemas expertos.
2. Nuevos métodos de mantenimiento, tal como el monitoreo de condición, diseño de equipos, con un mayor énfasis en la confiabilidad y facilidad para el mantenimiento.
3. Un drástico cambio en el modo de pensar de la organización hacia la participación, trabajo en grupo y flexibilidad.

FIGURA 4: PUNTO DE VISTA CAMBIANTE SOBRE LA FALLA DE EQUIPOS



Uno de los mayores desafíos que enfrenta el personal de mantenimiento es no sólo aprender éstas técnicas sino decidir cuáles valen la pena y cuales no son apropiadas para la organización. Si hacemos elecciones adecuadas es posible mejorar el rendimiento de los activos y al mismo tiempo contener y reducir el costo del mantenimiento. Si hacemos elecciones inadecuadas se crean nuevos problemas mientras empeoran los que ya existen.

FIGURA 5. CAMBIOS EN LAS TÉCNICAS DE MANTENIMIENTO

| | | |
|------------------------------------|---|--|
| <p>4 Primera Generación</p> | <p>3 Segunda Generación</p> | <p>2 Tercera Generación</p> |
| | | <p>Monitoreo de condición.</p> <p>Diseño direccionado a la confiabilidad y facilidad para el mantenimiento.</p> <p>Estudio de riesgos.</p> <p>Computadores pequeños y muy rápidos.</p> <p>Análisis de modos de falla y sus efectos.</p> <p>Sistemas expertos.</p> <p>Trabajo multifacético y en grupos</p> |
| <p>Reparar cuando falla</p> | <p>Reparaciones mayores programadas.</p> <p>Sistemas de planeamiento y control del trabajo.</p> <p>Computadoras grandes y lentas.</p> | <p>1940 1950 1960 1970 1980 1990 2000</p> |

Los desafíos clave que enfrentan los gerentes de mantenimiento pueden resumirse de esta manera: Seleccionar las técnicas más apropiadas para manejar los distintos procesos de falla, satisfaciendo las expectativas de los dueños de los activos, los usuarios de los activos y la sociedad en general, de la manera más perdurable y efectiva en cuanto a costos, con el apoyo y la cooperación de todas las personas involucradas.

RCM provee un sistema que permite que los usuarios puedan responder a éstos desafíos en forma simple y rápida. Esto se debe a que en ningún momento pierde de vista que el mantenimiento se trata de activos físicos. Si éstos activos no existieran, no existiría la función de mantenimiento. RCM comienza con un amplio repaso base-cero de los requerimientos de mantenimiento de cada activo en su contexto operacional.

En vista de la importancia del RCM nace la necesidad de crear un estándar, para lo cual en 1996 la SAE empezó a trabajar en un modelo afín con el RCM, invitando a un grupo de representantes de la aviación, de la armada estadounidense y comunidades de naves para que le ayudaran a desarrollar una norma para programas de mantenimiento planeados. A finales de 1997, se le unió a este grupo un número de representantes principales del RCM provenientes de la industria. En esta ocasión, se dieron cuenta que era mejor enfocarse enteramente en el RCM, el grupo encontró el mejor enfoque para ésta norma y en 1999,

completó el borrador de la norma y la presentaron a la SAE para ser sometida a votación.⁹

La norma aprobada por la SAE no representa un proceso RCM estándar. Su título es “Criterios de Evaluación para Procesos de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM)”. Ésta norma presenta criterios contra los cuales se puede comparar un proceso: Si el proceso satisface los criterios, el usuario puede, con confianza, llamarlo un “proceso RCM”. Si los criterios no lo satisfacen, no debería llamarse “Proceso RCM” Esto no necesariamente significa que los procesos que no cumplen con la norma SAE RCM no sean procesos válidos para la formulación de estrategias de mantenimiento, simplemente significa que el término RCM no debería ser aplicado a tales procesos.¹⁰

El subcomité SAE RCM terminó su trabajo sobre la norma en Febrero de 1999, después de la aprobación inicial por parte del comité de asistencia de la SAE en mayo de 1999, la norma fue aprobada por la Junta de Normas Técnicas de la SAE y el Consejo Aeroespacial de la SAE en Septiembre de 1999. la norma no es un documento extenso. Incluyendo el prólogo, el glosario y la bibliografía, sólo contiene 4000 palabras en aproximadamente 10 páginas.

⁹ IBID, Pág 187

¹⁰ IBID, Pág 187

El resto de este capítulo habla de RCM en más detalle. Comienza por explorar el significado de "Mantenimiento", y continúa definiendo RCM para luego describir los siete pasos fundamentales en la aplicación de este proceso.

2.1.3 MANTENIMIENTO, RCM y RCM2: Desde el punto de vista de ingeniería hay dos elementos que hacen al manejo de cualquier activo físico: debe ser mantenido y en ocasiones debe ser modificado. Los grandes diccionarios definen mantener, cómo conservar cada cosa en su ser (Real Academia Española) causar que continúe (Oxford), o conservar en el estado.

Cuando nos disponemos a mantener algo, ¿Qué es eso que deseamos causar que continúe?, ¿Qué estado existente deseamos preservar?

La respuesta a estas preguntas está dada por el hecho de que se espera que todo activo físico cumpla una función o funciones específicas. Por ende al mantener un activo, el estado que debemos preservar es aquél en el que continúe haciendo lo que los usuarios quieran que haga.

Mantenimiento: asegurar que los activos físicos continúen haciendo lo que los usuarios quieren que hagan.

Los requerimientos de los usuarios, van a depender de cómo y cuándo se utilice el activo (contexto operacional). Esto lleva a la siguiente definición formal de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad:

Mantenimiento Centrado en Confiabilidad: un proceso utilizado para determinar los requerimientos de mantenimiento de cualquier activo físico en su contexto operacional.

A la luz de la anterior definición de mantenimiento, una definición más completa de RCM sería "un proceso utilizado para determinar qué debe hacerse para asegurar que todo activo físico continúe haciendo lo que sus usuarios quieran que haga en su actual contexto operacional".

RCM2 es un proceso usado para identificar las formas en las cuales el sistema puede fallar en el cumplimiento de esas expectativas (estados de falla), seguidos por un FMEA (Análisis de los Modos y Efectos de Falla), para identificar todos los eventos que son razonablemente las probables causas de cada estado de falla. Finalmente, el proceso RCM2 busca identificar una apropiada política del manejo de fallas para tratar cada modo de falla a la luz de sus consecuencias y características técnicas. Las opciones de la política del manejo de fallas incluyen:

mantenimiento predictivo, preventivo, búsqueda de fallas, cambio del diseño o configuración del sistema, entre otros.¹¹

2.1.4 LAS SIETE PREGUNTAS BÁSICAS DEL RCM: El proceso de RCM formula siete preguntas acerca del activo o sistema que se intenta analizar:

- ◉ ¿Cuáles son las funciones y los parámetros de funcionamiento asociado al activo en su actual contexto operacional?
- ◉ ¿De qué manera falla en satisfacer sus funciones?
- ◉ ¿Cuál es la causa de cada falla funcional?
- ◉ ¿Qué sucede cuando ocurre cada falla?
- ◉ ¿De qué manera impacta cada falla?
- ◉ ¿Qué puede hacerse para predecir prevenir o cada falla?
- ◉ ¿Que debe hacerse si no se encuentra una tarea proactiva adecuada?

Estas preguntas son desarrolladas brevemente en los párrafos siguientes.

2.1.5 Funciones vs. Parámetros de Funcionamiento: Antes de poder definir qué proceso aplicar para determinar qué debe hacerse para que cualquier activo

¹¹ IBID, Pág 187

físico continúe haciendo aquello que sus usuarios quieren que haga en su contexto operacional, necesitamos hacer dos cosas:

- ◉ Determinar qué es lo que sus usuarios quieren que haga
- ◉ Asegurar que sea capaz de realizar aquello que sus usuarios quieren que haga.

Por eso el primer paso en el proceso de RCM es definir las funciones de cada activo en su contexto operacional, junto con los parámetros de funcionamiento deseados. Lo que los usuarios esperan que sea realizado por los activos puede ser dividido en dos categorías:

- ◉ **Funciones primarias:** resumen el por qué de la adquisición del activo en primera instancia. Esta categoría de funciones cubre temas como velocidad, producción, capacidad de carga o almacenaje, calidad de producto y servicio al cliente.
- ◉ **Funciones secundarias:** indican qué se espera de cada activo que haga más allá de simplemente cubrir sus funciones primarias. Los usuarios también tienen expectativas relacionadas con las áreas de seguridad, control, contención, confort, integridad estructural, economía, protección, eficiencia operacional, cumplimiento de regulaciones ambientales, y hasta la apariencia del activo.

Los usuarios de los activos generalmente están lejos de conocer los aportes financieros y físicos que el activo hace para el bienestar de la organización como un todo. Por ello es esencial que estén involucrados los usuarios en el proceso de RCM desde el comienzo.

Si es hecho correctamente, este paso sólo toma alrededor de un tercio del tiempo que implica un análisis del RCM completo. Además hace que el grupo que realiza el análisis logre un aprendizaje considerable (muchas veces acerca de cómo realmente funciona el equipo). Los objetivos del mantenimiento son definidos por las funciones y expectativas de funcionamiento asociadas al activo en cuestión.

¿Cómo puede el mantenimiento alcanzar los objetivos?

El único hecho que puede hacer que un activo no pueda desempeñarse conforme a los parámetros requeridos por su usuario es alguna clase de falla. Esto sugiere que el mantenimiento cumple sus objetivos al adoptar un abordaje apropiado en el manejo de una falla. Sin embargo, antes de poder aplicar herramientas apropiadas para el manejo de una falla, necesitamos identificar qué fallas pueden ocurrir.

El proceso de RCM estructura el manejo de la falla en dos niveles:

- ◉ En primer lugar, identifica las circunstancias que llevan a la falla
- ◉ Luego se pregunta qué eventos pueden causar que el activo falle.

En el mundo de RCM, los estados de falla son conocidos como fallas funcionales porque ocurren cuando el activo no puede cumplir una función de acuerdo al parámetro de funcionamiento que el usuario considera aceptable.

Sumado a la incapacidad total de funcionar, esta definición abarca fallas parciales en las que el activo todavía funciona pero con un nivel de desempeño inaceptable (incluyendo las situaciones en las que el activo no puede mantener los niveles de calidad o precisión).

Pero éstas sólo pueden ser claramente identificadas luego de haber definido las funciones y parámetros de funcionamiento del activo.

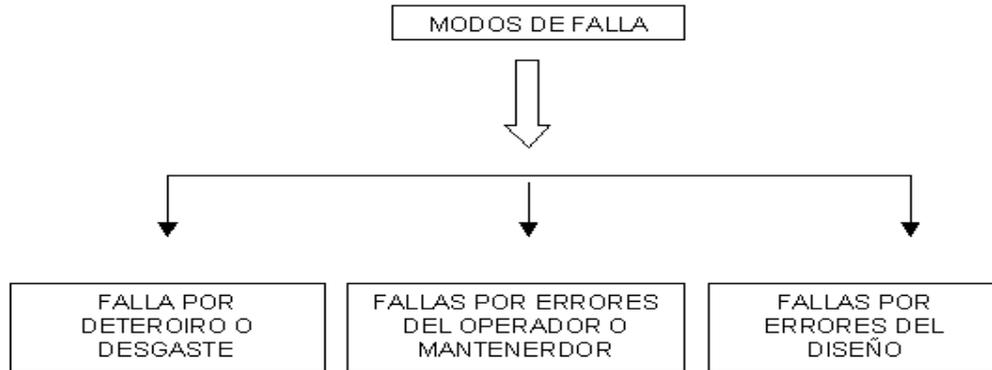
2.1.6 Modos de Falla: Como se mencionó en el párrafo anterior, una vez que se ha identificado la falla funcional, el próximo paso es tratar de identificar todos los hechos que pueden haber causado cada estado de falla. Estos hechos se denominan modos de falla. Los modos de falla posibles incluyen aquellos que:

- ✓ Han ocurrido en equipos iguales o similares operando en el mismo contexto.
- ✓ Actualmente están siendo prevenidas por regímenes de mantenimiento existentes.

- ✓ Que aún no han ocurrido pero son consideradas altamente posibles en el contexto en cuestión.

En resumen se deben incluir todos los modos de falla tal como se indica en la figura 6.

FIGURA 6. MODOS DE FALLA



2.1.7 Efectos de Falla: El cuarto paso en el proceso de RCM consiste en hacer un listado de los efectos de falla, que describe lo que ocurre cuando acontece cada modo de falla. Esta descripción debe incluir toda la información necesaria para apoyar la evaluación de las consecuencias de la falla, tal como:

- ✓ Qué evidencia existe (si la hay) de que la falla ha ocurrido
- ✓ De que modo representa una amenaza para la seguridad o el medio ambiente (si es que la representa).

- ✓ De qué manera afecta a la producción o a las operaciones (si las afecta)
- ✓ Qué daños físicos (si los hay) han sido causados por la falla
- ✓ Qué debe hacerse para reparar la falla

El proceso de identificar funciones, fallas funcionales, modos de falla, y efectos de falla (FMEA) trae asombrosas y muchas veces apasionantes oportunidades de mejorar el desempeño y la seguridad, así como también de eliminar el desperdicio.

2.1.8 Consecuencias de la Falla: Un análisis detallado de la empresa industrial promedio probablemente muestre entre tres y diez mil posibles modos de falla. Cada una de éstas fallas afecta a la organización de algún modo, pero en cada caso, los efectos son diferentes. Pueden afectar operaciones. También pueden afectar a la calidad del producto, el servicio al cliente, la seguridad o el medio ambiente. Y todas tomarán tiempo y costarán dinero para ser reparadas.

Son estas consecuencias las que fuertemente influyen el intento de prevenir cada falla. En otras palabras, si una falla tiene serias consecuencias, haremos un gran esfuerzo para intentar evitarla. Por otro lado, si tiene consecuencias leves o no las tiene, quizás decidamos no hacer más mantenimiento de rutina que una simple limpieza y lubricación básicas.

Un punto fuerte de RCM es que reconoce que las consecuencias de las fallas son más importantes que sus aspectos técnicos. De hecho reconoce que la única razón para hacer cualquier tipo de mantenimiento proactivo no es evitar las fallas sino evitar o reducir las consecuencias de las fallas. El proceso de RCM clasifica estas consecuencias en cuatro grupos, de la siguiente manera:

- ◉ **Consecuencias de fallas ocultas:** las fallas ocultas no tienen un impacto directo, pero exponen a la organización a fallas múltiples con consecuencias serias y hasta catastróficas. (La mayoría están asociadas a sistemas de protección sin seguridad inherente)

- ✓ **Consecuencias ambientales y para la seguridad:** una falla tiene consecuencias para la seguridad si es posible que cause daño lesión o la muerte a alguna persona. Tiene consecuencias ambientales si infringe alguna normativa o reglamento ambiental tanto corporativo como regional, nacional o internacional.

- ✓ **Consecuencias Operacionales:** Una falla tiene consecuencias operacionales si afecta la producción (cantidad, calidad del producto, atención al cliente, o costos operacionales) además del costo directo de la reparación.

- ✓ **Consecuencias No-Operacionales:** Las fallas que caen en ésta categoría no afectan a la seguridad ni la producción, sólo se relacionan con el costo directo de la reparación.

Esto contribuye a incorporar a la seguridad, al medio ambiente y la calidad en la corriente principal de gestión del mantenimiento. El proceso de evaluación de las consecuencias también cambia el énfasis de la idea de que toda falla es negativa y debe ser prevenida. De esta manera focaliza la atención sobre las actividades de mantenimiento que tienen el mayor efecto sobre el desempeño de la organización, y resta importancia a aquellas que tienen escaso efecto. También nos alienta a pensar de una manera más amplia acerca de diferentes maneras de manejar las fallas, más que concentrarnos en prevenir fallas. Las técnicas de manejo de fallas se dividen en dos categorías:

- ✓ **Tareas proactivas:** estas tareas se emprenden antes de que ocurra una falla, para prevenir que el ítem llegue al estado de falla. Abarcan lo que se conoce tradicionalmente como mantenimiento "predictivo" y "preventivo", aunque veremos luego que RCM utiliza los términos reacondicionamiento cíclico, sustitución cíclica, y mantenimiento a condición.

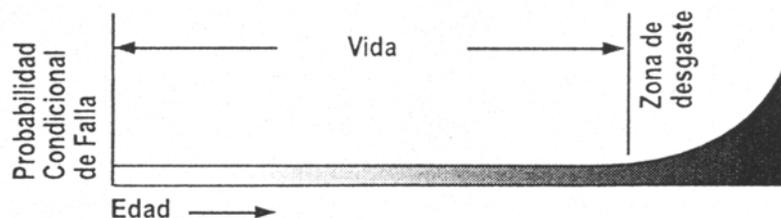
- ✓ **Acciones a falta de:** éstas tratan directamente con el estado de falla, y son elegidas cuando no es posible identificar una tarea proactiva efectiva. Las

acciones "a falta de" incluyen búsqueda de falla, rediseñar, y mantenimiento a rotura, (correctivo)

2.1.9 Acciones Proactivas: Mucha gente todavía cree que la mejor manera de optimizar la disponibilidad de la planta es hacer algún tipo de mantenimiento proactivo de rutina. El pensamiento de la Segunda Generación sugería grandes reparaciones, o reposición de componentes a intervalos-fijos. La figura 7 muestra la perspectiva de la falla a intervalos regulares.

La figura 7 se basa en la presunción de que la mayoría de los equipos operan confiablemente por un período "X", y luego se desgastan. El pensamiento clásico sugiere que los registros extensivos acerca de las fallas nos permiten determinar y planear acciones preventivas un tiempo antes de que ellas ocurran.

FIGURA 7. LA PERSPECTIVA TRADICIONAL DE LA FALLA



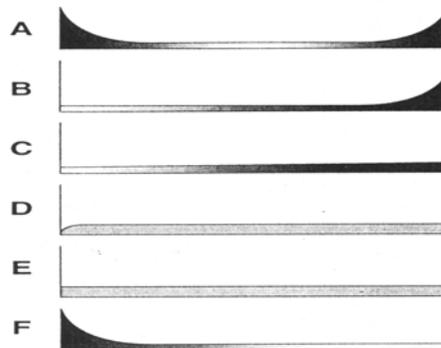
Este patrón es cierto para algunos tipos de equipos simples, y para algunos ítem complejos con modos de falla dominantes. En particular las características de

desgaste se encuentran a menudo en casos en los que el equipo tiene contacto directo con el producto. Las fallas relacionadas con la edad frecuentemente van asociadas a la fatiga, corrosión, abrasión y evaporación.

Sin embargo, los equipos en general son mucho más complejos de lo que eran hace veinte años atrás. Esto ha traído aparejado sorprendentes cambios en los patrones de falla, como lo muestra la figura 8. Los gráficos muestran la probabilidad condicional de falla con relación a la edad operacional para una variedad de elementos mecánicos y eléctricos.

El patrón A es la ya conocida curva de la "bañera". Comienza con una gran incidencia de fallas (llamada mortalidad infantil), seguida por un incremento constante o gradual de la probabilidad condicional de falla, y por último una zona de desgaste. El patrón B muestra una probabilidad condicional de falla que es constante o de lento incremento, y que termina en una zona de desgaste (igual que la Figura 7).

FIGURA 8. SEIS PATRONES DE FALLA



El patrón C muestra una probabilidad condicional de falla que crece lentamente, pero no tiene una edad de desgaste claramente identificable. El patrón D muestra una baja probabilidad condicional de falla cuando el equipo es nuevo o recién salido de la fábrica y luego un veloz incremento hasta un nivel constante, mientras que el patrón E muestra una probabilidad condicional de falla constante a todas las edades por igual (falla al azar). El patrón F comienza con una alta mortalidad infantil que finalmente cae a una probabilidad de falla constante o que asciende muy lentamente.

Estudios realizados en aeronaves comerciales demostraron que un 4% de los elementos correspondían al patrón A, un 2% al B, un 5% al C, un 7% al D, un 14% al E, y no menos de un 68% al patrón F. (El número de veces que estos patrones ocurren en aeronaves no es necesariamente el mismo que en el área industrial, pero no cabe duda de que a medida que los elementos se hacen más complicados, encontramos más y más patrones E y F). Estos hallazgos

contradicen la creencia de que siempre hay conexión entre la confiabilidad y la edad operacional.

Lo anterior dio origen a la idea de que cuanto más seguido un ítem es reparado, menos posibilidades tiene de fallar. Actualmente esto es cierto en muy pocos casos. A menos que exista un modo de falla dominante relacionado con la edad, los límites de edad tienen que ver poco o nada con mejorar la confiabilidad de los componentes complejos. De hecho las reparaciones pueden en realidad aumentar los promedios de falla generales al introducir la mortalidad infantil en sistemas que de otra manera serían estables.

La toma de conciencia de estos hechos ha llevado a algunas organizaciones a abandonar por completo la idea de mantenimiento proactivo. Y esto puede que sea lo más acertado para fallas con consecuencias menores. Pero cuando las consecuencias de las fallas son importantes, algo debe hacerse para prevenir o predecir las fallas, o al menos para reducir las consecuencias. Esto nos trae nuevamente a la cuestión de las tareas proactivas. Como ya mencionamos anteriormente RCM divide a las tareas proactivas en tres categorías:

- ✓ Tareas de reacondicionamiento cíclicas
- ✓ Tareas de sustitución cíclicas
- ✓ Tareas a condición

Tareas de reacondicionamiento y sustitución cíclicas: El reacondicionamiento cíclico implica la reparación de un componente o un conjunto de partes antes de un límite de edad específico sin importar su condición en ese momento. De manera parecida, las tareas de sustitución cíclica implican sustituir un componente antes de un límite de edad específico, más allá de su condición en ese momento. En conjunto estos dos tipos de tareas son conocidos generalmente como mantenimiento preventivo. Solían ser los tipos de mantenimiento proactivo más ampliamente usados. Sin embargo, debido a las razones mencionadas anteriormente, son mucho menos usados ahora de lo que eran veinte años atrás.

Tareas a condición: El crecimiento de nuevas formas de manejo de falla se debe a la continua necesidad de prevenir ciertos tipos de falla, y la creciente ineficacia de las técnicas clásicas para hacerlo. La mayoría de las nuevas técnicas se basan en el hecho de que la mayoría de las fallas dan algún tipo de advertencia de que están por ocurrir. Estas advertencias se denominan fallas potenciales, y se definen como condiciones físicas identificables que indican que una falla funcional está por ocurrir o está en el proceso de ocurrir.

Las nuevas técnicas son utilizadas para detectar fallas potenciales y para poder actuar evitando las posibles consecuencias que surgirían si se transformasen en fallas funcionales. Se llaman tareas a condición porque los componentes se dejan en servicio a condición de que continúen alcanzando los parámetros de

funcionamiento deseados. (El mantenimiento a condición incluye el mantenimiento predictivo, mantenimiento basado en la condición y monitoreo de condición).

Si son utilizadas correctamente, las tareas a condición son una muy buena manera de manejar las fallas, pero a la vez pueden constituir una costosa pérdida de tiempo. RCM permite tomar estas decisiones con mucha confianza.

Acciones "a falta de": RCM reconoce tres grandes categorías de acciones a falta de:

- ◉ **Búsqueda de fallas:** las tareas de búsqueda de falla implican revisar las funciones periódicamente para determinar si han fallado (mientras que las tareas basadas en la condición implican revisar si algo está por fallar)

- ◉ **Rediseñar:** rediseñar implica hacer cambios de una vez a las capacidades iniciales de un sistema. Esto incluye modificaciones al equipo y también cubre los "cambios de una sola vez" a los procedimientos.

- ◉ **Mantenimiento no programado:** como su nombre lo indica, aquí no se hace esfuerzo alguno en tratar de anticipar o prevenir los modos de falla a los que se aplica. De este modo se deja que la falla simplemente ocurra, para luego repararla. Esta tarea también es llamada mantenimiento "a rotura".

2.1.10 El proceso de selección de tareas de RCM: Un punto fuerte del RCM es la manera en que provee criterios simples, precisos y fáciles de entender, para decidir cuál de las tareas proactivas es técnicamente factible.

Si una tarea proactiva es técnicamente factible o no, depende de las características técnicas de la tarea y de la falla que pretende prevenir. Si merece la pena hacerlo o no depende de la medida en que maneja las consecuencias de la falla. De no hallarse una tarea proactiva que sea técnicamente factible y que valga la pena hacerse, entonces debe tomarse una acción "a falta de" adecuada. La esencia del proceso de selección de tareas es el siguiente:

- ⦿ Para fallas ocultas, la tarea proactiva vale la pena si reduce significativamente el riesgo de falla múltiple asociado con esa función a un nivel tolerable. Si esto no es posible, debe realizarse una tarea de búsqueda de falla. De no hallarse una tarea de búsqueda de falla que sea adecuada, la decisión "a falta de" secundaria es que el componente pueda ser rediseñado (dependiendo de las consecuencias de la falla múltiple).

- ⦿ Para fallas con consecuencias ambientales o para la seguridad, una tarea proactiva sólo vale la pena si por sí sola reduce el riesgo de la falla a un nivel muy bajo, o directamente lo elimina. Si no puede encontrarse una tarea que reduzca el riesgo a niveles aceptablemente bajos, entonces el componente debe ser

rediseñado o debe modificarse el proceso para reducir el nivel de riesgo y en simultáneo su probabilidad de ocurrencia.

- ◉ Si la falla tiene consecuencias operacionales, una tarea proactiva sólo vale la pena si el costo total de realizarlo a lo largo de un cierto período de tiempo es menor al costo de las consecuencias operacionales y el costo de la reparación en el mismo período de tiempo. En otras palabras, la tarea debe tener justificación en el terreno económico. Si no se justifica, la decisión "a falta de" inicial es ningún mantenimiento programado. (Si esto ocurre y las consecuencias operacionales siguen siendo inaceptables, entonces la decisión la falta de secundaria es nuevamente el rediseño)

- ◉ Si una falla tiene consecuencias no operacionales sólo merece la pena una tarea proactiva si el costo de la tarea a lo largo de un período de tiempo es menor al costo de reparación en el mismo tiempo. Entonces estas tareas también deben tener justificación en el terreno económico. Si no se justifica, la decisión a falta de inicial es otra vez ningún mantenimiento programado, y si los costos son demasiado elevados entonces la siguiente decisión "a falta de" secundaria es nuevamente el rediseño.

Este enfoque hace que las tareas proactivas sólo se definan para las fallas que realmente lo necesitan, lo que a su vez logra reducciones sustanciales en la carga

de trabajos de rutina. Menos trabajos de rutina también significan que es más probable que las tareas restantes sean realizadas correctamente. Esto, sumado a la eliminación de tareas contraproducentes, lleva a un mantenimiento más efectivo.

Comparemos esto con el enfoque tradicional de políticas de mantenimiento. Tradicionalmente, los requerimientos de mantenimiento de cada activo son definidos en términos de sus características técnicas reales o asumidas, sin considerar las consecuencias de la falla. El plan resultante se utiliza para todos los activos similares, nuevamente sin considerar que se aplican diferentes consecuencias en diferentes contextos operacionales. Esto tiene como resultado un gran número de planes que son desperdiciados, y no porque estén 'mal' en el sentido técnico, sino porque no logran nada en términos de riesgo.

Debemos notar además que el proceso de RCM considera los requerimientos de mantenimiento de cada activo antes de preguntar si sería necesario reconsiderar el diseño. Esto es así simplemente porque el ingeniero de mantenimiento que está a cargo hoy, tiene que mantener el equipo tal como está hoy, y no pensar en lo que quizás sea en algún otro momento en el futuro.

2.1.11 Aplicación del proceso RCM: Antes de comenzar a analizar los requerimientos de mantenimiento de los activos físicos de cualquier organización,

necesitamos saber de qué activos se trata y decidir cuáles de ellos serán sometidos al proceso de revisión de RCM. Esto significa que debe prepararse un registro de planta, si es que no existe ya uno actualmente. De hecho la gran mayoría de las organizaciones industriales poseen hoy en día registros de planta que son adecuados para este propósito.

Planeamiento: Si es aplicado correctamente, RCM logra grandes mejoras en la efectividad del mantenimiento, y lo hace sorprendentemente rápido. Sin embargo, la aplicación exitosa de RCM depende de un meticuloso planeamiento y preparación. Los elementos centrales del proceso de planeamiento son:

- ◉ Decidir qué activos físicos se beneficiarán más con el proceso RCM, y exactamente de qué manera lo harán.
- ◉ Evaluar los recursos requeridos para aplicar el proceso a los activos seleccionados.
- ◉ En los casos en los que los beneficios justifican la inversión, decidir detalladamente quién realizará cada análisis, quién intervendrá, cuándo se hará, dónde y organizar que el personal reciba el entrenamiento apropiado.
- ◉ Asegurar una clara comprensión del contexto operacional de cada activo físico.

Grupos de Análisis: Hemos visto que el proceso RCM enmarca siete preguntas básicas. En la práctica, el personal de mantenimiento no puede responder a todas estas preguntas por sí solo. Muchas de las respuestas, si no la mayoría, sólo las puede dar personal de producción o de operaciones. Esto se aplica especialmente a las preguntas relacionadas con las funciones, efectos de falla, funcionamiento deseado, y consecuencias de falla.

Por esta razón la revisión de los requerimientos de mantenimiento de cualquier activo debe llevarse a cabo en pequeños grupos incluyendo al menos a una persona de la función de mantenimiento, y una de la función de operaciones. La antigüedad de los miembros del grupo es menos importante que el hecho de tener un conocimiento profundo del activo físico bajo revisión. Cada miembro del grupo a su vez debe haberse entrenado en RCM. La conformación típica de un Grupo de Análisis RCM se muestra en la figura 9. El uso de estos grupos no sólo permite un acceso sistemático al conocimiento y la experiencia de cada miembro del grupo, sino que los miembros amplían su entendimiento del activo físico en su contexto operacional.

FIGURA 9. UN TÍPICO GRUPO DE ANÁLISIS RCM FACILITADOR



Los Grupos de Análisis RCM trabajan bajo la guía de especialistas en RCM, llamados Facilitadores. Son los integrantes más importantes del proceso de revisión. Su rol es asegurar:

- ◉ Que el análisis RCM se lleve a cabo en el nivel correcto, que los límites del sistema sean claramente definidos, que ningún ítem importante sea pasado por alto, y que los resultados del análisis sean debidamente registrados.
- ◉ Que RCM sea claramente comprendido y aplicado correctamente por parte de los miembros del grupo.
- ◉ Que el grupo llegue al consenso en forma rápida y ordenada, reteniendo el entusiasmo individual de los miembros.
- ◉ Que el análisis progrese razonablemente rápido y termine a tiempo.

Los Facilitadores también trabajan con los patrocinadores o responsables de proyecto para asegurar que cada análisis sea debidamente planeado y reciba el apoyo directivo y logístico apropiado. El tema de los Facilitadores y los Grupos de Análisis es abordado.

Resultado de un Análisis RCM: Si es aplicado en la forma sugerida anteriormente, un análisis RCM da tres resultados tangibles:

- ◉ Planes de mantenimiento a ser realizados por el departamento de mantenimiento.

- ◉ Procedimientos de operación revisados para los operadores

- ◉ Una lista de cambios que deben hacerse al diseño del activo físico, o a la manera en que es operado para lidiar con situaciones en las que no puede proporcionar el funcionamiento deseado en su configuración actual.

Dos resultados menos tangibles son que los participantes del proceso aprenden mucho acerca de cómo funciona el activo físico y, que ellos tienden a funcionar mejor como miembros de un equipo.

Auditoria e implementación: Inmediatamente después de haber completado el análisis para cada activo físico, los gerentes responsables del equipo deben comprobar que las decisiones tomadas por el grupo son razonables y defendibles.

Luego de que cada revisión es aprobada, las recomendaciones son implementadas incorporando planes de mantenimiento a los sistemas de control y planeamiento, incorporando cambios en los procedimientos operacionales estándar del activo físico, y entregando recomendaciones para cambios de diseño a quienes corresponda.

2.1.12 Beneficios que se logra con el RCM: Por más esperados que sean, los resultados enunciados anteriormente sólo deben ser vistos como medios para un fin. Específicamente deben permitir que las funciones de mantenimiento satisfagan las expectativas indicadas en la figura 3 al comienzo de esta sección.

- **Mayor seguridad e integridad ambiental:** RCM considera las implicancias ambientales y para la seguridad de cada patrón de falla antes de considerar su efecto en las operaciones. Esto significa que se actúa para minimizar o eliminar todos los riesgos identificables relacionados con la seguridad de los equipos y el ambiente. Al incorporar la seguridad a la toma de decisiones de mantenimiento, RCM también mejora la actitud de las personas en relación con este tema.

- ◉ **Mejor funcionamiento operacional (producción, calidad de producto v servicio al cliente):** RCM reconoce que todos los tipos de mantenimiento tienen algún valor y provee reglas para decidir cual es el más acorde a cada situación. De esta manera se asegura que solo se elijan las formas de mantenimiento más efectivas para cada activo físico, y que se tomen las medidas necesarias en los casos que el mantenimiento no pueda resolver. Este esfuerzo de ajustar y focalizar el mantenimiento lleva a grandes mejoras en el funcionamiento de los activos físicos existentes.

RCM fue desarrollado para ayudar a las aerolíneas a diagramar los planes de mantenimiento para nuevos tipos de aeronaves antes de que entraran en servicio. Resultó ser una manera ideal de desarrollar planes para nuevos activos físicos, especialmente equipos complejos para los que no existe información histórica disponible. Esto ahorra la mayor parte del ensayo y error que tan frecuentemente forma parte del desarrollo de nuevos planes de mantenimiento, ensayos que demandan tiempo y errores que pueden ser costosos.

- ◉ **Mayor costo-eficacia del mantenimiento:** RCM continuamente focaliza su atención en las actividades de mantenimiento que tienen mayor efecto en el funcionamiento de la planta. Esto ayuda a asegurar que todo lo que se destine al mantenimiento se realice donde haga el mayor bien. Además, si RCM es aplicado

correctamente a los sistemas de mantenimiento ya existentes, reduce la cantidad de trabajo de rutina de cada lapso de tiempo en un 40 a 70% (en otras palabras las tareas de mantenimiento hechas cíclicamente). Por otro lado si RCM se utiliza para desarrollar un nuevo plan de mantenimiento, la carga de trabajo resultante es mucho más baja que si el plan es desarrollado con los métodos tradicionales.

- ◉ **Mayor vida útil de componentes costosos:** debido al cuidadoso énfasis en el uso de técnicas de mantenimiento a condición.

- ◉ **Una base de datos global:** un análisis RCM finaliza con un registro global y extensivamente documentado de los requerimientos de mantenimiento de todos los activos físicos significativos utilizados por la organización. Esto posibilita la adaptación a circunstancias cambiantes sin tener que reconsiderar todas las políticas de mantenimiento desde un comienzo. También permite a quienes utilizan el equipo, demostrar que sus planes de mantenimiento están contruidos sobre una base racional estableciendo la tasa de auditoria requerida cada vez más por diversas normas. Finalmente, la información almacenada en las hojas de trabajo de RCM reduce los efectos de la rotación de personal y la pérdida de experiencia que esto provoca.

Una revisión RCM de los requerimientos de mantenimiento de cada activo físico a su vez provee una clara visión de las habilidades necesarias para mantener cada

activo físico, y para decidir qué repuestos deben tenerse en stock. Además mejora la información de planos y manuales.

- ◉ **Mayor motivación del personal:** especialmente los involucrados en el proceso de revisión. Esto lleva a un mayor entendimiento general de todos los integrantes del Grupo de Análisis, del contexto operacional, junto con un 'sentido de pertenencia' más amplio de los problemas de mantenimiento y sus soluciones. También aumenta la probabilidad de que las soluciones perduren.

- ◉ **Mejor trabajo en equipo:** RCM provee un lenguaje técnico que es fácil de entender para cualquier persona que tenga alguna relación con el mantenimiento. Esto da al personal de mantenimiento y operaciones un mejor entendimiento de lo que el mantenimiento puede lograr y de lo que no, y qué debe hacerse para lograrlo.

Todos estos temas son parte central de la administración del mantenimiento y son metas de programas de mejora. Un rasgo importante en RCM es que provee un efectivo sistema de pasos a seguir para tratar modos fallas, todos ellos al mismo tiempo, y para involucrar a todos aquellos que tengan relación con el equipo.

RCM da resultados rápidamente. De hecho, si son enfocados y aplicados correctamente, los análisis RCM se justifican a sí mismos en cuestión de meses y hasta semanas. Estas revisiones transforman los requerimientos de mantenimiento de los activos físicos utilizados por la organización y la manera en que es percibida la función misma del mantenimiento. El resultado es un mantenimiento costo-efectivo mejor, más armonioso y exitoso.

2.1.13 DESARROLLO DE LAS FUNCIONES DE LOS EQUIPOS:

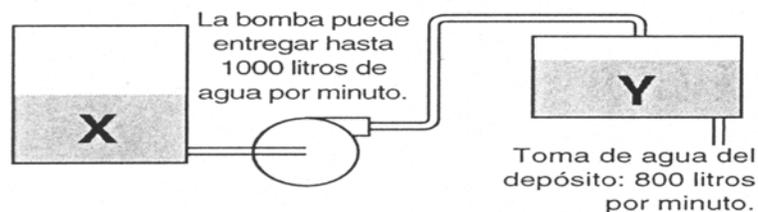
◆ **Descripción de funciones:** Los usuarios no sólo esperan que el activo físico cumpla una función. También esperan que lo haga con un nivel de funcionamiento aceptable. Entonces la definición de una función y por ende la definición de los objetivos de mantenimiento para ese activo físico, no está completa a menos que especifique el nivel de funcionamiento deseado por el usuario tan precisamente como le sea posible.

Por ejemplo, la función primaria de la bomba en la figura 10 podría ser enunciada así:

- Bombear agua del tanque X al tanque Y a no menos de 800 litros por minuto.

Este ejemplo muestra que una descripción completa de una función consiste de un verbo, un objeto y los parámetros de funcionamiento deseados por el usuario. La descripción de una función debe consistir de un verbo, un objeto y un parámetro de funcionamiento deseado.

FIGURA 10. CAPACIDAD INICIAL VS. FUNCIONAMIENTO DESEADO



♦ **Parámetros de funcionamiento:** El objetivo del mantenimiento es asegurarse de que los activos físicos continúen haciendo lo que sus usuarios quieren que haga. Esto se define con un parámetro mínimo de funcionamiento. Si pudiésemos construir un activo físico capaz de rendir según este funcionamiento mínimo sin deteriorarse de ningún modo, ese sería el fin del asunto. La máquina funcionaría continuamente sin necesidad de mantenimiento.

Sin embargo el mundo real no es tan simple. Cualquier sistema organizado que es expuesto al mundo real se deteriorará. El resultado final de este deterioro es la

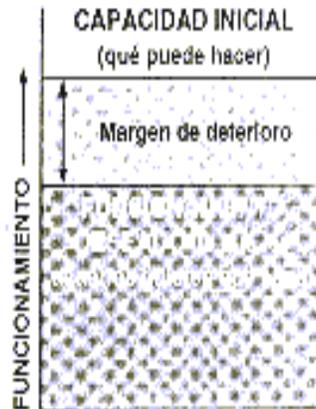
desorganización total (también conocido como 'caos' o 'entropía'), a menos que se tomen acciones para frenar el proceso que esté causando el deterioro del sistema.

Por ejemplo, la bomba en la figura 10 está bombeando agua hacia un tanque del que el agua esta siendo retirada a razón de 800 litros por minuto. Un proceso que causa el deterioro de la bomba (modo de falla) es el desgaste del impulsor. Esto sucede sin importar si está bombeando ácido o aceite lubricante, y sin que influya si el impulsor está hecho de titanio o de acero. La única pregunta es en qué tiempo se deteriorará al punto de no poder enviar 800 litros por minuto.

Entonces si el deterioro es inevitable, debe ser considerado. Esto significa que cuando cualquier activo físico es puesto en funcionamiento debe ser capaz de rendir más que el parámetro mínimo de funcionamiento deseado por el usuario. Lo que el activo físico es capaz de rendir es conocido como capacidad inicial (o confiabilidad inherente).

La figura 11 ilustra la relación correcta entre esta capacidad y el funcionamiento deseado. Por ejemplo, para aseguramos que la bomba que muestra la figura haga lo que sus usuarios desean y además dejar lugar para el deterioro, los diseñadores del sistema deben especificar una bomba cuya capacidad inicial es mayor a 800 litros por minuto. En el ejemplo, esta capacidad inicial es de 1000 litros por minuto.

FIGURA 11. PERMITIENDO EL DETERIORO



Esto significa que el funcionamiento puede ser definido de las siguientes dos maneras:

- ◉ Funcionamiento deseado (lo que el usuario quiere que haga)
- ◉ Capacidad inherente (lo que puede hacer)

También se indica cómo el mantenimiento ayuda a asegurar que los activos físicos continúen cumpliendo sus funciones, ya sea asegurando que su capacidad siga superando los parámetros mínimos deseados por el usuario, o restituyendo la capacidad a un punto cercano a la inicial si baja de este punto.

Cuando se esté considerando la restauración se debe tener en cuenta lo siguiente:

- ◉ La capacidad inicial de cualquier activo físico se establece por su diseño y por cómo está hecho.
- ◉ El mantenimiento sólo puede restituir al activo físico su nivel de capacidad inicial - no puede ir mas allá.

En la práctica, la mayoría de los activos físicos son correctamente construidos y diseñados, por lo que frecuentemente es posible desarrollar programas de mantenimiento que aseguren que estos activos físicos continúen haciendo lo que sus usuarios quieren que haga.

Resumiendo, dichos activos físicos son mantenibles, como lo muestra la figura 12:

FIGURA 12. UN ACTIVO FÍSICO MANTENIBLE



Por otro lado si el funcionamiento deseado excede la capacidad inicial, ningún tipo de mantenimiento puede lograr este funcionamiento. En otras palabras, dichos activos físicos no son mantenibles, como lo muestra la figura 13.

Por ejemplo, si tratamos de extraer 15 Kw. (funcionamiento deseado) de un motor eléctrico de 10 Kw. (capacidad inicial), el motor fallará constantemente y finalmente se quemará prematuramente. Ningún tipo de mantenimiento podrá hacer que este motor sea lo suficientemente grande. Aunque haya sido construido perfectamente y diseñado correctamente, no podrá rendir acorde al funcionamiento deseado en este contexto en el que está siendo utilizado.

De los ejemplos anteriores podemos extraer dos conclusiones:

- ◉ Para que un activo físico sea mantenible, el funcionamiento deseado debe caer dentro del margen de su capacidad inicial.

- ◉ Para determinar esto no sólo debemos conocer la capacidad inicial del activo físico, sino también cuál es exactamente el funcionamiento mínimo que el usuario está preparado a aceptar dentro del contexto en que se va a estar utilizando.

Los párrafos siguientes exploran en detalle los aspectos centrales de los parámetros de funcionamiento:

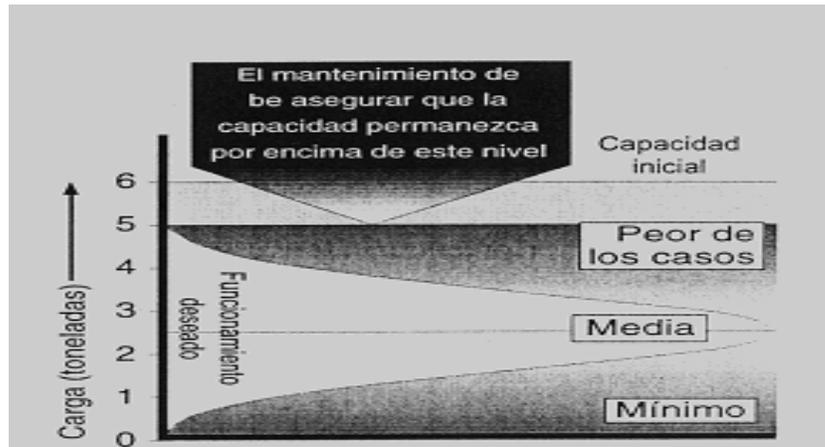
◆ **Parámetros de funcionamiento múltiple:** Muchas descripciones de funciones incorporan más de un parámetro de funcionamiento, generalmente varios. Por ejemplo, una función de un reactor químico en una planta de producción química por lotes o discontinua:

- ⦿ Calentar hasta 500K de un producto X de temperatura ambiente a punto de ebullición (125°C) en una hora.

En este caso el peso del producto, el rango de temperatura, y el tiempo presentan diferentes expectativas de funcionamiento que deben cumplirse simultáneamente.

◆ **Parámetros de funcionamiento cuantitativos:** Los parámetros de funcionamiento deben ser cuantificados cuando fuese posible, ya que los parámetros cuantitativos son mucho más precisos que parámetros cualitativos.

FIGURA13. PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO VARIABLES



Parámetros Cualitativos: Más allá de la necesidad de ser precisos, a veces es imposible especificar parámetros de funcionamiento cuantitativos. Entonces recaemos en los cualitativos. Por ejemplo, la función primaria de algo pintado es usualmente la de "verse aceptable" (o atractivo). Lo que queremos decir con "aceptable" es imposible de cuantificar. Como resultado el usuario y quien hace el mantenimiento deben asegurarse de compartir un entendimiento común de lo que quieren decir con palabras tales como "aceptable".

Parámetros de funcionamiento absolutos: Una descripción que no indica ningún parámetro de funcionamiento, por lo general implica que se trata de un absoluto. Por ejemplo, el concepto de contención se asocia con casi todos los sistemas cerrados.

Las descripciones de función en relación con la contención frecuentemente se escriben de esta manera:

Contener el líquido X

La ausencia de parámetros de funcionamiento sugiere que el sistema debe contener todo el líquido, y que cualquier pérdida da cuenta de una falla.

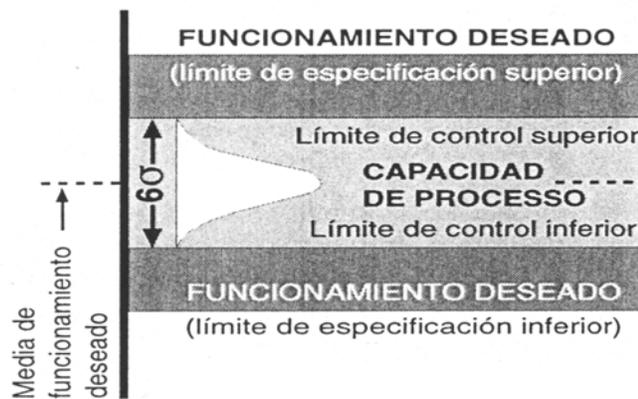
Parámetros de funcionamiento variables: Las expectativas de funcionamiento (o esfuerzo aplicado) a veces varían indefinidamente entre dos extremos. Consideremos el ejemplo de un camión utilizado para llevar cargamentos de distintos bienes a revendedores locales. Asumamos que las cargas varíen entre 0 (vacío) y 5 toneladas como muestra la figura 13. Para dar lugar al deterioro, la capacidad inicial del camión debe ser más que la carga del peor de los casos, que en este caso es de 5 toneladas.

Contrastando con los parámetros de funcionamiento variables, algunos sistemas muestran capacidad variable. Estos son sistemas que no pueden llegar a funcionar exactamente según el mismo estándar cada vez que operan.

Por ejemplo una rectificadora utilizada para dar la terminación a un cigüeñal no producirá exactamente el mismo diámetro en cada bancada de cojinete. Estos diámetros variarán, aunque sólo sea unos micrones. Del mismo modo una máquina de llenado no llenará dos envases seguidos con el mismo peso exacto de

alimento. Los pesos variarán en algunos miligramos. La figura 14 indica que las variaciones de capacidad de esta naturaleza usualmente varían alrededor de una media. Con el objetivo de acomodar esta variabilidad, a los parámetros de funcionamiento deseados se incorpora un límite superior y otro inferior.

FIGURA14. LÍMITES SUPERIORES E INFERIORES



Por ejemplo, la función primaria de una máquina que embolsa caramelos podría ser:

Empaquetar 250 ±1 gr. de caramelos en bolsas a razón de 75 bolsas por minuto cómo mínimo.

La función primaria de una rectificadora podría ser:

Rectificar a terminación la bancada de cojinetes en un ciclo de 3.00 ± 0.03 minutos a un diámetro de 75 ± 0.1 mm con una superficie de acabado de Ra0.2.

Los límites del funcionamiento deseado se conocen como límites de especificación superior e inferior. Los límites de capacidad de proceso son conocidos como límites de control superior e inferior. Los límites superiores e inferiores también se aplican a especificaciones funcionales tales como precisión de los indicadores, configuración de sistemas de control, y dispositivos de protección.

◆ **El Contexto Operacional:** Anteriormente RCM se definió como un "proceso utilizado para determinar los requerimientos de mantenimiento de cualquier activo físico en su contexto operacional". El contexto afecta a todo el proceso de formulación de estrategias de mantenimiento, comenzando por la definición de funciones. Por ejemplo, consideremos una situación en la que un programa de mantenimiento está siendo desarrollado para un camión utilizado para transportar material desde Villorigen a Villafin. Antes de que puedan definirse (las funciones y los parámetros de funcionamiento asociados), el personal que está desarrollando el programa necesita asegurarse de comprender el contexto operacional en forma exhaustiva.

Por ejemplo, ¿a qué distancia está Villorigen de Villafin? ¿Sobre qué tipo de terrenos y caminos? ¿Cuáles pueden ser las condiciones climáticas y de tráfico tomando el 'típico peor de los casos'? ¿Qué tipo de carga está llevando el camión (frágil, corrosivo, abrasivo, explosivo)? ¿Qué límites de velocidad u otras

restricciones se aplican a esta ruta? ¿Qué facilidades de carga de combustible existen a lo largo del camino? Las respuestas a éstas preguntas pueden llevarnos a definir la función primaria de éste vehículo de esta manera: "Transportar hasta 40 toneladas de planchas de acero a velocidades de hasta 90Km por hora (promedio de 60Km/h) desde Villorigen hasta Villafin con un tanque de combustible".

El contexto operacional también influencia profundamente los requerimientos para las funciones secundarias. En el caso del camión, el clima puede demandar el uso de aire acondicionado, alguna reglamentación especial puede requerir mayor iluminación, y la lejanía del destino quizás implique llevar repuestos especiales a bordo del camión. El contexto no sólo influencia en gran modo las funciones y las expectativas de funcionamiento, sino que también afecta la naturaleza de los patrones de falla que pueden ocurrir, sus efectos y consecuencias, la periodicidad con la que pueden ocurrir y qué debe hacerse para manejarlos.

Por ejemplo consideremos nuevamente la bomba que muestra la figura 10. Si fuese llevada a una zona en la que debe bombear un barro, o lodo algo abrasivo hacia un tanque B desde el cual el barro es extraído a razón de 900 litros por minuto, la función primaria sería:

Bombear barro al tanque B a menos de 900 litros por minuto.

Este es un parámetro de funcionamiento más exigente que en el que requería su locación anterior, entonces también se eleva el estándar al que debe ser mantenido. La naturaleza, frecuencia y gravedad de los patrones de falla cambian al pasar de bombear agua a bombear barro. Como resultado, aunque la bomba es exactamente la misma, en su nuevo contexto muy probablemente termine con un programa de mantenimiento completamente diferente y un procedimiento operativo.

Todo esto significa que cualquiera que comience a aplicar RCM a cualquier proceso o activo físico debe asegurarse de tener un claro entendimiento del contexto operacional antes de comenzar. Algunos de los factores importantes que deben ser considerados son:

- ◉ Si el activo físico es parte de un proceso continuo o por lotes
- ◉ La presencia de redundancia o modos de producción alternativa
- ◉ Los parámetros de calidad que se requieren del producto terminado
- ◉ El contexto operacional y los estándares ambientales
- ◉ Riesgos para la seguridad
- ◉ Turnos de trabajo
- ◉ Volúmenes de almacén de productos terminados y de trabajo en proceso
- ◉ Tiempo de reparación
- ◉ Política de repuestos en almacén.

- ◉ Tendencias y fluctuaciones estacionales en la demanda del mercado, y/o el ingreso de materia prima.

Documentación del contexto operacional: Por todas estas razones es esencial asegurar que todos los involucrados en el desarrollo de programas de mantenimiento para cualquier activo físico comprendan claramente su contexto operacional. La mejor manera de hacerlo es documentar el contexto operacional, si es necesario incluyendo la definición de la misión de la organización como parte del proceso RCM.

La figura 15 muestra la definición de un contexto operacional hipotético para la rectificadora que se mencionó anteriormente. El cigüeñal es usado en un tipo de motor de un automóvil modelo X.

La jerarquía comienza con la división de la corporación que produce este modelo, pero podría haber ido a un nivel más alto incluyendo a toda la corporación. Notemos que la definición del contexto a cualquier nivel debería ser aplicable a todos los activos físicos que están por debajo en la jerarquía, y no solo el activo físico que está bajo revisión.

Las definiciones de contexto a niveles superiores en esta jerarquía son simplemente definiciones de funciones amplias. Los parámetros de

funcionamiento en los niveles más elevados cuantifican las expectativas desde el punto de vista del negocio en general. A niveles más bajos los parámetros de funcionamiento se vuelven cada vez más específicos hasta alcanzar el activo físico que está bajo revisión. Las funciones primarias y secundarias a este nivel se definen como se describe en lo que resta de ésta sección.

◆ **Diferentes Tipos de Funciones:** Todo activo físico tiene más de una función, frecuentemente tiene varias. Si el objetivo del mantenimiento es asegurarse de que continúe realizando estas funciones, entonces todas ellas deben ser identificadas junto con los parámetros de funcionamiento deseados actual.

Las funciones se dividen en dos categorías principales (funciones primarias y secundarias) luego divididas nuevamente en varias subcategorías. Estas se ven a continuación, comenzando por las funciones primarias.

FIGURA 15. UNA DEFINICIÓN DE CONTEXTO OPERACIONAL

| | |
|--|--|
| <p>Hacer autos modelo X (Activo físico correspondiente: División Automotriz de Modelo X)</p> | <p>La división del modelo X emplea a 4.000 personas para producir 220.000 automóviles este año. Los pronósticos de venta indican que esto podría incrementar a 320.000 por año en tres años. En la actualidad estamos en la posición No 18 en las tablas de posición de satisfacción del cliente, y nuestra intención es la de llegar a la posición NQ 15 el año próximo y a la NQ 10 el siguiente. La meta para la hora</p> |
|--|--|

| | |
|--|---|
| | <p>año próximo y a la NQ 10 el siguiente. La meta para la hora perdida por accidente a través de la división es de una por cada 500.000 horas pagas. La probabilidad de que ocurra una fatalidad en cualquier lugar de la división debería ser menor a una en cincuenta años. La división planea atenerse a todos los estándares ambientales conocidos.</p> |
| <p>Hacer motores (Activo físico correspondiente: Planta de Motores Motown)</p> | <p>La planta de motores Motown produce todos los motores para los automóviles modelo X. Cada año se producen 140.000 motores del Tipo 1 y 80.000 del Tipo 2. Para llegar a las metas de satisfacción del cliente en el vehículo entero, los reclamos de garantías de los motores deben bajar de la cifra actual de 20 de cada 1.000, a 5 de cada 1.000. La planta tuvo tres auditorias sobre temas de medio ambiente en el año pasado, nuestra meta es no más de una en los próximos tres años. La planta cierra dos semanas por año para permitir que los trabajadores tomen sus vacaciones anuales.</p> |
| <p>Hacer Motores del Tipo 2 (Activo físico correspondiente: Línea de motor del Tipo 2)</p> | <p>La línea de motores del Tipo 2 actualmente trabaja 110 horas por semana (dos turnos de 10 horas cinco días a la semana y un turno de 10 horas los sábados). La línea de montaje podría producir 140.000 motores por año si estas horas fueran continuas, sin defectos, pero la producción global de los motores se ve limitada por la velocidad de la</p> |

| | |
|--|--|
| | <p>línea de manufactura del cigüeñal. La compañía quisiera hacer todo el mantenimiento posible dentro de las horas normales sin interferir con la producción.</p> |
| <p>Mecanizar Cigüeñales (Activo físico correspondiente: mecanizado de cigüeñal 2a línea)</p> | <p>La línea de cigüeñal consiste en 25 operaciones, y es capaz de producir nominalmente 20 cigüeñales por hora (2.200 por semana, 110.000 en un año de 50 semanas). Actualmente a veces no produce el requerimiento de 1.600 por semana en el tiempo normal. Cuando esto sucede, la línea tiene que trabajar horas extras a un costo adicional de 800libras por hora. (Dado que la mayor parte del crecimiento pronosticado será para motores del tipo 2, paradas en esta línea podrían eventualmente llevar a pérdidas de venta de automóviles modelo X a menos que el funcionamiento sea mejorado. No debería haber cigüeñales almacenados entre el final de la línea de cigüeñales y la línea de montaje, pero de hecho se guardan alrededor de 60 cigüeñales como "garantía" en caso de tener que parar. Esto permite que la línea de cigüeñales pueda parar hasta tres horas sin interferir con el montaje. Los defectos del mecanizado de cigüeñales no han causado ningún redamo de garantía, pero la relación de desperdicios de esta línea es de 4%. La meta inicial es de 1.5%</p> |
| <p>Rectificado de terminación de</p> | <p>La rectificadora de terminación, rectifica 5 bancadas de</p> |

| | |
|--|--|
| <p>las bancadas principales y de extremos del cigüeñal</p> <p>(Activo físico correspondiente: Rectificadora Ajax Mark 5)</p> | <p>cojinetes principales y 4 bancadas de extremos. Es la operación, cuello de botella en la línea de cigüeñal, y el tiempo del ciclo es de 3,0 minutos. El diámetro terminado de las bancadas principales es de 75mm ± 0,1 mm, y el de los de extremo de 53mm ± 0.1 mm. Ambas bancadas de cojinetes tienen un acabado superficial de Ra0.2. Las muelas de la rectificadora son retocadas en cada ciclo, proceso que demanda 0,3 minutos de cada ciclo de 3 minutos. Las muelas deben ser reemplazadas cada 3.500 cigüeñales, y este reemplazo lleva 1,8 horas. Usualmente hay alrededor de 10 cigüeñales en la línea entre esta máquina y la próxima operación, entonces pueden tolerarse 25 minutos de parada sin interferir con la próxima operación. El total de Stock acumulado en la línea entre esta máquina y el final de la línea significa que esta máquina puede estar parada alrededor de 45 minutos antes de hacer parar a toda la línea. El rectificado de terminación contribuye en un 0,4% a la actual relación de desperdicio.</p> |
|--|--|

Funciones primarias: Las organizaciones adquieren activos físicos por una o más razones. Estas "razones" son definidas por la enunciación de funciones adecuadamente formuladas. Se conocen como funciones primarias por ser la razón principal por la que es adquirido el activo físico. Son las razones por las

cuales existe el activo, por ello debemos cuidar de definir las tan precisamente como sea posible.

Las funciones primarias son generalmente fáciles de reconocer. De hecho el nombre de la mayoría de los activos físicos industriales se basa en su función primaria.

Por ejemplo la función primaria de una máquina empaquetadora es la de empaquetar objetos, y la de una trituradora es la de triturar, etc.

Como mencionamos anteriormente el desafío real está en definir las expectativas de funcionamiento asociadas a esas funciones. Para la mayoría de los tipos de equipo los parámetros de funcionamiento asociados a las funciones primarias tienen que ver con velocidad, volumen, y capacidad de almacenamiento. La calidad del producto también debe ser considerada en este punto.

Funciones secundarias: Se pretende que la mayoría de los activos físicos cumplan una o más funciones adicionales además de la primaria. Estas se conocen como funciones secundarias.

Por ejemplo, la función primaria del motor de un automóvil podría ser expresada de esta manera:

- ◉ Transportar hasta 5 personas a velocidades de hasta 140 km/h a lo largo de caminos construidos. Si esta fuese la única función del vehículo entonces el único objetivo del programa de mantenimiento de este auto sería preservar su habilidad de transportar hasta 5 personas a velocidades de hasta 140 km/h a lo largo de caminos construidos. Sin embargo ésta es sólo parte de la historia, ya que la mayoría de los dueños de automóviles esperan mucho más de sus vehículos, desde su capacidad de llevar equipaje hasta su capacidad de indicar el nivel de combustible.

Para asegurarnos que ninguna de estas funciones sea pasada por alto, se dividen en siete categorías de la siguiente manera:

- ◉ Ecología - integridad ambiental
- ◉ Seguridad
- ◉ Control/confort/contención
- ◉ Apariencia
- ◉ Protección
- ◉ Eficiencia/economía/Integridad estructural
- ◉ Funciones superfluas

Aunque las funciones secundarias son usualmente menos obvias que las primarias, la pérdida de una función secundaria puede tener serias consecuencias,

a veces hasta más serias que la pérdida de una función primaria. Como resultado, las funciones secundarias frecuentemente necesitan tanto o más mantenimiento que las funciones primarias, por lo que deben ser claramente identificadas.

Debe tenerse un especial cuidado para identificar las funciones de los dispositivos de protección. Estos trabajan de una de estas cinco maneras:

- ◉ Llamar la atención a los operadores ante condiciones anormales
- ◉ Detener el equipo ante una eventual falla
- ◉ Eliminar o aliviar condiciones anormales que se dan luego de una falla y que podrían causar un daño más serio
- ◉ Tomar control de una función que ha fallado
- ◉ Prevenir que sucedan situaciones peligrosas desde un comienzo

¿Cómo deben registrarse las Funciones? Una especificación de función adecuadamente escrita define precisamente los objetivos de la empresa. Esto asegura que todos los involucrados sepan exactamente qué se quiere, lo que a su vez asegura que las actividades de mantenimiento permanezcan enfocadas hacia las necesidades reales de los usuarios (o clientes). También ayuda a absorber los cambios desencadenados por las expectativas cambiantes sin descarrilar a toda la empresa.

Las funciones se listan en la columna de la izquierda de la Hoja de Información RCM. Las funciones primarias se escriben primero, y se numeran como lo muestra la figura 16. (Estas funciones se aplican al sistema de escape de una turbina de gas de 5 megawatts). Al final de ésta sección podemos ver una hoja de trabajo de información.

FIGURA 16. REGISTRO DE FUNCIONES

| HOJA DE | | Sistema |
|-----------------|---|-------------|
| INFORMACIÓN RCM | | Sub-sistema |
| FUNCIÓN | | |
| 1 | Conducir sin restricciones todos los gases calientes de escape de la turbina hasta un punto fijado a 10 metros encima del techo de sala de turbinas | |
| 2 | Reducir el nivel de ruido del escape a la norma ISONoise Rating 30" hasta a 50 m | |
| 3 | Asegurar que la temperatura en la superficie del ducto en el interior de la sala de turbinas no supere los 60°C | |
| 4 | Transmitir una señal de advertencia al centro de control si la temperatura de los gases de escape superan los 475°C y una señal de parada si superan los 500°C en un punto a 4 metros de la turbina | |
| 5 | Permitir el libre movimiento del ducto debido a las dilataciones causadas por los cambios de temperatura | |

La función primaria de una silla de oficina ha sido descrita como: "Soportar ocupante(s) hasta 200 Kg. en posición sentada".

Por favor liste a continuación cualquier otra función que pueda tener la silla. Al hacer este ejercicio, por favor tenga en cuenta los siguientes puntos:

- ⦿ Las funciones deben listarse desde el punto de vista del "usuario" del activo, que en este caso será una combinación de la organización que le pertenece la silla y de la persona que en realidad se sienta

- ⦿ La lista debe expresar lo que se espera que haga la silla, no lo que debe ser cada definición de función debe incluir estándares cuantitativos deseados de funcionamiento cuando sea relevante (para el propósito de este ejercicio, utilice su imaginación para lo que estos estándares deban ser).

Solución sugerida:

- 1) Permitir al ocupante permanecer sentado hasta 2 horas sin incomodidad.
- 2) Permitir al ocupante ajustar la altura entre 450 mm y 570 mm desde el piso.
- 3) Permitir al ocupante inclinar el conjunto del asiento 20° hacia atrás desde la horizontal.
- 4) Permitir al ocupante reclinar el conjunto del asiento hacia atrás entre 0° y 20° desde la horizontal.
- 5) Permitir al ocupante fijar el conjunto del asiento en cualquier ángulo entre 0° y 20° hacia atrás desde la horizontal.
- 6) Permitir al ocupante girar el asiento 360° en el plano horizontal.

- 7) Permitir al ocupante ajustar el ángulo del respaldo entre 90° y 110° respecto al asiento
- 8) Soportar los antebrazos del ocupante mientras está sentado hacia atrás
- 9) Rodar a lo largo de una alfombra en un piso horizontal cuando se la empuja con una fuerza de 2 Kg.
- 10) No dañar la alfombra cuando rueda por el piso
- 11) No lastimar al ocupante si usa cualquiera de los mecanismos de ajuste
- 12) Ser compatible con la decoración del área en donde la silla es usada
- 13) Permitir a cualquier trabajador de oficina normal levantar la silla sin riesgo de lastimarse
- 14) Mantenerse intacta cuando se la levanta
- 15) No inflamarse cuando se la expone a un cigarrillo encendido, la llama de una cerilla ó encendedor
- 16) No liberar sustancias tóxicas si está en un incendio
- 17) No caerse si la silla entera se la inclina 25° mientras alguien está sentado

2.1.14 DESARROLLO DE UN EJEMPLO: SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE BENCENO

Introducción

La figura 17 de más abajo muestra un tanque utilizado para almacenar benceno. El benceno es usado como solvente en un proceso químico por Batch.

El proceso requiere más de 18.000 litros de benceno a intervalos de cinco horas. La naturaleza del proceso es tal que cada batch debe ser alimentado en una hora como máximo. Luego de ser usado, cada batch de benceno retorna al tanque a través de una planta recuperadora de solvente. El solvente nuevo es agregado al sistema de recuperación de solvente, que no es parte de este análisis.

La recuperación del solvente comienza tres horas después del retiro de cada batch, y el benceno es bombeado nuevamente al tanque a un ritmo mínimo de 400 litros por minuto.

El proceso aguas abajo se detiene ocho horas una vez cada seis semanas para permitir la limpieza. Por otro lado, la demanda del producto final es tal que la compañía puede vender todo lo que es producido, por lo tanto debe trabajar 24 hs.

por día, siete días a la semana y 52 semanas al año. La temperatura ambiente no baja de 6°C.

El sistema de almacenaje de benceno opera automáticamente, y es supervisado por un operador en una sala de control ubicada en una oficina de producción a 30 metros. El benceno es cancerígeno, y tiene las siguientes características físicas:

- ◉ Punto de inflamación: -11°C (la temperatura a la cual se evapora lo suficiente para formar una atmósfera explosiva que puede ser encendida por una llama o chispa)
- ◉ Punto de fusión: 5°C (el hecho de que el punto de fusión sea mayor que el punto de ignición significa que entre -11°C y 5°C, el benceno es sólido pero todavía se evapora lo suficiente para formar una atmósfera explosiva)
- ◉ Punto de ebullición: 80°C
- ◉ Punto de ignición: 560°C (la temperatura más baja a la cual ocurre la ignición sin una chispa o llama).

❖ **Detalles del Sistema del Tanque:** El tanque tiene una capacidad total de 45.000 litros. Está construido de acero de bajo contenido de carbono y es sostenido por soportes de acero que están abullonados a una base de hormigón. Para acomodarse a los cambios de temperatura, el tanque está fijado en un

extremo mientras que el otro es libre para moverse. (La superficie del soporte del extremo libre está cubierta con PTFE para permitir el movimiento).

Con fines de inspección, el tanque está provisto de una tapa de acceso de un diámetro interno de 600 mm.

El tanque también tiene un tubo de venteo que está conectado a la parte de vapor de la planta recuperadora de solvente para formar un sistema de balance de vapor. A medida que el nivel de benceno en el tanque sube y baja, el vapor fluye ida y vuelta entre el tanque y la planta recuperadora de solvente en la dirección opuesta al flujo de benceno. Esto evita la liberación de vapor a la atmósfera y también la formación de vapor nuevo. En el venteo entre el tanque y la planta recuperadora de solvente está montada un arresta llama.

(Si la presión en el sistema de balance de vapor alcanza 12 hPa, un sistema de recuperación de vapor libera el exceso de vapor a través de un lecho de carbón activado. Éste a continuación es regenerado para recuperar el benceno líquido. El sistema recuperador también permite el ingreso de aire en el sistema de balance de vapor cuando la presión baja a menos de -10 hPa.

El tanque está eléctricamente puesto a tierra para prevenir la formación de corriente estática durante el llenado, que podría causar chispas. También está

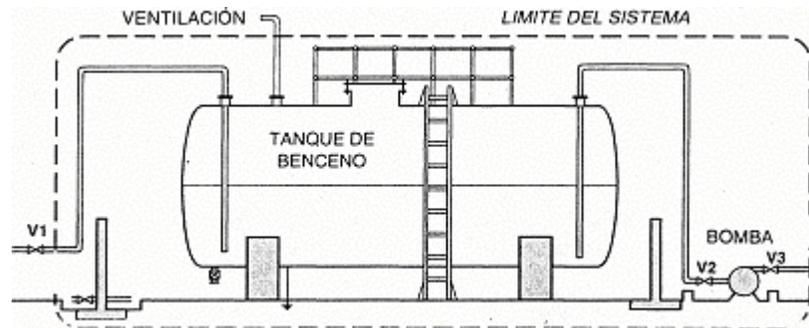
provisto de una válvula de drenaje manual que permite drenar el tanque para mantenimiento. (Todo menos los últimos 200 litros de benceno pueden ser desalojados a través de la cañería de salida utilizando la bomba de suministro, o si es necesario mediante sifón.)

El tanque tiene un medidor de nivel de ecosonda ultrasónico y un sistema de control de alto/bajo nivel que:

- ◉ Envía una señal para activar la bomba de alimentación en la planta de recuperación de solvente cuando el tanque baja a 21.000 litros
- ◉ Apaga la bomba de alimentación cuando el tanque alcanza 39.000 litros
- ◉ Indica el nivel de tanque en la sala de control

Activa una alarma en la sala de control si el nivel de tanque baja a menos de 20.500 litros. (Generalmente esta es la señal para los operadores de que es tiempo de agregar más benceno al sistema - un proceso operado manualmente - si no hay pérdidas. También es un aviso de que el benceno sale del tanque más rápido de lo que retorna de la recuperación de solvente.)

FIGURA 17

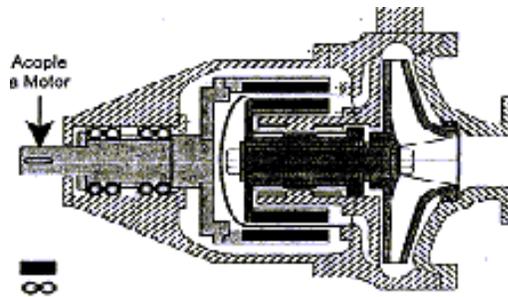


El tanque también tiene un indicador neumático operado hidrostáticamente para proveer una lectura local del contenido del tanque.

El interruptor de alto nivel está resguardado por un interruptor de último alto nivel flotante (normalmente cerrado) que detiene la planta recuperadora de solvente y hace sonar una alarma en la sala de control si el nivel del tanque alcanza 42.000 litros.

Análogamente, un interruptor de último bajo nivel (normalmente cerrado) hace sonar una alarma y detiene ambas bombas, la de alimentación y la de suministro si el nivel del tanque baja de 2000 litros. Tres válvulas manuales (V1, V2 y V3) son utilizadas para aislar el lado de la alimentación del tanque y la bomba. Una válvula de retención a clapeta está ubicada también en la boca de la tubería de suministro para ayudar al cebado de la bomba. El acceso a la cima del tanque es vía una escalera metálica a una plataforma cerrada con barandas.

FIGURA 18



- Imanes
- Rodamientos
- Bujes de carburo de silicio
- Componentes fijos
- Componentes giratorios

❖ **La bomba:** El benceno es suministrado desde el tanque al proceso a través de una bomba centrífuga con una capacidad nominal de 350 litros por minuto. Esta bomba está diseñada para cero pérdidas, lo cual es alcanzado conduciendo el impulsor de la bomba magnéticamente dentro de una "lata" cerrada, como se muestra en la Figura 18. Esto elimina la necesidad de sellos y acoples mecánicos.

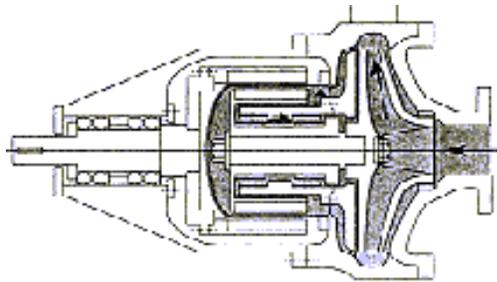
Los bujes del impulsor son lubricados por el benceno, que Huye a través de la lata y los bujes como se ve en la Figura 19. El conjunto de bujes del impulsor tiene

incorporado un sensor de temperatura que detiene la bomba si los bujes exceden los 70°C de temperatura.

Un filtro de 150um está instalado justo antes de la entrada de la bomba para prevenir daños a los bujes de carburo de silicio. (La planta recuperadora de solvente tiene un filtro de 20um, por lo tanto, este filtro sólo toma las partículas del tanque o la tubería.) Un manómetro de presión diferencial está montado a través del filtro, y nos dijeron que la bomba tiende a cavilar si la presión diferencial excede 50 kPa (7 psi).

La bomba es conducida por un motor eléctrico a prueba de llamas de 2 KW el motor dispone e una protección de carga que corta la electricidad si la corriente consumida excede 6 A.

FIGURA 19



También tiene incorporado un circuito de protección de funcionamiento en vacío que detiene el motor bajo condiciones de bajo caudal o vacío.

El panel representativo en la sala de control tiene luces que indican cuando la bomba está encendida o apagada, y luces separadas cuando se detiene por "Motor Sobrecargado", "Alta Temperatura" o "Funcionamiento en Vacío". El panel de control local tiene un interruptor manual que permite detener al motor localmente. El panel también incluye luces indicadoras locales que muestran si el motor de la bomba está prendido o apagado.

Una serie de "llaves para bomberos" está localizada en la casilla-puente en la entrada al lugar permitiendo a los bomberos apagar todo equipo eléctrico de zonas específicas de la planta en caso de incendio. Uno de estos interruptores cubre el sistema de benceno.

❖ ***El muro de contención:*** El tanque está rodeado por un muro de contención de 1 metro de alto con una capacidad de 50.000 litros. El piso y las paredes de la contención son impermeables al benceno. Un drenaje incorporado al muro de contención es usado para drenar el agua de lluvia, pero de lo contrario se mantiene cerrado.

◆ **Desarrollo de la aplicación de RCM:** Se le pide utilizar RCM para determinar los requerimientos de mantenimiento del sistema. El ejercicio se llevará a cabo en tres pasos como sigue:

1° Paso: determine las funciones del sistema

2° Paso: liste las fallas funcionales asociadas con cada función, y liste los modos de falla que probablemente causen cada falla funcional.

3° y 4° Paso: utilice el Diagrama de Decisión RCM para seleccionar una política adecuada para tratar cada modo de falla.

Se pide comenzar por el 1° Paso. Para comenzar, necesitará decidir un nivel de análisis apropiado (en otras palabras, si hay que subdividir el sistema, y en ese caso cómo). En adelante, deberán listarse las funciones. Cuando lo esté haciendo, recuerde listar los parámetros de funcionamiento desde el punto de vista de la gente que usa/opera el sistema. Por favor, también cuantifique los parámetros de funcionamiento siempre que sea posible. (Para el propósito de este ejercicio, no intente analizar el motor, el interruptor, el sistema de balance de vapor o el sistema de recuperación de vapor.)

PASO 1: FUNCIONES DEL SISTEMA DE BENCENO

- 1 Suministrar benceno al proceso a un mínimo de 300 litros por minuto
- 2 Contener el benceno y el vapor del benceno

- 3 Comenzar a cargar el tanque cuando el nivel baja de 21.000 litros
- 4 Detener la bomba de alimentación cuando el nivel de benceno alcanza 39.000 litros
- 5 Ser capaz de hacer sonar una alarma si el nivel de benceno en el tanque baja más de 20.500 litros
- 6 Ser capaz de apagar las bombas de suministro y de alimentación y hacer sonar una alarma en la sala de control si el nivel del tanque baja más de 2.000 litros.
- 7 Ser capaz de detener la planta de recuperación de benceno y hacer sonar una alarma si el nivel del tanque sobrepasa 42.000 litros.
- 8 Detener la bomba si para el flujo de benceno a través de los bujes del impulsor.
- 9 Detener la bomba si los bujes del impulsor sobrepasan los 70°C
- 10 Mantener una presión en el tanque entre -1 OHPa y 12 Hpa
- 11 Permitir que el tanque sea drenado.
- 12 Permitir a los bomberos apagar la bomba a distancia en caso de incendio
- 13 No dejar que las llamas de un fuego externo se propaguen dentro del tanque
- 14 Prevenir la formación de corriente estática en el tanque
- 15 Indicar que el tanque contiene líquido inflamable y tóxico
- 16 Indicar el nivel de benceno en el tanque localmente y en la sala de control con una tolerancia de 2% sobre el contenido real
- 17 Prevenir que partículas mayores a 150 um alcancen a la bomba

- 18 Indicar la presión diferencial a través del filtro con un 20% de la presión real
- 19 Contener el benceno en caso de pérdida del tanque
- 20 Asegurar que la válvula de drenaje del muro de contención sea abierta solamente por personal autorizado
- 21 Permitir que el muro de contención sea drenado
- 22 Permitir a un hombre de talla normal entrar al tanque utilizando indumentaria de seguridad adecuada
- 23 Permitir acceso a un hombre de hasta 200 kg subir al tope del tanque
- 24 Prevenir que la gente se caiga del tope del tanque
- 25 Permitir el movimiento libre del tanque por cambios de temperatura
- 26 Tener un aspecto aceptable

PASO 2: LISTAR LAS FALLAS FUNCIONALES

1. Fallas funcionales

Vimos cómo las personas y las organizaciones adquieren activos físicos porque quieren que realicen una tarea, y también esperan que cumplan sus funciones en relación con ciertos parámetros aceptables de funcionamiento. Sin embargo, si por alguna razón es incapaz de hacer lo que el usuario desea, éste considerará que ha fallado.

Entonces un activo físico ha fallado cuando no hace lo que el usuario desea que haga. También vimos que cada activo tiene más de una función, por lo tanto al ser posible que cada una de éstas falle, se deduce que cualquier activo físico puede tener una variedad de estados de falla diferentes.

Por ejemplo, la bomba en la figura 10 tiene al menos dos funciones. Una es la de bombear agua a no menos de 800 litros por minuto y la otra es contener el agua. Es perfectamente posible que dicha bomba sea capaz de bombear la cantidad requerida (no hay falla de la función primaria) a la vez que pierde líquido (falla en la función secundaria)

Contrariamente, es posible que la bomba se deteriore hasta el punto de no poder bombear la cantidad requerida (falla de la función primaria), mientras que contiene el líquido (no hay.-falla de la función secundaria).

Esto muestra porqué es mas preciso definir una falla en términos de "pérdida de una función específica" y no con la "falla del activo como un todo". También muestra porqué el proceso RCM utiliza el término "falla funcional" para describir estados de falla y no a la falla por sí sola. Sin embargo para completar la definición de falla, debemos estudiar también el tema de los parámetros de funcionamiento.

2. Parámetros de funcionamiento y Fallas

Los límites entre las condiciones satisfactorias y las fallas están especificados por un parámetro de funcionamiento. Dado que éste se aplica a funciones individuales, podemos definir una falla funcional como:

La incapacidad de cualquier activo físico de cumplir una función según un parámetro de funcionamiento aceptable para el usuario.

Los párrafos siguientes exploran diferentes aspectos de las fallas funcionales bajo los siguientes encabezados:

- ◉ Falla total y parcial
- ◉ Límites superiores e inferiores
- ◉ Instrumentos e indicadores
- ◉ El contexto operacional

2.1 Falla total y parcial

La definición citada más arriba de una falla funcional se refiere a una pérdida total de la función. También abarca situaciones en las que el comportamiento funcional queda al margen de los límites admisibles.

Por ejemplo, la función primaria de la bomba citada anteriormente se puede definir como "bombear agua del tanque X al tanque Y a no menos de 800 litros por minuto."

Esta función podría sufrir dos fallas funcionales:

- ⦿ No bombea agua
- ⦿ Bombea agua a menos de 800 litros por minuto.

2.2 FUNCIONAMIENTO DESEADO

FIGURA 20. FALLA FUNCIONAL



Una pérdida parcial de función casi siempre proviene de modos de falla diferentes de los que provocan una pérdida total, y las consecuencias casi siempre son diferentes. Por ésta razón deben registrarse todas las fallas funcionales asociadas a cada función.

2.3 Límites superiores e inferiores

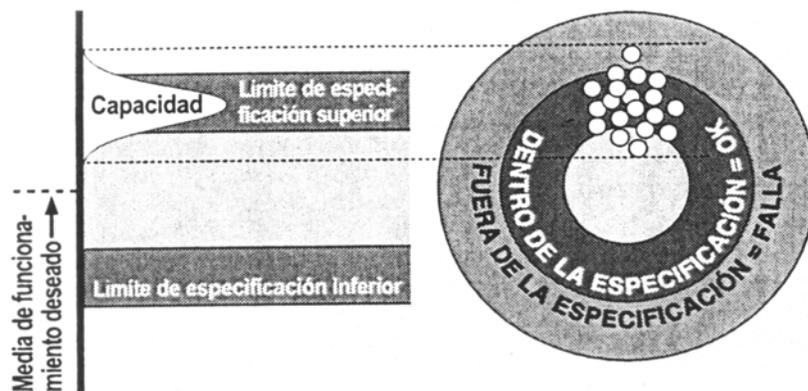
Los parámetros de funcionamiento asociados a algunas funciones incorporan límites superiores e inferiores. Dichos límites significan que el activo físico ha fallado si produce productos que están por arriba del límite superior, o por debajo del inferior. En este caso deben ser identificados por separado ya que los modos de falla y las consecuencias asociadas son diferentes para ambos límites. La función de la rectificadora mencionada anteriormente era "rectificar la pieza a medidas de acabado dentro de un tiempo de ciclo de $3,00 \pm 0,03$ minutos a un diámetro de $75 \pm 0,1$ mm con un acabado superficial de Ra 0,2'.

- ◉ Totalmente incapaz de rectificar la pieza
- ◉ Rectifica la pieza en un tiempo de ciclo superior a 3,03 minutos
- ◉ Rectifica la pieza en un tiempo de ciclo inferior a 2,97 minutos
- ◉ El diámetro excede los 75,1 mm
- ◉ El diámetro está por debajo de los 74,9 mm
- ◉ Rugosidad superficial excesiva

En la práctica los estados de falla asociados a los límites superiores e inferiores pueden manifestarse de dos maneras.

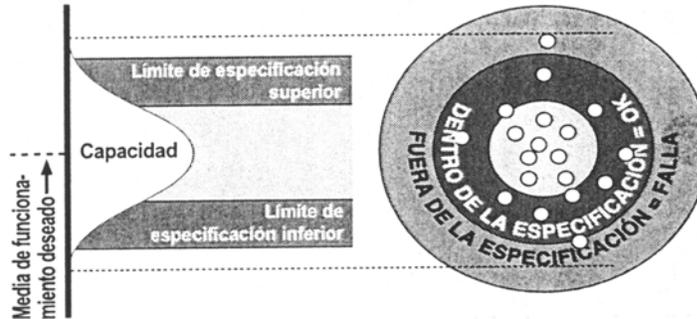
En primer lugar, el rango de capacidad podría ir más allá de los límites de especificación sólo en una dirección, como lo muestra la figura 21. Notemos que en ambos casos no todos los productos producidos por el proceso en cuestión habrán fallado. Si la ruptura del límite es menor, sólo será producido un pequeño porcentaje de productos que están fuera de las especificaciones. Sin embargo, cuanto más alejado del centro esté el grupo en el primer caso, o cuanto más amplio sea el rango en el segundo caso, más porcentaje de fallas habrá. También se aplican límites de éste tipo a los parámetros de funcionamiento asociados a medidas, indicadores, y sistema de protección de control.

FIGURA 21. LA CAPACIDAD SOLAMENTE EXCEDE EL LÍMITE SUPERIOR



El segundo estado de falla ocurre cuando el rango de capacidad es tan amplio que va más allá de ambos límites, el superior y el inferior, como lo muestra la figura 22.

FIGURA 22. LA CAPACIDAD VA MÁS ALLÁ DE LOS LÍMITES SUPERIORES E INFERIORES.



¿Quién debe establecer los parámetros?

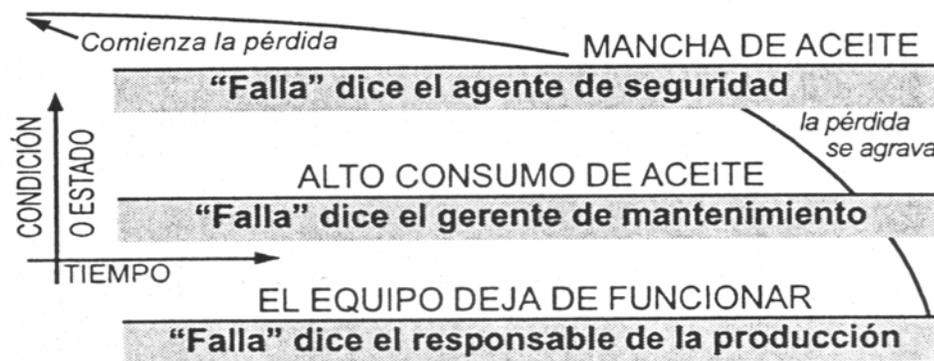
Un tema que necesita una consideración cuidadosa cuando se definen fallas funcionales, es el "usuario". Hasta el día de hoy la mayoría de los programas de mantenimiento que están en uso en el mundo son llevados a cabo por el personal de mantenimiento trabajando por sí solo. Estas personas frecuentemente deciden qué se entiende por "falla".

En la práctica, la visión de la falla usualmente termina siendo bastante diferente de la del usuario, a veces con consecuencias desastrosas para la efectividad de los programas.

Por ejemplo, una función de un sistema hidráulico es la de contener aceite. El grado de eficacia con la que ha de realizar esta función está sujeto a diversas consideraciones. Hay responsables de producción que creen que una pérdida

hidráulica sólo constituye una falla funcional si es tan grave que el equipo deja de funcionar totalmente. En cambio, a juicio de un gerente de mantenimiento puede que se produzca la falla funcional si la pérdida causa un consumo excesivo de aceite hidráulico a través de un período largo de tiempo. Por su parte, un agente de seguridad podría sostener que ocurre una falla funcional si la pérdida produce una mancha de aceite en el suelo capaz de hacer resbalar a la gente o crear un riesgo de incendio. Esto está ilustrado en la figura 23.

FIGURA 23. DIFERENTES PUNTOS DE VISTA RESPECTO DE LAS FALLAS



El gerente de mantenimiento (que controla presupuesto del aceite hidráulico) puede pedir a los operadores que accedan a los sistemas hidráulicos para reparar las pérdidas "porque el consumo de aceite es excesivo". Sin embargo el acceso puede serle negado porque los operadores opinan que la máquina todavía "funciona correctamente". Cuando esto sucede el personal de mantenimiento registra que la máquina no fue entregada para su mantenimiento preventivo, y se

hacen a la idea de que sus colegas de producción no creen en él. Por razones similares el gerente de mantenimiento puede no autorizar que una persona de mantenimiento repare una pequeña pérdida cuando lo pide el agente de seguridad.

De hecho, seguramente los tres grupos creen en la prevención. El problema real es que no se han tomado el trabajo de ponerse de acuerdo en qué entienden exactamente por "falla", por lo que no tienen un entendimiento común de lo que están tratando de prevenir.

Este ejemplo ilustra tres puntos centrales:

- ◉ El parámetro de funcionamiento utilizado para definir una falla funcional - en otras palabras el punto en que decimos "hasta aquí y no más" - define el nivel de mantenimiento proactivo necesario para evitar esa falla (en otras palabras, para mantener el nivel de funcionamiento requerido)
- ◉ Puede ahorrarse mucho tiempo y energía si se define el parámetro de funcionamiento antes de que se produzca la falla
- ◉ Los parámetros de funcionamiento utilizados para definir la falla deben ser establecidos por el personal de mantenimiento y de operaciones trabajando junto con cualquier otra persona que sepa acerca del comportamiento del activo físico.

¿Cómo deben ser registradas las Fallas Funcionales? Las fallas funcionales se escriben en la segunda columna de la hoja de trabajo de información. Son codificadas alfabéticamente, como lo muestra la figura 24.

FIGURA 24. FALLAS FUNCIONALES

| HOJA DE | | Sistema: SISTEMA turbinas de 5 MW | |
|-----------------|---|--|--|
| INFORMACIÓN RCM | | Sub-sistema: SUB SISTEMA Sistema de Escape | |
| FUNCIÓN | | | FALLA FUNCIONAL |
| 1 | Conducir sin restricciones todos los gases calientes de escape de la turbina hasta un punto fijado a 10 metros encima del techo de sala de turbinas | A B C D | Conducción totalmente bloqueada Flujo de gas restringido No todo el gas alcanza el final del escape El gas no alcanza un punto a 10 metros por encima del techo |
| 2 | Reducir el nivel de ruido del escape a la norma ISO Noise Rating 30" hasta a 50 m | A | El nivel de ruido excede la normativa ISO Noise Rating 30 a 50 metros |
| 3 | Asegurar que la temperatura en la superficie del ducto en el interior de la sala de turbinas no supere los 60°C | A | Permite que la temperatura de la superficie del escape en el interior del edificio exceda de 60°C |
| 4 | Transmitir una señal de advertencia al centro de control si la temperatura de los gases de escape superan los 475°C y una señal de parada si superan los 500°C en un punto a 4 metros de la turbina | A B | No es capaz de transmitir una señal de alarma si la temperatura excede 475 °C No es capaz de transmitir una señal de parada si la temperatura excede 500°C |

| | | | |
|---|--|---|--|
| 5 | Permitir el libre movimiento del ducto debido a las dilataciones causadas por los cambios de temperatura | A | No permite el libre movimiento del ducto |
|---|--|---|--|

2.1.15 Análisis de Modos de Falla y sus Efectos: Al definir las funciones y los parámetros de funcionamiento deseados de cualquier activo físico, definimos los objetivos de mantenimiento con respecto a él. La definición de fallas funcionales nos permite determinar exactamente qué queremos decir con "falla". Estos dos temas son considerados por las primeras dos preguntas del proceso RCM.

Las próximas dos preguntas buscan identificar los modos de falla que probablemente causen cada falla funcional, y determinar los efectos de falla asociados con cada modo de falla. Esto se realiza a través de un análisis de modos de falla y sus efectos para cada falla funcional. Este capítulo describe los elementos centrales de dicho análisis, comenzando por la definición del término "modo de falla"

◆ **¿Qué es un Modo de Falla?:** Un modo de falla podría ser definido como cualquier evento que pueda causar la falla de un activo físico (o sistema o proceso). Sin embargo anteriormente mostramos que es vago y simplista aplicar el término "falla" a un activo físico de manera general. Es mucho más preciso distinguir entre "una falla funcional" (un estado de falla) y un "modo de falla" (un

evento que puede causar un estado de falla). Esta distinción lleva a la siguiente definición más precisa de un modo de falla:

Un modo de falla es cualquier evento que causa una falla funcional.

La mejor manera de mostrar la conexión y la diferencia entre estados de falla y los eventos que podrían causarlos es, primero, hacer un listado de fallas funcionales, y luego registrar los modos de falla que podrían causar cada falla funcional, como lo muestra la Figura 24.

La Figura 24 también indica que la descripción del modo de falla debe consistir de un sustantivo y un verbo. La descripción debe contener los detalles suficientes para poder seleccionar una estrategia de manejo de falla apropiada, pero no demasiados dado que ya se pierden grandes cantidades de tiempo en el proceso de análisis por sí solo. Este tema es tratado extensamente más adelante en este capítulo, pero antes nos preguntamos porqué es necesario analizar los modos de falla en primera instancia.

◆ **¿Por qué analizar Modos de Falla?:** Una máquina puede fallar por diversos motivos. Un grupo de máquinas o un sistema como una línea de

producción pueden fallar por cientos de razones. Para una planta entera, los números ascienden a miles, inclusive hasta decenas de miles.

La mayoría de los gerentes se estremecen ante la idea del tiempo y el esfuerzo involucrado en la identificación de todos estos modos de falla. Muchos deciden que éste tipo de análisis es demasiado trabajoso, y abandonan la idea por completo. Al hacerlo estos gerentes pasan por alto el hecho de que en el día a día el mantenimiento es realmente manejado al nivel de modo de falla. Por ejemplo:

FIGURA 25. MODOS DE FALLA DE UNA BOMBA

| HOJA DE | | Sistema: SISTEMA turbinas de 5 MW | | | |
|-----------------|--|--|---|---|--|
| INFORMACIÓN RCM | | Sub-sistema: SUB SISTEMA Sistema de Escape | | | |
| FUNCIÓN | | | Falla Funcional | | Modo de Falla (Causa Falla) |
| 1 | Transferir agua desde el Tanque X al tanque Y a no menos de 800 litros por minuto. | A | Incapaz de transferir agua. | 1 | Los cojinetes se agarrotan |
| | | | | 2 | El impulsor queda loco, se suelta |
| | | | | | El impulsor se traba por un cuerpo extraño |
| | | | | 3 | El cubo de acople falla por fatiga |
| | | | | | El motor se quema |
| | | | | 4 | Válvula de ingreso se traba en la |
| | | | | 5 | posición cerrada |
| | | | | 6 | Impulsor gastado |
| | | | | | Línea de succión parcialmente |
| | | | | 1 | bloqueada. |
| | | B | Transfiere menos de 800 litros por minuto | | |

- ◉ Las órdenes de trabajo o pedidos de trabajo surgen para cubrir modos de falla específicos.
- ◉ El planeamiento del mantenimiento día por día trata de hacer planes para abordar modos de falla específicos.

- ◉ En la mayoría de las empresas industriales el personal de mantenimiento y operaciones tiene reuniones cada día. Las reuniones casi siempre consisten en discusiones acerca de lo que ha fallado, qué las causó, quién es responsable, qué se está haciendo para reparar el problema y a veces, qué puede hacerse para prevenir que vuelva a suceder. Entonces casi toda la reunión se destina a hablar acerca de los modos de falla.
- ◉ En gran medida, los sistemas de registro del historial técnico registran modos de falla individuales (o al menos qué fue hecho para rectificarlos).

En la mayoría de estos casos, estos modos de falla son discutidos, registrados, y manejados luego de haber ocurrido.

Tratar fallas después de que hayan ocurrido es por supuesto la esencia del mantenimiento reactivo.

Por otro lado el mantenimiento proactivo significa manejar los eventos antes de que ocurran, o al menos decidir cómo debieran ser manejados si llegaran a ocurrir. Para ello debemos saber por adelantado que eventos tienen posibilidades de ocurrir. Los "eventos" en este contexto son los modos de falla. Entonces si deseamos aplicar mantenimiento verdaderamente proactivo a cualquier activo físico, debemos tratar de identificar todos los modos de falla que pudieran

afectarlo. El ideal sería poder identificarlos antes de que ocurriesen, o si esto no es posible, al menos antes de que vuelvan a ocurrir.

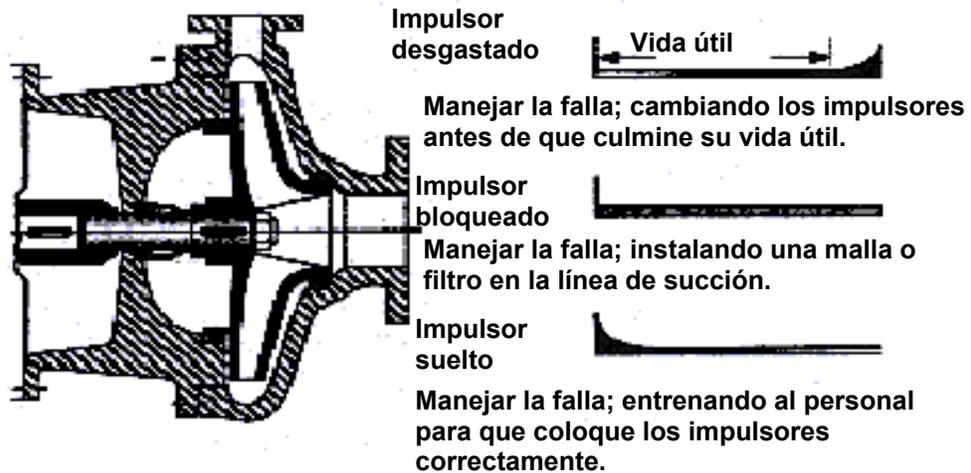
Una vez que cada modo de falla ha sido identificado, entonces es posible considerar qué sucede cuando ocurre, evaluar las consecuencias y decidir si algo debiera hacerse para anticipar, prever, detectar, corregir, o hasta rediseñar.

Entonces el proceso de selección de tareas de mantenimiento, y gran parte de manejo de estas tareas es llevado a cabo al nivel del modo de falla. Esto es brevemente ilustrado en el ejemplo siguiente.

Consideremos nuevamente la hoja de información que muestra la figura 15, Esto se aplica a la función primaria de la bomba de la figura 10. La figura 16 muestra que la bomba centrífuga es de acople directo de una etapa de aspiración axial sellada con un sello mecánico.

En este ejemplo vemos de cerca tres modos de falla que probablemente solamente afecten al impulsor. Se describen a continuación, y se resumen en la figura 26.

FIGURA 26. FALLAS DEL IMPULSOR DE UNA BOMBA CENTRÍFUGA



- ◉ **Impulsor desgastado:** probablemente sea un fenómeno relacionado con la edad. Como lo muestra la figura 26, esto significa que probablemente tenga correspondencia con el segundo de los seis patrones de falla presentados en la primera parte (Patrón de Falla B). Entonces si conocemos aproximadamente cuál es la vida útil del impulsor, y si las consecuencias de la falla son lo suficientemente serias, es posible que decidamos prevenir la falla cambiando el impulsor justo antes del final de su vida útil.
- ◉ **Manejar la falla:** entrenado al personal para que coloque los impulsores correctamente.
- ◉ **Impulsor trabado por un cuerpo extraño:** El hecho de que un cuerpo extraño aparezca en la línea de succión seguramente no tenga relación alguna

con el tiempo que el impulsor ha estado funcionando. Entonces podemos decir que este modo de falla ocurrirá arbitrariamente (Patrón de Falla E). Tampoco habría ninguna advertencia de que está por ocurrir. Por lo tanto si las consecuencias fuesen lo suficientemente serias, y la falla ocurriera seguido, podríamos considerar modificar el sistema, quizás instalando algún tipo de filtro o malla en la línea de succión.

⦿ **Impulsor suelto:** Si el mecanismo de ajuste del impulsor esta diseñado adecuadamente y sigue quedando suelto, seguramente es porque no fue bien colocado en primer lugar. (Si supiéramos que este es el caso, entonces quizás el modo de falla debería describirse como "Impulsor colocado incorrectamente".) Esto a su vez significa que el modo de falla tiene más probabilidades de ocurrir al poco tiempo de estar funcionando, como lo muestra la figura 26 (Patrón de Falla F), y seguramente lo resolveríamos mejorando el entrenamiento o los procedimientos correspondientes. Este ejemplo refuerza la idea de cuál es el nivel al que manejamos el mantenimiento de cualquier activo físico, que no es el nivel del activo como un todo (en este caso la bomba), ni al nivel del componente (en este caso el impulsor), sino al nivel de cada modo de falla. Entonces antes de desarrollar una estrategia sistemática de manejo proactivo de mantenimiento para cualquier activo físico, debemos identificar cuales son esos modos de falla (o cuáles podrían ser).

El ejemplo también sugiere que uno de los modos de falla podría ser eliminado por un cambio en el diseño, y otro mejorando el entrenamiento o los procedimientos. Entonces no todo modo de falla es tratado con mantenimiento programado. Más adelante se describe un procedimiento ordenado para tomar la decisión acerca de cuál es la manera más acertada para lidiar con cada falla.

Todos estos puntos indican que la identificación de los modos de falla es uno de los pasos más importantes en el desarrollo de cualquier programa que pretenda asegurar que el activo físico continúe cumpliendo sus funciones. En la práctica, dependiendo de la complejidad del activo físico, su contexto operacional y el nivel al que está siendo analizado, se registran entre uno y treinta modos de falla por cada falla funcional.

◆ **Categorías de Modos de Falla:** Si aceptamos que el mantenimiento significa asegurar que los activos físicos continúen haciendo lo que sus usuarios quieren que haga, entonces un programa de mantenimiento global debe tener en cuenta todos los eventos que tienen posibilidades de amenazar esa funcionalidad. Los modos de falla pueden ser clasificados en tres grupos de la siguiente manera:

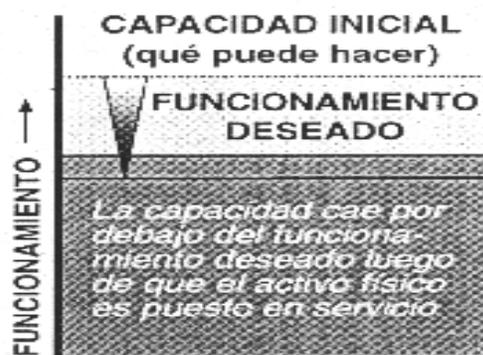
- Cuando la capacidad cae por debajo del funcionamiento deseado
- Cuando el funcionamiento deseado se eleva mas allá de la capacidad inicial

- Cuando desde el comienzo el activo físico no es capaz de hacer lo que se quiere.

Capacidad decreciente: La primera categoría de modos de falla cubre las situaciones en las que, al comenzar, la capacidad está por arriba del funcionamiento deseado, pero luego decae cuando el activo físico es puesto en servicio, quedando por debajo del funcionamiento deseado, como lo ilustra la figura 27. Las cinco causas principales de capacidad reducida son:

- Deterioro
- Fallas de lubricación
- Polvo o suciedad
- Desarme
- Errores humanos que reducen la capacidad

FIGURA 27. MODOS DE FALLA, CATEGORÍA 1



Deterioro: el deterioro cubre todas las formas de desgaste normal (fatiga, corrosión, abrasión, erosión, evaporación, degradación de aislantes, etc.) Estos modos de falla podrían por cierto ser incluidos en una lista de modos de falla cuando se consideren razonablemente probables.

Fallas de Lubricación: La lubricación se asocia con dos tipos de modos de falla. La primera tiene relación con la falta de lubricante, y la segunda se relaciona con la falla del lubricante mismo.

Polvo o Suciedad: La tierra o el polvo es una causa de falla común y generalmente previsible. Por ello las fallas ocasionadas por suciedad deberían estar registradas en el análisis de modos de falla y sus efectos (AMFE) cuando se piense que es probable que causen cualquier falla funcional.

Desarme: Si los componentes se caen o salen de las máquinas, si los conjuntos o máquinas enteras se desarman, las consecuencias son usualmente serias, por lo que estos modos de falla deben ser registrados. Esto incluye la falla de soldaduras, uniones soldadas, remaches, bulones, conexiones eléctricas o accesorios de cañerías.

Errores humanos que reducen la capacidad: Como su nombre lo indica, se refiere a errores que reducen la capacidad del proceso hasta que le es imposible funcionar según los requerimientos del usuario. Si se sabe que ocurren estos

modos de falla, deberían ser registrados en el análisis de modos de falla y sus efectos (AMFE), para que más tarde en el proceso puedan tomarse las de manejo de falla decisiones adecuadas.

❖ **Aumento del Funcionamiento Deseado (o aumento del Esfuerzo Aplicado):** La segunda categoría de modos de falla ocurre cuando el funcionamiento deseado esta dentro de la capacidad del activo físico cuando éste es puesto en servicio, pero posteriormente aumenta hasta quedar encima de la capacidad. Esto hace que el activo físico falle de una de éstas dos maneras:

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

Este fenómeno es ilustrado en la figura 28. Ocurre debido a cuatro razones, tres de las cuales implican algún tipo de error humano:

- Una sobrecarga deliberada prolongada
- Una sobrecarga no intencional prolongada
- Una sobrecarga no intencional repentina
- Material del proceso o de empaque incorrecto

FIGURA 28. MODOS DE FALLA, CATEGORÍA 2



✓ **Una sobrecarga deliberada prolongada**

Los usuarios frecuentemente aceleran el equipo en respuesta a un incremento en la demanda de los productos. En otros casos los activos físicos adquiridos para fabricar un producto son utilizados para procesar un producto con características diferentes. Esto reduce la confiabilidad y/ o la disponibilidad, especialmente cuando el aumento del esfuerzo comienza a acercarse o exceder las posibilidades que el activo físico es capaz de tolerar.

✓ **Una sobrecarga no intencional prolongada**

Muchas industrias responden a aumentos de la demanda por medio de programas de eliminación de 'cuellos de botella'. Estos programas apuntan a aumentar la capacidad de los medios de producción, tales como una línea de producción, para

acomodarse a un nuevo nivel de funcionamiento deseado. Sin embargo, es sorprendente cuan frecuentemente algunos sub-sistemas o componentes quedan fuera de este programa. Esto significa que parte de la planta termina siendo incapaz de hacer lo que sus usuarios desean.

✓ **Una sobrecarga no intencional repentina**

Muchas fallas son causadas por un repentino, incremento, generalmente no intencional, del esfuerzo aplicado. Éste es causado por operación incorrecta, montaje incorrecto, o daños extremos. Si se piensa que cualquiera de estos modos de falla tiene posibilidades de ocurrir en el contexto en cuestión, deberían ser incorporados al AMFE.

Proceso o materiales de empaque incorrecto Los procesos de manufactura frecuentemente sufren fallas funcionales causadas por materiales de proceso que están fuera de especificación (en relación con las variables de consistencia, dureza o pH). De manera similar las plantas envasadoras frecuentemente sufren a causa de materiales de empaques inadecuados o incompatibles.

Los modos de falla de este tipo deberían ser incorporados al AMFE en los casos es los que se sepa que pueden afectar el activo físico que se está revisando, e

incluir un comentario en la columna de los efectos de falla que dirija la atención hacia la verdadera fuente del problema.

❖ **Capacidad inicial por debajo de la requerida:** A menudo surgen situaciones en las que el funcionamiento deseado está fuera del rango de capacidad inicial desde el comienzo, como lo muestra la figura 29.

Este problema de incapacidad rara vez afecta al activo físico en su totalidad. Usualmente afecta sólo una o dos funciones o uno o dos componentes, pero estos puntos débiles perjudican la operación de toda la cadena. El primer paso hacia la rectificación de un problema de diseño de esta naturaleza es registrarlos como modos de falla en un AMFE.

FIGURA 29. MODOS DE FALLA, CATEGORÍA 3



¿Con cuánto detalle se debe manejar los modos de falla?: Ya mencionamos anteriormente que los modos de falla deben ser descritos detalladamente para que sea posible seleccionar una estrategia adecuada de manejo de falla, pero no con tanto detalle como para que se pierda demasiado tiempo en el proceso de análisis.

Los modos de falla deben ser definidos con el detalle suficiente como para posibilitar la selección de una adecuada política de manejo de falla

El nivel de detalle afecta profundamente la validez del AMFE y la cantidad de tiempo que requiere hacerlo. La escasez de detalles y /o de modos de falla puede llevar a un análisis superficial y hasta peligroso. Por el contrario-demasiados modos de falla o demasiado detalle hacen que todo el proceso RCM lleve mucho más tiempo que el necesario. Esto significa que es esencial tratar de lograr un equilibrio correcto. Algunos de los factores centrales a tener en cuenta son tratados en los párrafos siguientes.

❖ **Causalidad:** Las causas de cualquier falla funcional pueden ser definidas a diferentes niveles de detalle, y son aplicables diferentes niveles a diferentes situaciones. En un extremo, a veces es suficiente resumir las causas de una falla funcional en una expresión como "falla la máquina". En el otro extremo quizás necesitemos considerar qué está sucediendo a nivel molecular, o explorar los

rincones remotos del psiquismo de los operadores y del personal de mantenimiento para definir las causas de la falla.

La medida en que los modos de falla pueden ser descritos a diferentes niveles de detalle es ilustrada en la figura 30 en las siguientes páginas.

La figura 30 se basa en la bomba que muestra la figura 26, cuyos modos de falla aparecen en la figura 25. La figura 30 describe maneras en las que la bomba podría sufrir la falla funcional "incapaz de transferir agua". Estos modos de falla son considerados en siete niveles de detalle diferentes.

El nivel superior (Nivel 1) es la falla general de la bomba. El Nivel 2 reconoce la falla de los cinco componentes principales de la bomba - la bomba, el eje, el motor, el acople de entrada/salida. De allí en adelante las fallas son consideradas progresivamente con mayor detalle. Al considerar este ejemplo, notemos que:

- ◉ Los niveles han sido definidos y los modos de falla han sido asignados a cada nivel con el único propósito de ejemplificar. No tienen que ver con una clasificación universal.
- ◉ La Figura 30 no muestra todas las posibilidades de falla a este nivel, por lo que no debe utilizarse este ejemplo como un modelo definitivo.

- ◉ Es posible analizar algunos de los modos de falla a niveles más bajos que el 7, pero esto rara vez sería necesario en la práctica.
- ◉ Los modos de falla que se incluyen solo se aplican a la falla funcional "incapaz de transferir agua". La figura 30 no muestra los modos de falla que podrían causar otras fallas funcionales, tales como la pérdida de contención, o la pérdida de protección.

El primer punto que surge de éste ejemplo es la conexión entre el nivel de detalle y el número de modos de falla que se incluyen. El ejemplo muestra que cuanto más ahondamos en el AMFE, mayor es la cantidad de modos de falla que pueden incluirse en la lista.

Por ejemplo, hay cinco modos de falla en el nivel 2 de la bomba en la figura 30, pero hay 64 en el nivel 6.

Otros dos temas fundamentales que surgen de la Figura 30 tienen que ver con "causas raíz" y el error humano. Estos se describen a continuación.

❖ **Análisis de causas Raíz:** El término "Causa raíz" es comúnmente utilizado en conexión con el análisis de la falla. Implica que si uno ahonda lo suficiente es posible llegar a un nivel causal final y absoluto. De hecho, esto rara vez ocurre. Por ejemplo, en la figura 30 el modo de falla "tuerca del impulsor sobre ajustada"

esta registrado en el nivel 6, que a su vez es causado por un "error de montaje" en el nivel 7. Si fuésemos un nivel mas abajo, el error de montaje podría haber ocurrido porque "el colocador estaba distraído" (nivel 8). Podría haber estado distraído porque su hijo estaba enfermo (nivel 9). Esta falla puede haber ocurrido porque el niño comió algo que estaba en mal estado en algún restaurante (nivel 10).

Es claro que este proceso de seguir descendiendo podría continuar ilimitadamente, más allá del punto en que la organización encargada del AMFE tiene control de los modos de falla. Es por esto que este capítulo enfatiza que el nivel al que deben ser identificados un modo de falla es aquél en el cual es posible identificar una política apropiada para el manejo de la falla.

❖ **Error Humano:**¹² Anteriormente se mencionaba un número de maneras en las que el error humano podía causar la falla de una máquina. Y sugería que si los modos de falla asociados se consideraban razonablemente probables, éstos deben ser incorporados al AMFE, para que pudiera identificarse e implementarse una política apropiada para el manejo de la falla.

¹² www.rcmingeneria.com

Esto se observa en la Figura 30, donde todos los modos de falla que comienzan con la palabra "error" son alguna clase de error humano.

❖ **Probabilidad:** Diferentes modos de falla ocurren con diferente frecuencia. Algunos pueden ocurrir con regularidad, a intervalos promedio medidos en meses, semanas o hasta en días. Otros pueden ser extremadamente improbables, con una media de millones de años entre un episodio y otro. Al preparar un AMFE, constantemente deben tomarse decisiones acerca de qué modos de falla son tan poco probables que pueden ser ignorados sin perder seguridad. Esto significa que no se trata de registrar absolutamente todas las posibilidades de falla sin importar la probabilidad que tengan de ocurrir. En otras palabras, sólo deben ser registrados los modos de falla que tengan posibilidades razonables de ocurrir en ese determinado contexto. Una lista de modos de falla "razonablemente probables" debe incluir lo siguiente:

- ⦿ Fallas que han ocurrido antes en los mismos activos físicos (o similares).
- ⦿ Modos de falla que ya son objeto de rutinas de mantenimiento proactivas, y que ocurrirían si no se hiciera mantenimiento proactivo. Sin embargo, una revisión de los programas existentes sólo debe ser llevada a cabo luego haber terminado el análisis RCM, para reducirlo.

| NIVEL 1 | NIVEL 2 | NIVEL 3 | NIVEL 4 | NIVEL 5 | NIVEL 6 | NIVEL 7 | |
|--------------------------|----------------|-------------------|-------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|------------------|
| Falla el grupo bombeador | Falla la bomba | Falla el impulsor | Desplazamiento del impulsor | Tuerca colocada sin ajustar | Tuerca ajustada | Error de montaje | |
| | | | | Tuerca barrida al colocar | Tuerca corroída | | |
| | | | | | Tuerca hecha de material incorrecto | Material mal suministrado equivocado | |
| | | | | Tuerca de impulsor partida | Tuerca de impulsor muy ajustada | Error de montaje | |
| | | | | | Tuerca hecha de material incorrecto | Material mal suministrado equivocado | |
| | | | | Chaveta de impulsor cortada | Acero de chaveta mal especificado | Error de diseño | |
| | | | | | Acero de chaveta entregado equivocado | Error de compra | |
| | | | | | | Error de almacenaje | |
| | | | | Objeto golpea el impulsor | Pieza olvidada luego de mantenimiento | Error de montaje | |
| | | | | | Objeto extraño entra en el sistema | Malla de succión no instalada | Error de montaje |
| | | | Malla perforada por corrosión | | | | |
| | | Carcaza rota | Tuercas de carcaza perdidas | Bulones de carcaza poco ajustados | Bulones de carcaza poco ajustados | Error de montaje | |
| | | | | | Bufón perdido por vibración | | |
| | | | | | Bulones de carcaza | | |
| | | | | | Bulones cortados por fatiga | | |
| | | | Falla de junta de carcaza | Junta montada incorrectamente | Junta montada incorrectamente | Error de montaje | |
| | | | | | Junta erosionada | | |
| | | | Carcaza partida | Carcaza golpeada por vehículo | Carcaza golpeada por vehículo | Error operativo | |
| | | | | | Bomba en posición expuesta | Error de diseño | |
| | | | | | Aplastada por aerolito | Carcaza golpeada por meteorito | |

| | | | | | | | |
|--|--|----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-------------------------|-------------------------------------|--|
| | | | | | | Carcaza golpeada por parte de avión | |
| | | Falla el sello de la bomba | Desgaste y rotura normal | Sello deteriorado | | | |
| | | | Bomba en vacío | Falla el suministro de agua | | | |
| | | | Sello desalineado | Error de montaje | | | |
| | | | Caras de sello sucias | Error de montaje | | | |
| | | | Sello mal montado | Sello entregado equivocado | Error de compra | | |
| | | | | | Error de almacenaje | | |
| | | | Montaje de sello dañado | Sello mal especificado | Error de diseño | | |
| | | | | | Sello de bomba caído en | Error de almacenaje | |
| | | | Sello de bomba dañado en traslado | Error de compra | | | |

FIGURA 30: NIVELES DE ERROR HUMANO.

La posibilidad de perpetuar el status quo: Cualquier otro modo de falla que no haya ocurrido todavía, pero que se considere como una posibilidad real. Se requiere un cierto criterio para identificar y decidir cómo lidiar con fallas que aún no han ocurrido. Por un lado, necesitamos registrar todos los modos de falla razonablemente posibles, mientras que por otro no queremos perder tiempo con fallas que no han ocurrido antes y que son altamente improbables (increíbles) en este determinado contexto.

❖ **Consecuencias:** Si las consecuencias tienen probabilidad de ser realmente severas, aún fallas más remotas deben registrarse, y ser sometidas a análisis.

Efectos de Falla: El cuarto paso en el proceso de revisión RCM consiste en hacer una lista de lo que de hecho sucede al producirse cada modo de falla. Esto se denomina efectos de falla. (Notemos que efectos de falla no es lo mismo que consecuencias de falla. Un efecto de falla responde a la pregunta ¿Qué ocurre?, Mientras que una consecuencia de falla responde a la pregunta ¿Qué importancia tiene?). La descripción de estos efectos debe incluir toda la información necesaria para ayudar en la evaluación de las consecuencias de las fallas. Concretamente, al describir los efectos de una falla, debe hacerse constar lo siguiente:

⦿ La evidencia (si la hubiera) de que se ha producido una falla

- ◉ En qué forma (si la hay) la falla supone una amenaza para la seguridad o el medio ambiente
- ◉ Las maneras (si las hubiera) en que afecta a la producción o a las operaciones
- ◉ Los daños físicos (si los hubiera) causados por la falla
- ◉ Qué debe hacerse para reparar la falla

Estos temas son tratados en los siguientes párrafos. Se debe tener en cuenta que uno de los objetivos principales de este ejercicio es establecer si es necesario el mantenimiento proactivo. Si hemos de hacer esto correctamente, no podemos empezar suponiendo que se está realizando ya algún tipo de mantenimiento proactivo; por ello los efectos de las fallas deben describirse como si no se estuviera.

Evidencia de Falla

Los efectos de las fallas deben describirse de tal forma que permita a los analistas RCM decidir si la falla será evidente a los operarios en el desempeño de sus tareas normales. Por ejemplo, la descripción debe indicar si la falla hace que se enciendan alarmas luminosas o sonoras (o ambas), y si el aviso se produce en el panel local o en la sala de control (o en ambos). Asimismo la descripción debe indicar si la falla va acompañada o precedida por efectos físicos obvios, tales

como ruidos fuertes, incendio, humo, fugas de vapor, olores extraños o manchas de líquido en el suelo. También debe indicar si la máquina se para como consecuencia de la falla.

Al tratarse de dispositivos protectores, la descripción debe indicar brevemente qué pasaría si fallase el dispositivo protegido mientras el dispositivo de seguridad (protector) se encontrase inutilizado.

Riesgos para la Seguridad y el Medio Ambiente

El diseño de las plantas industriales modernas ha evolucionado de tal forma que sólo una pequeña proporción de los modos de falla presentan una amenaza directa para la seguridad o el medio ambiente. No obstante, si existe una posibilidad de que alguien se lesione o muera como consecuencia directa de una falla, o que se infrinja una normativa o reglamento relativo al medio ambiente, la redacción del efecto de la falla debe señalar cómo esto podría ocurrir. Al hacer la lista de estos efectos, no se debe prejuzgar la evaluación de las consecuencias de la falla haciendo declaraciones como "esta falla puede perjudicar la seguridad", ni "esta falla afecta al medio ambiente". Simplemente indicar lo que sucede, y dejar la evaluación de las consecuencias hasta la etapa siguiente del proceso RCM.

Daños secundarios y sus efectos sobre la Producción

Una descripción de los efectos de falla debe aportar la máxima ayuda posible para determinar cuáles son las consecuencias operacionales y no operacionales de las mismas. Para hacer esto debe indicar cómo y durante cuánto tiempo se afecta la producción (si es que resulta afectada). Generalmente esto tiene que ver con el tiempo de parada de máquina asociado con cada falla. En este contexto, el tiempo de parada de máquina es el total de tiempo probable durante el cual la máquina permanecería fuera de servicio en condiciones normales, desde el momento en que se produce la falla hasta el momento en que la máquina nuevamente se encuentre totalmente operacional. Como lo indica la figura 29, esto generalmente es mucho más que el tiempo neto de reparación.

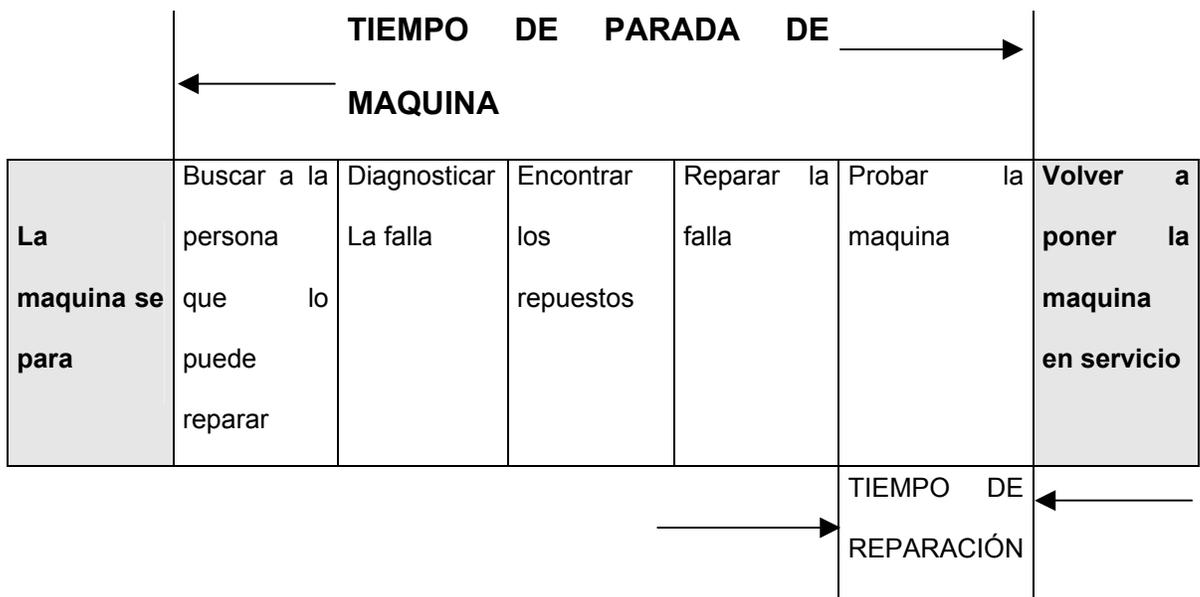
Acción Correctiva

Los efectos de falla también deben indicar qué debe hacerse para reparar la falla. Al considerar de dónde obtener la información necesaria para armar un AMFE (**Failure Mode and Effect Analysis**) completo, debemos recordarla necesidad de ser proactivos. Esto significa que debe darse tanto énfasis a lo que podría ocurrir como a lo que ha ocurrido. Las fuentes de información más comunes se describen en los párrafos siguientes.

El fabricante o proveedor del equipo

Al llevarse a cabo un AMFE, la primera fuente de información que nos viene a la mente es el fabricante. Sobre todo en el caso de equipos nuevos. Sin embargo lo que los fabricantes o proveedores pueden aportar tiene un valor limitado por las siguientes razones:

FIGURA 31. TIEMPO DE PARADA DE MÁQUINA Y TIEMPO DE REPARACIÓN



- Rara vez están involucrados en la operación cotidiana

- Del activo físico, por lo que rara vez tienen acceso a información acerca de qué falla y sus motivos.

- Tienen poco acceso a información acerca del contexto operacional del equipo, los parámetros de funcionamiento deseados, las consecuencias de falla y las habilidades de los operarios y personal de mantenimiento que disponen los usuarios.

Como resultado, los AMFE realizados por estos fabricantes generalmente son genéricos y altamente especulativos, lo que en gran medida limita su valor. De hecho la mejor manera de acceder al conocimiento que los fabricantes tienen acerca del comportamiento del equipo en el campo, es pedirles que ubiquen a técnicos experimentados en el campo para trabajar a la par de las personas que eventualmente operarán y mantendrán el activo físico, para desarrollar un AMFE que sea satisfactorio para ambas partes.

✓ **Listas genéricas de modos de falla**

Las listas de modos de falla "genéricas" son listas de modos de falla, o a veces AMFE completos, preparados por otras personas. Pueden cubrir sistemas enteros, pero frecuentemente cubren sólo un activo físico, o un solo componente. Estas listas genéricas a veces son consideradas como una manera de acelerar esta parte del proceso de RCM. Deben ser abordadas con precaución debido a los siguientes motivos:

- ◉ El nivel de análisis puede ser inapropiado
- ◉ El contexto operacional puede ser diferente
- ◉ Los parámetros de funcionamiento pueden cambiar.

Estos tres puntos significan que, de utilizarse una lista genérica de modos de falla, sólo debe ser usada para reforzar un AMFE de contexto específico, y nunca utilizado por sí solo como una lista definitiva.

✓ **Otros usuarios de la misma maquinaria**

Los otros usuarios son una fuente de información obvia y muy valiosa acerca de lo que puede fallar en activos físicos comúnmente utilizados. Sin embargo deben tomarse en cuenta los mismos comentarios anteriores acerca de los peligros de la información genérica al contemplar estas fuentes de información.

✓ **Registros de antecedentes técnicos**

Los registros de antecedentes técnicos también pueden ser una valiosa fuente de información. Sin embargo, deben ser tratados con cautela ya que frecuentemente son incompletos, a menudo describen lo que fue hecho para reparar la falla en vez de lo que la causó, y generalmente describen modos de falla que en realidad son efecto de alguna otra falla.

✓ **Las personas que operan y mantienen el equipo**

En la mayoría de los casos la mejor fuente de información para preparar un AMFE son las personas que operan y mantienen el equipo en el día a día. Ellos tienden a conocer más acerca del funcionamiento del equipo, acerca de qué puede sucederle, qué importancia tiene cada falla y qué debe hacerse para repararla. Y si no lo saben, son ellos quienes tienen más motivos para averiguarlo.

- ♦ **Una Hoja de Información completa:** Los efectos de falla se registran en la última columna de la Hoja de Información, junto al modo de falla correspondiente, como lo muestra la Figura 32.

| HOJA DE INFORMACIÓN | SISTEMA / ACTIVO: Turbina de gas de 5 MW | SISTEMA No. 216 - 05 | FACILITADOR N. Smit | FECHA 7- 7 - 1996 | HOJA 1 |
|---------------------|--|--------------------------------------|--|---|-----------|
| RCM II | SUB-SISTEMA / COMPONENTE: Sistema de Escape | SUBSISTEMA N° 216 - 05 - 11 | AUDITOR J Jones | FECHA 7 -8 - 1996 | DE 3 |
| FUNCIÓN | | FALLA FUNCIONAL (Perdida de función) | MODO DE FALLA Causa de la Falla | EFECTO DE LA FALLA (Que sucede cuando se produce la falla) | |
| 1 | Conducir sin restricciones todos los gases calientes de escape de la turbina hasta un punto fijado a 10 metros por encima del lecho de la sala de turbinas | A Conducción totalmente bloqueada | 1 Montantes del silenciador corroídos | El ensamble del silenciador colapsa y cae al fondo del conducto. La contrapresión hace que la turbina se acelere violentamente y se pare a una alta temperatura de escape. Tiempo de parada de máquina para reemplazar el silenciador, hasta cuatro semanas. | |
| | | B Flujo de gas restringido | 1 Se desprende parte del silenciador por fatiga | Según la naturaleza del atasco, la temperatura de escape puede subir hasta parar la turbina. Partículas de deshecho sueltas podrían dañar partes de la turbina. Tiempo de parada de máquina para reparar el silenciador, 4 semanas. | |
| | | C No contiene todo el gas | 1 Se agujerea la junta flexible por corrosión | La junta flexible está dentro de (a campana de la turbina, de modo que la mayor parte de la fuga de los gases de escape sería evacuada por el sistema de extracción de la campana. No es probable que los mecanismos existentes de detección de incendio y gases dentro de la campana detecten una fuga de gases de escape, y es improbable que la temperatura suba lo suficiente como para hacer disparar la alarma detector de fuego. Una pérdida grave puede hacer que se sobrecaliente el separador de partículas sólidas y líquidas en los gases. Así como fundir la alarma de control situada cerca de la fuga, con consecuencias imprevisibles. Los equilibrios de presión dentro de la campana son tales que es probable que poco, o ningún, gas pueda escapar por una fuga pequeña, de manera que es posible que no se detecte una fuga pequeña por el olfato o el | |

| | | | | | | |
|---|--|---|---|---|---|---|
| | | | 2 | Junta del conducto colocada incorrectamente | Los gases se fugan al interior de la sala de turbinas y la temperatura ambiente sube. El sistema de ventilación de la sala de turbinas evacuaría los gases a través de las rejillas a la atmósfera, por lo cual se considera poco probable que la concentración de gases de escape alcance niveles nocivos. Una fuga pequeña en este punto puede ser audible. Tiempo de parada de máquina para reparar, | |
| | | | 3 | Fuelle superior agujereado por corrosión | Los fueles superiores están situados fuera de la sala de turbinas, de manera que los gases procedentes de una fuga aquí se dispersarían a la atmósfera. Puede que suba el nivel de ruido del ambiente. Tiempo de parada de máquina para reparar, hasta 1 semana. | |
| | | D | 1 | El gas no alcanza un punto a 10 metros por encima del techo | 1 Bufones de montaje de la chimenea de escape cortados por oxidación | Probablemente la chimenea comience a inclinarse, y sea sostenida por los cables de anclaje por un tiempo, antes de derrumbarse. Si cayera, existe una gran posibilidad de que dañe una estructura ocupada por personas. Tiempo de parada de máquina para reparar, entre varios días y varias semanas. |
| | | | 2 | Chimenea de escape derribada por vientos fuertes | La estructura del conducto está diseñada para soportar vientos de hasta 350 Km./h. por lo que solo tiene posibilidades de caerse durante una tormenta si los cables de anclaje han sido debilitados, quizá por corrosión. De ocurrir. Podía caer sobre un módulo de viviendas. Tiempo de parada de máquina para reparar, hasta varias | |
| 2 | Reducir el nivel de ruido del escape a nivel de ruido 30 de las Normas ISO, a 50 metros. | A | 1 | El nivel de ruido excede el Nivel de Ruido 30 de ISO, a 50 | 1 Malla de retención de material del silenciador corroída | La mayoría de! material se volaría hacia afuera, pero es posible que parte de él caiga al fondo del conducto y obstruya la salida de la turbina, causando una alta temperatura de gases de escape posible interrupción en el servicio de la turbina. Los niveles de ruido subirían progresivamente. Tiempo de parada de máquina para reparar, alrededor de 2 semanas. |
| | | | 2 | Fugas del conducto fuera de la sala de turbinas | ...etc. | |

| HOJA DE INFORMACIÓN | ELEMENTO: Sistema de Almacenaje de Benceno | | No. RCM 0S | FACILITADOR N. Smit | FECHA | HOJA 1 |
|---------------------|--|-----------------|--------------------------------|--|--|--------|
| RCM II | COMPONENTE: | | REF. 3 ^{era} Edición | AUDITOR J. Jones | FECHA | DE 8 |
| FUNCION | | FALLA FUNCIONAL | | MODO DE FALLA (Causa de la falla) | EFECTOS DE LAS FALLAS (Qué sucede cuando falla) | |
| 1 | Suministrar Benceno al proceso a un mínimo de 300 litros por minutos | A | No suministrar nada de Benceno | 1 Impulsor trabado por objetos extraños | El motor de la bomba se sobrecarga, y se enciende el indicador de "Motor Sobrecargado" en la sala de control. La presencia del filtro aguas arriba significa que esta falla sólo puede ocurrir si algo es olvidado en el sistema luego del mantenimiento, o si falta el filtro o está perforado. Toma cuatro horas cambiar el conjunto | |
| | | | | 2 Rodamientos del eje agarrotados por desgaste y rotura | El motor de la bomba se sobrecarga, y se enciende el indicador de "Motor Sobrecargado" en la sala de control. Se para el suministro de benceno al proceso, haciendo sonar alarmas adicionales. Toma cuatro horas reponer la bomba | |
| | | | | 3 La bomba se detiene debido a falsa señal del mecanismo | El mecanismo que pudo apagar la bomba de este modo es el disparo por motor sobrecargado, el mecanismo de funcionamiento en vacío o el termostato. A pesar de que estas fallas son raras, cada una toma tres horas diagnosticar y reparar | |
| | | | | 4 Rodamiento de impulsor agarrotado por grandes partículas en el benceno | Esta falla es considerada extremadamente improbable si el filtro en la línea de alimentación es mantenido adecuadamente. <i>Ver función 17 mes adelante</i> | |

| | | | | | | |
|--|--|--|--|---|--|--|
| | | | | 5 | Bujes del impulsor de la bomba desgastados | Estos bujes están hechos de carburo de silicio, por lo tanto tienden a desgastarse muy lentamente si el benceno se mantiene razonablemente limpio. Un desgaste severo puede hacer que los imanes interiores toquen la carcasa, posiblemente dañándola y sobrecargando la bomba. El indicador "Motor Sobrecargado" se enciende en la sala de control e interrumpe el suministro de benceno al proceso. Cuatro horas para reemplazar el conjunto del impulsor |
| | | | | 6 | Válvula V2 cerrada | La bomba funciona en vacío y la protección de funcionamiento en vacío detiene el motor. El indicador "Funcionamiento en Vacío" se enciende en la sala de control. Quince minutos para diagnosticar el problema y abrir la válvula |
| | | | | 7 | Válvula V3 cerrada | La bomba se sobrecalienta y el protector de temperatura la apaga, o cavila y la protección de funcionamiento en vacío la apaga. Uno o ambos indicadores se encienden en la sala de control. Quince minutos para diagnosticar el problema y abrir la válvula |
| | | | | 8 | Válvula de retención falla en posición abierta | Cuando el nivel del tanque es bajo y la bomba está apagada el aceite de la línea de aspiración retoma al tanque. Dependiendo de la cantidad de benceno en el resto de la línea de suministro, esto puede causar problemas de cebado de la bomba y hacer que el sistema de protección de funcionamiento en vacío detenga la bomba. El sistema puede ser cebado manualmente en una hora desde el final del proceso. Toma seis horas desmontar la línea de suministro y cambiar la válvula de retención |

| | | | | | | |
|---|---|------------------------|--|--|---|--|
| HOJA DE INFORMACIÓN | ELEMENTO: Sistema de Almacenaje de Benceno | No. 0S | RCM | FACILITADOR N. Smit | FECHA | HOJA 2 |
| RCM II | COMPONENTE: | REF. Edición | 3 ^{era} | AUDITOR J Jones | FECHA | DE 8 |
| FUNCION: Suministra benceno a menos de 300 litros por minuto | | FALLA FUNCIONAL | | MODO DE FALLA (Causa de la falla) | EFFECTOS DE LAS FALLAS (Qué sucede cuando falla) | |
| 1 | Suministrar Benceno al proceso a un mínimo de 300 litros por minutos (continuación) | A | | 9 | Bujes del impulsor agarrotados por falta de lubricante (lubricados por benceno) | Si estos bujes se agarrotan, la atracción magnética hace que el sistema de sobrecarga del motor pare el motor. No obstante, si la alimentación de benceno a los rodamientos se detiene, la unidad de funcionamiento en vacío debería actuar sobre el motor antes que los bujes se dañen. <i>Ver también la función 8</i> |
| | | | | 10 | Tanque vacío | <i>Ver función 2 y 3 más adelante</i> |
| | | | | 11 | Falla el motor | <i>Se analiza aparte el motor</i> |
| | | | | 12 | Falta | <i>Se analiza aparte el suministro de electricidad</i> |
| | | B | Suministrar Benceno a menos de 300 litros por minuto | 1 | Impulsor de la bomba desgastado | El flujo a través de la bomba declina gradualmente a medida que el impulsor se deteriora. Finalmente la bomba toma más de una hora para transferir 18.000 litros de benceno al proceso. El operador de proceso daría aviso. Toma cuatro horas cambiar el conjunto del impulsor |
| | | | | 2 | Formación de partículas ferrosas dentro de la carcasa | La formación de partículas ferrosas reduce la eficiencia del torque magnético. Si esto no hace sobrecargar al motor o recalentar la bomba, la bomba demora más de una hora en transferir 18.000 litros de benceno al proceso. Toma cuatro horas reemplazar el conjunto del impulsor |

| | | | | | | |
|---|--|---|---------------------|---|---|--|
| | | | | 3 | Filtro parcialmente tapado | Un filtro parcialmente tapado puede reducir el caudal a menos de 300 litros/min. Sin interferir con la operación de la bomba. Cuando la presión diferencial en el manómetro de presión que está montado en el filtro, alcanza alrededor de 7 psi (0,5 kg/cm ² ; 500 h Pascales). El caudal baja de 300 litros/min). Los operadores de proceso también notarían el bajo caudal. Toma 15 minutos cambiar el filtro |
| 2 | Contiene el benceno y el vapor del benceno | A | No contiene benceno | 1 | Pérdida de tanque debido a falla de soldadura | Una pequeña pérdida hace que la alarma de bajo nivel suene en la sala de control cuando el nivel baja de 20.500 litros. Una pérdida mayor activa ambas alarmas, la de bajo nivel y la de último bajo nivel, que hace sonar otra alarma y detiene todo el proceso de benceno. Cualquier pérdida del tanque debe ser contenida por el muro y debe ser desagotada con la precaución adecuada. No obstante, el riesgo de incendio se incrementa notablemente hasta que la contención y el tanque sean limpiados y purgados. Si no ocurre un incendio, toma doce horas por lo menos drenar la contención y es necesario evacuar parte del personal del lugar. Toma varios días reparar el tanque, pero pueden hacerse arreglos alternativos para almacenar el benceno en dos días |

| | | | | | |
|--|--|--|---|--|---|
| | | | 2 | Pérdida del tanque debido A corrosión. | Es cierto que se verían signos de óxido o corrosión extrema (burbujas bajo la pintura o rastros de óxido sobre la superficie) mucho antes de causar una pérdida. Si ocurre una pérdida, la contención se llena con benceno y debe ser drenado, incrementando el riesgo de incendio y necesitando evacuar parte del personal del lugar. Un tanque muy oxidado debe ser cambiado, llevando tres semanas por lo menos. |
|--|--|--|---|--|---|

| | | | | | |
|---------------------|---|---|---|--|-----------|
| HOJA DE INFORMACIÓN | ELEMENTO: Sistema de Almacenaje de Benceno | No. RCM 0S | FACILITADOR N. Smit | FECHA | HOJA 3 |
| RCM II | COMPONENTE: | REF. 3 ^{era} Edición | AUDITOR J Jones | FECHA | DE 8 |
| FUNCIÓN | | FALLA FUNCIONAL | MODO DE FALLA (Causa de la falla) | EFECTOS DE LAS FALLAS (Qué sucede cuando falla) | |
| | | No contiene el benceno <i>continuación</i>) | 3 Fallan soportes de acero por corrosión | El pandeo total de uno de los soportes de acero hace que un extremo del tanque caiga sobre un canto agudo, casi seguramente perforando el tanque. El muro de contención se llena con benceno y debe ser drenado, incrementando el riesgo de incendio y necesitando evacuar parte del personal del lugar. Se ven signos de óxido o corrosión así come burbujas bajo la pintura o rastros de óxido sobre la superficie del soporte. Toma tres días reemplazar un soporte | |
| | | | 4 Tanque adherido al soporte del extremo libre y temperatura cambia más de | Las fluctuaciones extremas de temperatura pueden fisurar el tanque, llenando el muro de contención de benceno. (Ver también función 25 más adelante) | |
| | | | 5 Falla junta de brida en tubería | La mayoría de estas juntas están ubicadas fuera del muro de contención, por lo tanto la falla de una brida derramará benceno al suelo y por consiguiente incrementará el riesgo de incendio. Sin embargo, se sabe que este tipo de falla casi siempre es precedida por pequeñas pérdidas. Toma seis horas purgar la cañería y reemplazar la junta de brida | |

| | | | | | | |
|--|--|---|---------------------------------|---|--|---|
| | | | | 6 | Sello en carcaza de bomba colocado incorrectamente | La "lata" está cubierta por la carcaza externa de la bomba y está diseñada para soportar una presión establecida de 16 bares. Por tanto se presiente que la bomba sólo perdería si un 0-ring o sello estuviesen montados incorrectamente. Si esto no se hace evidente inmediatamente durante la prueba luego de la instalación, se estima que la falla sería precedida por pequeñas pérdidas. La bomba también está ubicada fuera del muro de contención, por lo tanto las pérdidas en este punto se derraman al suelo. Toma seis horas reemplazar un sello de la bomba |
| | | | | 7 | Fallan ambos interruptores de alto y último alto nivel en detener la bomba de alimentación | El benceno puede ser expulsado a través del venteo. <i>Ver modos de falla 4-A-1 y 7 - A -1 más adelante</i> |
| | | B | No contiene el vapor de benceno | 1 | Tapa de acceso no colocada | La falta de una tapa de acceso incrementa substancialmente la razón a la que el vapor de benceno escapa a la atmósfera, incrementando sensiblemente el riesgo de incendio También implica que la lluvia y otras sustancias generadas en el aire puedan introducirse en el benceno, pudiendo interferir en el proceso aguas abajo. Generalmente toma algunos minutos encontrar y colocar la tapa |
| | | | | 2 | Sello de tapa de acceso colocado incorrectamente | Una colocación incorrecta derivará en un escaso ajuste o un sello dañado. Esto significa que el vapor escapa a la atmósfera incrementando sensiblemente el riesgo de incendio Toma una hora colocar un sello nuevo |
| | | | | 3 | Pierde el sistema de manejo de vapor | <i>Se analiza aparte el sistema de manejo de vapor</i> |

| HOJA DE INFORMACIÓN | ELEMENTO: Sistema de Almacenaje de Benceno | No. RCM 0S | FACILITADOR N. Smit | FECHA | HOJA 4 |
|---------------------|---|--|--|---|-----------|
| RCM II | COMPONENTE: | REF. 3 ^{era} Edición | AUDITOR J Jones | FECHA | DE 8 |
| FUNCIÓN | | FALLA FUNCIONAL | MODO DE FALLA (Causa de la falla) | EFECTOS DE LAS FALLAS (Qué sucede cuando falla) | |
| 3 | Comenzar a cargar el tanque cuando el nivel baja de 21.000 litros | No comienza a llenarse a los 21.000 litros | 1 Falla el sistema de nivel ultrasónico (no enciende la bomba a los 21.000 litros de nivel) | Suena la alarma de bajo nivel cuando el nivel baja de 20.500 litros, donde el tanque todavía contiene suficiente benceno para procesar un batch más. La bomba de alimentación puede encenderse manualmente. Más de seis horas para diagnosticar y reparar la falla en el sistema | |
| | | | 2 Válvula de ingreso atascada en posición cerrada | Suena la alarma de bajo nivel cuando el nivel baja de 20.500 litros, aunque es probable que las alarmas de alto nivel del sistema de recuperación de benceno estén sonando mucho antes. Toma alrededor de 4 horas purgar la tubería de alimentación y cambiar la válvula. (En la práctica, esta válvula solamente se cierra cuando se está por hacer mantenimiento al tanque) | |
| | | | 3 El interruptor de último alto nivel falla en posición abierta | Suena la alarma de alto nivel y la planta de recuperación de solvente se detiene, por consiguiente no se suministra benceno al tanque y el nivel cae. Los indicadores de nivel locales y remotos muestran el nivel del tanque por debajo del último alto nivel. Tiempo para diagnosticar y rectificar: 3 horas | |
| | | | 4 Falla la planta recuperadora de solvente | <i>Se analiza aparte la planta de recuperación de solvente</i> | |
| | | | 5 Pérdida mayor de benceno | El benceno fluye hacia afuera más rápido de lo que entra causando que el nivel baje. <i>Ver función 2 anterior</i> | |
| 4 | Detener la bomba de alimentación cuando el nivel de benceno no alcanza 39.000 litros. | A No detiene la bomba a los 39.000 litros | 1 El sistema de nivel ultrasónico no detiene la bomba de alimentación | El interruptor de alto nivel detiene la planta recuperadora y suena una alarma en la sala de control. En esta instancia, hay suficiente benceno en el tanque para alimentar dos batches. Seis horas para diagnosticar y reparar una falla en el sistema ultrasónico | |

| | | | | | | |
|---|--|---|---|---|---|---|
| 5 | Ser Capaz de hacer sonar una alarma si el nivel de benceno en el tanque baja más de 20.500 litros | A | Incapaz de hacer sonar una alarma cuando el nivel del tanque baja más de 20.500 litros | 1 | Falla el circuito de alarma de bajo nivel | Los operadores no serán alertados por fallas que hagan bajar el nivel del tanque, por consiguiente continuará bajando hasta los 2.000 litros, donde el interruptor de último bajo nivel detendrá la bomba de suministro y la planta recuperadora de solvente. Seis horas para diagnosticar y reparar una falla en el circuito de bajo nivel |
| 6 | Ser capaz de apagar las bombas de suministro y de alimentación y hacer sonar una alarma en la sala de control si el nivel del tanque baja más de 2.000 litros. | A | Incapaz de apagar la bomba de suministro y la de alimentación cuando el nivel del tanque baja de 2.000 litros | 1 | Falla el circuito de detención de último bajo nivel en posición cerrada | Este circuito sólo es necesario si los circuitos del interruptor de bajo nivel y la alarma fallan. El tanque se vacía, la bomba de suministro funciona en vacío y ésta sería detenida por la unidad de funcionamiento en vacío. El proceso aguas abajo se detiene debido a la falta de benceno. Toma ocho horas reponer el interruptor debido a que el tanque necesita primero ser drenado y purgado. Las otras partes del circuito pueden ser reparadas en una o dos horas |
| | | A | Incapaz de hacer sonar una alarma cuando el nivel del tanque baja de 2.000 litros | 1 | Falla el circuito de alarma de último bajo nivel | Los operadores no sabrían si el nivel bajó a 2.000 litros o menos, y por lo tanto sólo iniciarían acciones para remediarlo cuando el proceso aguas abajo pare por falta de benceno. Esto podría causar más de cuatro horas de parada adicional. Toma de una a ocho horas reparar este circuito, dependiendo de donde ocurra la falla |

| | | | | | | |
|---------------------|---|------------------------|--|------------------------|--|---|
| HOJA DE INFORMACIÓN | ELEMENTO: Sistema de Almacenaje de Benceno | No. | RCM 0S | FACILITADOR Smit N. | FECHA | HOJA 5 |
| RCM II | COMPONENTE: | REF. Edición | 3 ^{era} | AUDITOR Jones J | FECHA | DE 8 |
| FUNCIÓN | | FALLA FUNCIONAL | | 4.1.1.1 | MO DO | EFFECTOS DE LAS FALLAS (Qué sucede cuando falla) |
| 7 | Ser capaz de detener la planta de recuperación de benceno y hacer sonar una alarma si el nivel del tanque sobrepasa 42.000 litros | A | Incapaz de detener el sistema de recuperación de benceno y hacer sonar una alarma cuando el nivel del tanque sobrepasa 42.000 litros s | 1 | Interruptor de último alto nivel falla en posición cerrada | Este interruptor sólo es necesario si el interruptor de alto nivel falla. El sistema de recuperación de solvente continúa suministrando benceno. Esto hace que se llene completamente el tanque, causando que rebalse a través del venteo al sistema de balance de vapor. Un interruptor flotante en el sistema de balance de vapor (analizado aparte) detecta el benceno líquido y detiene la planta recuperadora de solvente. Tiempo de parada para cambiar el interruptor de último alto nivel 2 horas |
| | | B | Capaz de detener la recuperación de solvente pero no de hacer sonar una alarma cuando el tanque sobrepasa 42.000 litros | 1 | Falla del circuito de alarma de último alto nivel | Este circuito de alarma sólo es necesario si falla el interruptor de alto nivel. Si el circuito de alarma falla pero funciona el interruptor de último alto nivel, la planta recuperadora de solvente es detenida pero no es evidente inmediatamente por qué ocurrió esto. Esto significa que puede tomar más de cinco horas diagnosticar y reparar la falla de interruptor de alto nivel en lugar de tres horas. Toma tres horas reparar el circuito de alarma de último alto nivel |
| 8 | Detener la bomba si para el flujo de benceno a través de los bujes del impulsor. | A | Incapaz de detener la bomba cuando para el flujo de benceno a través de los bujes del impulsor | 1 | Falla unidad de protección de funcionamiento en vacío | Si el flujo de benceno para y la protección de funcionamiento en vacío no funciona, la bomba comienza a recalentarse y la protección térmica apaga la bomba antes de que se vuelva peligrosamente caliente. Sin embargo, es factible que se dañen los bujes antes de que la unidad de alta temperatura tenga la oportunidad de apagar una bomba en vacío. Tiempo para reparar solamente la unidad de funcionamiento en vacío: alrededor de tres horas |
| 9 | Detener la bomba si la temperatura de los bujes del impulsor sobrepasa los 70°. | A | No detiene la bomba cuando los bujes del impulsor sobrepasan los 70°C | 1 | Falla la unidad de protección de alta temperatura | La unidad de protección de alta temperatura se necesita cuando el flujo de benceno disminuye tanto que puede calentarse hasta el punto de ebullición al atravesar los bujes. En este caso, el benceno se vaporizará y la unidad de funcionamiento en vacío apagará el sistema. Si la unidad de funcionamiento en vacío falla también en estas circunstancias. Los bujes del impulsor se agarrotan y la sobrecarga del motor apaga al motor. Tiempo para reparar la unidad de alta temperatura: cuatro horas |

| | | | | | | |
|----|--|---|--|---|--|---|
| 10 | Mantener una presión en el tanque entre 10 hpa y 12 hPa. | A | La presión sobrepasa 12 HPa | 1 | Válvula de alivio de presión del sistema de recuperación de vapor falla cerrada | En un día caluroso, el sistema puede sobrepresurizarse a tal punto que podría fisurarse algún punto débil, liberando benceno o vapor de benceno al medio ambiente. <i>(El sistema de manejo del vapor se analiza aparte)</i> |
| | | B | La presión baja a menos de 10 HPa | 1 | La válvula de control de presión del sistema de recuperación de vapor falla cerrada | Cuando la bomba de suministro es activada comienza a formarse vacío en el tanque, haciendo disminuir el caudal y finalmente deteniendo todo. La bomba comienza a cavilar y la unidad de funcionamiento en vacío la apaga. (El tanque mismo puede soportar la presión negativa que sería generada si esto sucede.) <i>Se analiza aparte el sistema de manejo de vapor</i> |
| 11 | Permitir que el tanque sea drenado. | A | No se puede drenar el tanque completamente | 1 | Falta de grasa protectora en el vástago, permite que el vástago se corte por corrosión | La tubería de salida normal puede usarse para desagotar todo menos los últimos 200 litros de benceno (a través de la bomba, o si la bomba falló, por medio de un sifón). El drenaje es necesario para desagotar los últimos 200 litros, y esto sólo tiene que hacerse para llevar a cabo mantenimiento al tanque. Si la válvula de drenaje falla cerrada, e residuo debe ser bombeado afuera a través de la tapa de acceso y el tanque debe ser purgado. Este proceso completo lleva seis horas |

| HOJA DE INFORMACIÓN | ELEMENTO: Sistema de Almacenaje de Benceno | | No. de RCM 0S | FACILITADOR N. Smit | FECHA | HOJA 6 |
|---------------------|---|-----------------|--|-----------------------------------|---|--|
| RCM II | COMPONENTE: | | REF. 3 ^{era} Edición | AUDITOR J Jones | FECHA | DE 8 |
| FUNCIÓN | | FALLA FUNCIONAL | | MODO DE FALLA (Causa de la falla) | | EFECTOS DE LAS FALLAS (Qué sucede cuando falla) |
| 12 | Permitirá a los bomberos apagar la bomba a distancia en caso de incendio. | A | Incapaz de apagar la bomba a distancia en caso de incendio. | 1 | Falla circuito de control de los bomberos | El sistema puede continuar bombeando benceno al corazón del fuego, haciendo de una mala situación una mucho peor. Lleva más de 3 horas diagnosticar y reparar una falla en este circuito |
| 13 | Dejar que las llamas de un fuego externo se propaguen dentro del tanque. | A | Las llamas pueden propagarse dentro del tanque | 1 | Malla antilama perforada o perdida | El contenido del tanque de benceno se sumaría a cualquier siniestro, haciendo de un mala situación una mucho peor. Toma cuatro horas cambiar la malla debido a que primero deben ser drenados y purgados el tanque y el sistema de manejo de vapor |
| 14 | Prevenir la formación de corrientes estáticas en el tanque. | A | No previene la formación de comente estática | 1 | Puesta a tierra cortada | La corriente estática causada por el llenado del tanque debe ser descargada normalmente a través de la estructura y tuberías. Sin embargo, si este paso a la tierra falla, una puesta a tierra cortada puede causar chispas que pueden llevar a un fuego o explosión. Tiempo para reparar la puesta a tierra: 2 horas |
| 15 | Indicar que el tanque contiene líquido inflamable y toxico. | A | No indica que el tanque contiene líquido inflamable y tóxico | 1 | Cartel de advertencia deteriorado | El deterioro incluye el descascarado o la acumulación de polvo sobre el cartel, haciéndolo ilegible. Esto incrementa el riesgo de que la gente que trabaja en o cerca del tanque no tome las precauciones adecuadas tales como evitar chispas en las cercanías del tanque, utilizar indumentaria protectora adecuada y máscara de respiración si tiene que meterse dentro del tanque. Preparar y colocar un nuevo cartel toma dos días |
| | | | | 2 | Cartel de advertencia cubierto o perdido | Un cartel cubierto o perdido es ilegible incrementando el riesgo de que la gente que trabaja en o cerca del tanque no tome las precauciones adecuadas tales como evitar chispas en las cercanías del tanque y utilizar indumentaria protectora adecuada, más cara de respiración si tiene que meterse dentro del tanque. Preparar y colocar un nuevo cartel toma dos días |

| | | | | | | |
|----|---|---|---|---|---|---|
| 16 | Indicar el nivel de benceno en el tanque localmente y en la sala de control con una tolerancia de 2% sobre el contenido real. | A | Incapaz de indicar el nivel en la sala de control | 1 | Falla el sistema indicador de nivel Ultrasónico | Los operadores pueden caminar hasta el indicador local para chequear el nivel. Toma más de cuatro horas diagnosticar y corregir la falla en el sistema |
| | | B | Incapaz de indicar el nivel localmente | 1 | Falla el indicador local | Este indicador es probable que sea necesario sólo por excepción (cuando ha fallado < indicador remoto o antes de mantenimiento), por lo tanto una decisión tomada incorrectamente en ausencia de esta información puede tener serias implicancias. Reparar o cambiar este indicador lleva más de cuatro horas debido a que el tanque necesita s drenado y purgado |
| | | C | La lectura del indicador de nivel varía más del 2% del real | 1 | Indicador impreciso | No es necesaria una gran precisión en este contexto, pero los operadores creen que un error de más del 2% puede comenzar a afectar la validez de sus decisiones. El tiempo de recalibrado es casi el mismo que el de reparación para ambos indicadores |

| HOJA DE INFORMACIÓN | ELEMENTO: Sistema de Almacenaje de Benceno | No. RCM OS | FACILITADOR N. Smit | FECHA | HOJA 7 |
|---------------------|---|---|--|---|-----------|
| RCM II | COMPONENTE: | REF. 3 ^{era} Edición | AUDITOR J Jones | FECHA | DE 8 |
| FUNCIÓN | | FALLA FUNCIONAL | MODO DE FALLA (Causa de la falla) | EFECTOS DE LAS FALLAS (Qué sucede cuando falla) | |
| 17 | Prevenir que partículas mayores a 150 μ m alcancen a la bomba | A No previene el ingreso de partículas mayores a 150 μ m a la bomba | 1 Falta filtro | Las partículas mayores a 150 μ m pasan a través del filtro, llevando a un acelerado desgaste y posible agarrotamiento de los bujes del impulsor. El manómetro diferencial indica cero cuando no está el filtro, y toma 15 minutos instalar un filtro nuevo | |
| | | | 2 Filtro roto | La única vez que ocurrió fue cuando el filtro estaba dañado antes de la instalación. U tro roto permite que pasen partículas mayores a 150 μ m, llevando a un acelerado de gaste y posible agarrotamiento de los bujes del impulsor. El manómetro diferencial ir cero cuando no hay ningún elemento presente, y toma 15 minutos instalar un filtro nuevo | |
| 18 | Indicar la presión diferencial a través de filtro con un error de hasta un 20% de la presión real | A Indica una presión diferencial con un error mayor al 20% de la presión real | 1 Manómetro diferencial descalibrado | Se vuelve cada vez más difícil anticipar el bloqueo del filtro, y tomaría más tiempo necesario para diagnosticar la falla si se tapa. En ambos casos lleva a un incremento de la parada. Toma una hora cambiar el manómetro diferencial | |
| 19 | Contener el benceno en caso de pérdida del tanque | A Incapaz de contener el benceno en caso de pérdida del tanque | 1 Fisura, abertura o pequeño agujero en el muro o piso de contención | Dependiendo de la severidad, una pérdida en la contención hace que cualquier pe da de benceno que escape del tanque, escape al suelo alrededor del muro de contención y posiblemente al sistema de desagüe pluvial. Esto extiende la probabilidad d peligro de incendio y también constituye una incursión ambiental mayor. La limpie; puede llevar varios días y podría necesitarse excavar y reubicar gran cantidad de 1 hora contaminada. Toma 3 semanas reconstruir el muro de contención | |
| | | | 2 Válvula de drenaje del muro de contención dejada abierta | Una válvula abierta permite que cualquier pérdida de benceno del tanque salga directa mente afuera del muro de contención. En caso de una pérdida mayor, esto no sólo necesitara evacuar la mayoría de la planta, sino también parte del pueblo circundante. Lleva minutos cerrar la válvula de drenaje del muro de contención. (Ver 20-A -1 más adelante) | |

| | | | | | | |
|----|--|---|---|---|---|--|
| | | | | 3 | Muro de contención todavía tiene agua de lluvia | Si ocurre una pérdida mayor y la contención todavía tiene más del 10% de agua de ll el muro de contención puede rebasarse. El muro de contención tiene 1m de alto. Ocurren grandes chaparrones a lo largo del año, depositando un promedio de 900 mm : año. Si una gran cantidad de agua está presente cuando el benceno rebasa, el benceno puede ser diluido e infiltrarse en un una cantidad anormal de lugares no deseados |
| 20 | Asegurar que la válvula de drenaje del muro de contención sea abierta solamente por personal autorizado. | A | La válvula es abierta por cualquiera | 1 | Seguro de válvula de drenaje abierto o perdido | La válvula de drenaje puede ser abierta por cualquiera en cualquier momento, lo q puede causar que el benceno que se pierde escape del muro de contención. Toma dos horas colocar un nuevo seguro de drenaje |
| 21 | Permitir que el muro de contención sea drenado. | A | El muro de contención es incapaz de ser drenado | | Drenaje obstruido por objeto extraño | Un drenaje obstruido significa que el agua de lluvia no podrá ser drenada inmediatamente de la contención. Toma 30 minutos desbloquear el drenaje. |
| | | | | 2 | Válvula de drenaje perdida | Un drenaje bloqueado cerrado significa que el agua lluvia no podrá inmediatamente de la contención. Toma 30 minutos desbloquear el drenaje. |

| HOJA DE INFORMACIÓN | ELEMENTO: Sistema de Almacenaje de Benceno | No. RCM 0S | FACILITADOR N. Smit | FECHA | HOJA 8 |
|---------------------|--|--|--|--|-----------|
| RCM II | COMPONENTE: | REF. 3 ^{era} Edición | AUDITOR J Jones | FECHA | DE 8 |
| FUNCIÓN | | LA FALLA FUNCIONAL | MODO DE FALLA (Causa de la falla) | EFECTOS DE LAS FALLAS (Qué sucede cuando falla) | |
| 22 | Permitir a un hombre de talla normal entrar al tanque utilizando indumentaria de seguridad adecuada. | A No permite que un hombre de talla formal entre al tanque utilizando indumentaria protectora adecuada | 1 Tornillos de hierro de la tapa de acceso oxidados | La especificación indica usar bulones de acero inoxidable en la tapa. Sin embargo, anteriormente se han colocado sin querer bulones de hierro en tanques similares. Estos se oxidaron y tuvieron que ser quitados con mucho cuidado debido al riesgo de incendio. Tiempo para sacar los bulones oxidados y abrir la tapa: dos horas. (Si los bulones no están oxidados, la tapa de acceso puede quitarse en alrededor de diez minutos) | |
| 23 | Permitir acceso a un hombre de 200 Kg. Subir al tope del | A No permite el acceso a un hombre e hasta 200kg subir al tope cima el tanque | 1 Tornillos de sujeción de escalera a tanque sueltos | Los escalones están abullonados al tanque en 6 lugares. Por lo menos tres de éstos necesitan caerse antes de que la situación se vuelva peligrosa. Toma una hora reemplazar los bulones | |
| | | | 2 Estructura o escalones de la escalera fallan por corrosión | La escalera está pintada con el mismo compuesto que el tanque. Este compuesto tiene diez años de vida por diseño. Deben verse signos de óxido o corrosión, como burbujas bajo la pintura o rastros de óxido sobre la superficie. Toma cuatro horas repintar la escalera, o seis horas cambiarla | |
| 24 | Prevenir que la carga se caiga del tope del tanque. | A Incapaz de prevenir que la gente e caiga desde el tope del tanque | 1 Baranda destornillada del soporte | La única vez que ocurrió, un operador se inclinó sobre la baranda sin notar que estaba destornillada. La baranda se calló y el operador se salvó de una posible grave lesión aferrándose de uno de los soportes mientras caía | |
| | | | 2 Falla la baranda por corrosión | La baranda está pintada con el mismo compuesto que el tanque. Este compuesto tiene diez años de vida por diseño. Deben verse signos de óxido o corrosión, como burbujas bajo la pintura o rastros de óxido sobre la superficie. Toma cuatro horas repintar la baranda, o seis | |

| | | | | | | |
|----|---|---|--|---|--|---|
| 25 | Permitir el movimiento libre del tanque que por cambios de temperatura. | A | No permite el libre movimiento el tanque | 1 | Tanque adherido al soporte del extremo libre | Si al tanque no le es permitido moverse por cambios mayores de temperatura (especialmente cambios mayores a 35°C y más si no puede contraerse), puede ser tensionado al punto de fisurarse. Esto llenaría el muro de contención de benceno, creando un peligro de incendio y necesitando evacuar parte del lugar mientras la contención se drena. Un tanque fisurado también debe ser cambiado. Tiempo de parada para reparar el soporte: cuatro días |
| 26 | Tener un aspecto aceptado. | A | No tiene un aspecto aceptable | 1 | Pintura deteriorada | La pintura se descascara y se ve desagradable antes de que las propiedades de resistencia a la corrosión sean afectadas. Esto exhibe una imagen inaceptable a los clientes y directivos que visiten la planta, como también un mal mensaje a los empleados. Toma tres días repintar el tanque que necesita ser detenido y purgado de antemano. Se pueden hacer preparativos para almacenaje alternativo mientras el tanque es pintado |
| | | | | 2 | Superficie externa sucia | Un sistema sucio tiene el mismo efecto sobre los clientes, directivos y empleados que una pintura pobre. El tanque puede ser lavado en dos horas sin detenerlo |

FIGURA 30. HOJA DE INFORMACION COMPLETA

2.1.16 CONSECUENCIA DE LA FALLA

✓ **Técnicamente Factible y Merecer la Pena:** Cada vez que ocurre una falla, ésta de alguna manera afecta a la organización que utiliza el activo físico. Algunas fallas afectan la producción, la calidad del producto o la atención al cliente. Otras representan un riesgo para la seguridad o el medio ambiente. Algunas incrementan los costos operativos, por ejemplo al incrementar el consumo de energía, mientras que algunas tienen impacto en cuatro, cinco, o las seis áreas. Algunas otras aparentemente no tienen efecto alguno si ocurren por sí solas, pero ponen en riesgo a la organización, exponiéndola a fallas mucho más serias.

Si cualquiera de estas fallas no es prevenida, el tiempo y el esfuerzo que se necesitan para repararlas también afecta a la organización, porque la reparación de fallas consume recursos que podrían ser mejor utilizados para otras tareas más rentables.

La naturaleza y la gravedad de estos efectos definen la manera en que la falla es vista por la organización. El impacto de cada caso, es decir la manera en que es importante cada falla, depende del contexto operacional del activo físico, los parámetros de funcionamiento que se aplican a cada función, y los efectos físicos de cada modo de falla.

Esta combinación de contexto, parámetros, y efectos, significa que cada falla tiene un conjunto de consecuencias específicas asociadas a ella. Si las consecuencias son serias, entonces se harán esfuerzos considerables por prevenir la falla, o al menos para anticiparla a tiempo como para reducir o eliminar las consecuencias. Sobre todo si la falla podría causar heridas o la muerte a una persona, o efectos serios sobre el medio ambiente. Pero también si las fallas interfieren con la producción o las operaciones, o si pueden causar daños secundarios significativos.

Por otro lado, si la falla sólo tiene consecuencias menores, es posible que no se tome ninguna acción, y que la falla simplemente sea reparada cada vez que ocurra.

Esto sugiere que las consecuencias de las fallas son más importantes que sus características técnicas. También sugiere que la idea del mantenimiento proactivo no es tanto acerca de prevenir fallas sino de evitar o reducir las consecuencias de la falla.

“El mantenimiento proactivo tiene que ver mucho más con evitar o reducir las consecuencias de la falla que con prevenir la falla misma”.

Si aceptamos esto, entonces se entiende que cualquier tarea proactiva solo se justifica si resuelve adecuadamente las consecuencias de la falla que se pretende evitar.

Se justifica una tarea proactiva si resuelve adecuadamente las consecuencias de la falla que se pretende evitar.

Esto nos puede permitir anticipar o prevenir la falla. Si una tarea proactiva es técnicamente factible o no, depende de las características técnicas de la tarea, y de la falla que pretende evitar.

Si no es posible encontrar una tarea proactiva adecuada, la naturaleza de las consecuencias de falla también indican qué acción "a falta de" deben ser tomada.

A continuación, se consideran los criterios utilizados para evaluar las consecuencias de la falla, y así decidir si merece la pena realizar algún tipo de tarea proactiva. Estos criterios separan las funciones ocultas de las funciones evidentes.

Funciones Ocultas y Evidentes: Hemos visto que casi todo elemento de una planta tiene más de una, y a veces docenas de funciones. La mayoría de estas

funciones, cuando fallan, inevitablemente ponen en evidencia que ha ocurrido una falla.

Por ejemplo, algunas fallas hacen funcionar alarmas audiovisuales. Otras hacen que se paren las máquinas o que se interrumpa alguna otra parte del proceso. Otras dan lugar a problemas de calidad del producto, o a un incremento en el consumo de energía, y aún otros van acompañados de efectos físicos obvios tales como ruidos fuertes, escapes de vapor, olores extraños o manchas de líquido en el suelo.

En la figura 33 a continuación observamos tres bombas. Si se agarrota un rodamiento de la bomba A, se pierde la capacidad de bombeo. Esta falla por sí sola se manifestaría inevitablemente a los operadores o bien tan pronto como se produce, o bien al interrumpirse alguna operación situada más adelante en el proceso. (Posiblemente los operadores no se darán cuenta inmediatamente de que el problema tiene su origen en el rodamiento, pero inevitablemente se observará que algo anormal ha sucedido).

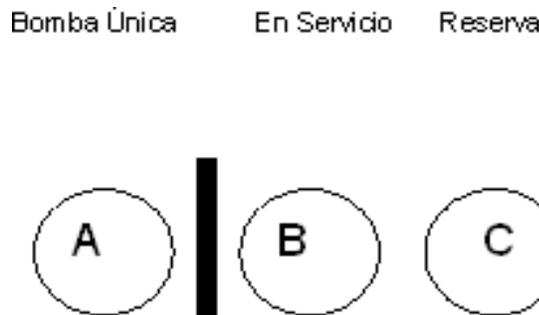
Se califican de evidentes las fallas de este tipo porque alguien se dará cuenta cuando se producen por si solas. Esto lleva a la siguiente definición de una función evidente:

“Una función evidente es aquella cuya falla finalmente e inevitablemente será evidente por sí sola a los operadores en circunstancias normales”

No obstante, algunas fallas ocurren de tal forma que nadie sabe que el elemento se ha averiado a menos que se produzca alguna otra falla.

Por ejemplo, si fallase la bomba C de la Figura 33, nadie se daría cuenta de que ha fallado porque en circunstancias normales la bomba B seguiría funcionando. Es decir. La falla de la bomba C por sí sola no tendría ninguna repercusión directa a menos que fallase la bomba B (lo cual sería una circunstancia anormal).

FIGURA 33. TRES BOMBAS



La bomba C exhibe una de las características más importantes de una función oculta, que es que la falla de la bomba por sí sola no es evidente a los operarios bajo circunstancias normales. Esto conduce a la siguiente definición de una función oculta:

Una función oculta es aquella cuya falla no se hará evidente a los operarios bajo circunstancias normales si se produce por sí sola.

El primer paso en el proceso de RCM es separar las funciones ocultas de las evidentes porque las ocultas necesitan de un manejo especial.

Veremos luego que estas funciones están asociadas a dispositivos de seguridad sin seguridad inherente.

Dado que suman hasta la mitad de los modos de falla que podrían afectar equipamientos modernos y complejos, las funciones ocultas bien podrían convertirse en el tema dominante del mantenimiento en los próximos diez años. Sin embargo para situar a las funciones ocultas en perspectiva, primero debemos considerar las fallas evidentes. Las fallas evidentes se clasifican en tres categorías de importancia decreciente de la siguiente manera:

1. Consecuencias para la seguridad y el medio ambiente: Una falla tiene consecuencias para la seguridad si puede lesionar o matar a alguien. Tiene consecuencias para el medio ambiente si puede infringir alguna normativa municipal, regional o nacional relativa al medio ambiente.

2. Consecuencias operacionales: Una falla tiene consecuencias operacionales si afecta a la producción o a las operaciones (volumen de producción, calidad de producto, servicio al cliente o costo operacional, además del costo directo de la reparación).

3. Consecuencias no operacionales: Las fallas evidentes que caen dentro de ésta categoría no afectan ni a la seguridad ni a la producción, de modo que sólo involucran el costo directo de la reparación.

Con esta jerarquización de las fallas evidentes, RCM garantiza que se consideren las repercusiones a la seguridad y el medio ambiente en todo modo de falla evidente.

Mediante este enfoque RCM inequívocamente coloca a las personas antes que a la producción. También significa que se evalúan en un solo ejercicio las consecuencias a la seguridad, el medio ambiente y las económicas, lo cual es mucho más eficaz que considerarlas por separado.

A continuación se desarrolla cada una de estas categorías detalladamente, comenzando por las consecuencias de categorías evidentes y pasando a los temas más complejos que hacen a las funciones ocultas.

CONSECUENCIAS DE CATEGORIAS DE FALLAS EVIDENTES

✓ Consecuencias para la seguridad y el Medio Ambiente

1. **Primero la Seguridad:** Como hemos visto, el primer paso en el proceso de evaluación de las consecuencias es identificar funciones ocultas para que éstas puedan ser tratadas apropiadamente. Todos los modos de falla restantes - en otras palabras fallas que no se clasifican como ocultas – deben ser; Evidentes por definición. El proceso RCM considera primero las consecuencias para la seguridad y el Medio Ambiente de cada modo de falla evidente. Lo hace preguntándose si alguien pudiera ser lastimado o morir como resultado directo del modo de falla mismo o cualquier otro daño que pueda ser causado por la falla.

“Un modo de falla tiene consecuencias para la seguridad si causa una pérdida de función u otros daños que pudieran lesionar o matar a alguien”.

En otro nivel, la "seguridad" se refiere a la integridad bienestar de la sociedad en general. Hoy en día las fallas que afectan a la sociedad tienden a calificarse como problemas "ambientales". Las expectativas de la sociedad se expresan en la forma de normativas ambientales municipales, regionales y nacionales. Algunas organizaciones tienen, además, sus propios reglamentos corporativos a más rigurosos. Se dice que un modo de falla tiene consecuencias ambientales si pudiera conducir a la infracción de cualquiera de estas normativas.

Un modo de falla tiene consecuencias ambientales si causa una pérdida de función u otros daños que pudieran conducir a la infracción de cualquier normativa o reglamento ambiental conocido. Notemos que al considerar si una falla tiene consecuencias o para la seguridad o el medio ambiente, estamos considerando si un modo de falla por sí solo podría tener esas consecuencias.

2. La Cuestión del Riesgo: Aunque la mayoría de las personas quisieran vivir en un medio en el que no exista posibilidad alguna de muerte o daño físico, generalmente se acepta que hay un elemento de riesgo en todo lo que hacemos. En otras palabras, cero absoluto es inalcanzable, aunque sea un objetivo el que vale la pena seguir luchando.

Esto inmediatamente nos lleva a preguntarnos qué es alcanzable. Para responder a esta pregunta, ante todo deber considerar la cuestión de riesgo en mayor detalle.

La evaluación del riesgo consta de tres elementos. Primero pregunta qué puede pasar si ocurre el evento en cuestión. El segundo se pregunta cuan probable es que ocurra el evento. La combinación de estos dos elementos nos provee de una medida del grado de riesgo. El tercer y con frecuencia el elemento más polémico, se pregunta si el riesgo es tolerable. Por ejemplo, consideremos un modo de falla que podría resultar en la muerte o daño físico de diez personas (lo que puede

ocurrir). Las posibilidades de que ocurra este modo de falla es de una en mil en un año cualquiera (la probabilidad de que ocurra). Basándose en éstos datos el riesgo asociado con esta falla es: $10 \times (1 \text{ en } 1\,000) = 1$ muerte cada 100 años. Ahora consideremos un segundo modo de falla que podría causar 1000 muertes, pero la posibilidad de que ocurra éste modo de falla es de 1 en 100 000 en un año cualquiera. El riesgo asociado con ésta falla es: $1\,000 \times (1 \text{ en } 100\,000) = 1$ muerte cada 100 años.

En estos ejemplos, el riesgo es el mismo aunque los datos en que se basa son bastante diferentes. Notemos también que estos ejemplos no indican si el riesgo es aceptable o no, simplemente lo cuantifica.

Notemos que a lo largo de ésta exposición, los términos "probabilidad" (1 en 10 de una falla en un período) y "tasa de falla" (1 en 10 períodos promedio, correspondiente a una media de tiempo entre fallas de 10 períodos) son utilizados como si fuesen intercambiables cuando se aplican a fallas al azar. En un sentido estricto, esto no es verdad. Sin embargo si el tiempo medio entre fallas (TMEF ó MTBF- Mean Time Between Failures-) es mayor que 4 períodos, la diferencia es tan pequeña que usualmente puede ser ignorada.

Los párrafos siguientes consideran cada uno de estos tres elementos de riesgo en mayor detalle.

3. ¿Qué puede pasar si ocurre la falla? Dos temas deben ser tenidos en cuenta al considerar lo que puede pasar si ocurre una falla. Éstos son, qué sucede realmente, y si es probable que alguien resulte lastimado o muerto como consecuencia.

Lo que sucede realmente si ocurre cualquier modo de falla debe ser registrado en la Hoja de Información RCM como efectos de falla, como se explica anteriormente. También hay una lista de efectos típicos que representan una amenaza para la seguridad o para el medio ambiente.

El hecho de que estos efectos podrían matar o herir a alguien no significa necesariamente que lo harán cada vez que ocurran. Algunos hasta podrían ocurrir con frecuencia sin hacerlo. Sin embargo, el tema no es si dichas consecuencias son inevitables o no, sino si son posibles.

Por ejemplo, si fallase el gancho de un puente grúa utilizada para cargar bobinas de acero, la carga que cae podría matar o herir a cualquier persona que se encontrase parada cerca o debajo de ella en ese momento. Si nadie estuviera cerca, entonces nadie saldría herido. Sin embargo, la posibilidad de que alguien pudiera resultar herido significa que este modo de falla debería ser tratado como un riesgo para la seguridad y analizado de manera acorde. Este ejemplo demuestra que el proceso RCM evalúa las consecuencias para la seguridad al

nivel más conservador. Si es razonable asumir que cualquier modo de falla podría afectar la seguridad o el medio ambiente, asumimos que puede hacerlo, en cuyo caso debe ser sometido a un análisis posterior. (Luego vemos que las posibilidades de que alguien resulte herido son tomadas en consideración al evaluar la tolerabilidad del riesgo).

4. ¿Cuán probable es que ocurra la falla? Anteriormente se menciona que solo los modos de falla que tienen posibilidades razonables de ocurrir en el contexto en cuestión deben ser registrados en la Hoja de Información RCM. En consecuencia, si la Hoja de Información ha sido preparada sobre una base realista, el mero hecho de que el modo de falla haya sido registrado sugiere que hay alguna posibilidad de que pudiera ocurrir, y por lo tanto que debe ser sometido a un análisis posterior.

5. ¿Es tolerable el riesgo? Uno de los aspectos más difíciles de la administración de seguridad es la medida en que varían las expectativas de qué es tolerable, de individuo a individuo y de grupo a grupo. Muchos factores influyen sobre esas creencias: el más dominante es el grado de control que un individuo cree tener sobre la situación.

Las personas casi siempre toleran un mayor nivel de riesgo cuando creen que tienen control personal sobre la situación que cuando creen que la situación está fuera de su control.

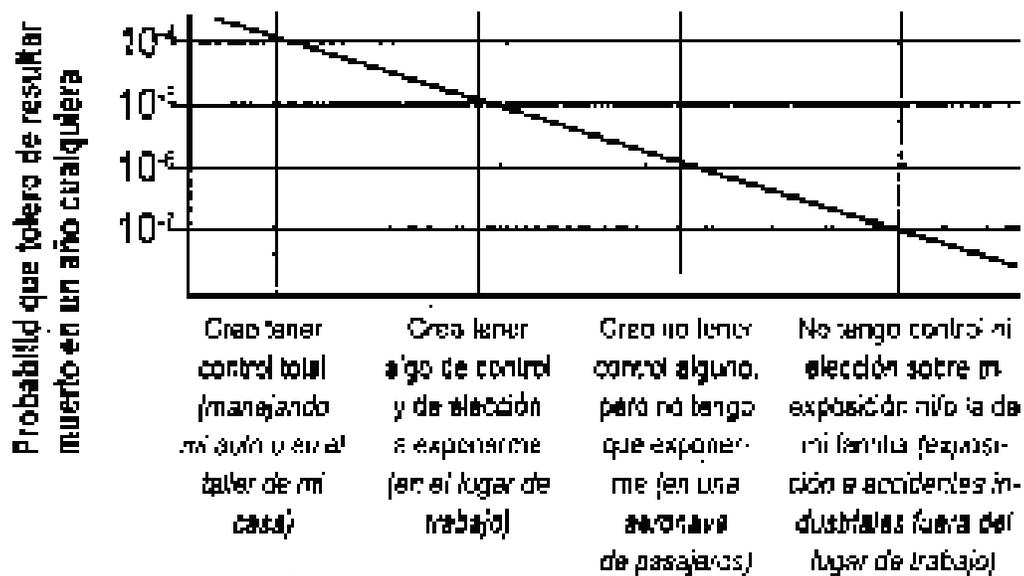
El segundo factor clave se relaciona con el beneficio que las personas creen que derivará de exponerse a este riesgo. Esto a su vez influye para determinar hasta qué punto puede elegir exponerse al riesgo. En términos generales, esta combinación de "control percibido" y "elección" puede variar para un individuo en particular como lo muestra la Figura 34.

Las Figuras dadas en este ejemplo no pretenden ser prescriptivas y no necesariamente reflejan el criterio del autor meramente ilustran lo que un individuo podría decidir que está preparado a tolerar. Notemos también que están basados en la visión de un individuo en el transcurso de su trabajo diario. Este punto de vista debe luego ser traducido al grado de riesgo para toda la población (todos los trabajadores del lugar, todos los ciudadanos de un pueblo, o hasta la población entera de un país).

En otras palabras, si tolero una probabilidad de 1 en 100 000 (10^{-5}) de morir en el trabajo en un año y tengo 1 000 compañeros de trabajo que comparten la misma opinión, entonces todos toleramos qué como promedio 1 persona por año morirá

en nuestro lugar de trabajo cada 100 años - y que esa persona podría ser yo, y podría suceder este año.

FIGURA 34: TOLERABILIDAD DE RIESGO FATAL



Debemos tener en cuenta que cualquier cuantificación de riesgo hecha de esta manera sólo puede ser una aproximación general. En otras palabras, si yo digo que tolero una probabilidad de (10^{-5}) , nunca es más que un número indicativo. Indica que estoy preparado a aceptar una probabilidad de morir en el trabajo que es aproximadamente 10 veces más baja que la que acepto al transitar por las rutas (alrededor del 10^{-4}).

Siempre teniendo en cuenta que estamos tratando con aproximaciones, el próximo paso es traducir la probabilidad que yo y mis compañeros de trabajo estamos preparados a aceptar que cualquiera de nosotros podría morir a causa de cualquier evento en el trabajo, a una probabilidad aceptable para cada evento (modo de falla o falla múltiple) que podría matar a alguien.

Por ejemplo, continuando con la lógica del ejemplo anterior, la probabilidad de que uno de mis 1 000 compañeros de trabajo muera en un año es de 1 en 100 (asumiendo que todas las personas en el lugar de trabajo afrontan aproximadamente los mismos riesgos). Además, si las actividades llevadas a cabo en el lugar de trabajo incluyen, digamos, 10 000 eventos que podrían matar a alguien, entonces la probabilidad promedio de que cada evento pueda matar a una persona debe ser reducida a (10^{-6}) en un año. Esto significa que la probabilidad de un evento que es capaz de matar a 10 personas debe ser reducido a (10^{-7}) , mientras que la probabilidad de un evento que tiene 1 chance en 10 de matar a una persona debe ser reducido a 10^{-5} .

Las técnicas por las cuales uno mueve en forma ascendente y descendente las jerarquías de probabilidad de esta manera se conocen como evaluaciones de riesgo cuantitativas o probabilísticas. Los puntos clave a tener en cuenta en este tema son que:

- La decisión de qué es tolerable debe comenzar con la probable víctima. La manera de involucrar a dichas "probables víctimas" en esta decisión, en el contexto industrial.

- Es posible vincular "lo que una persona tolera directamente y cuantitativamente" a una "probabilidad tolerable de modos de falla individuales".

Aunque la percepción del grado de control generalmente domina las decisiones acerca de la tolerabilidad del riesgo, de ningún modo es el único principio. Otros factores que nos ayudan a decidir lo que es tolerable incluyen los siguientes valores individuales:

a. Valores de industria: si bien hoy en día toda industria reconoce la necesidad de operar con la máxima seguridad posible, no podemos eludir la realidad de que algunas son intrínsecamente más peligrosas que otras.

b. El efecto sobre las "generaciones futuras": la seguridad de los niños especialmente de los que aún no han nacido - tiene un efecto especialmente poderoso en las opiniones de la gente acerca de lo que es tolerable.

c. Conocimiento: las percepciones de riesgo son influenciadas en gran modo por cuanto las personas conocen acerca del activo físico, el proceso del que forma parte, y los mecanismos de falla asociados con cada modo de falla.

Muchos otros factores también influyen las percepciones de riesgo, tales como la importancia de la vida humana en diferentes grupos culturales, los valores religiosos y hasta factores como la edad del individuo y su estado civil.

Todos estos factores significan que es imposible especificar un estándar de tolerabilidad que sea absolutamente objetivo para cualquier riesgo. Esto sugiere que la tolerabilidad de cualquier riesgo sólo puede ser evaluada partiendo de la base de que es al mismo tiempo subjetiva y objetiva — "relativa" en el sentido que el riesgo comparado con otros riesgos con los que hay un consenso relativamente claro, y "subjetiva" porque toda esta cuestión es en su esencia una cuestión de discernimiento juicio. Pero, ¿el juicio de quién?

6. ¿Quién debe evaluar los riesgos? La diversidad misma de los factores tratados anteriormente significa que es simplemente imposible para cualquier persona o hasta para una organización evaluar los riesgos de tal manera que sean universalmente tolerables. Si el evaluador es demasiado conservador puede que gente lo ignore o ridiculice la evaluación. Si es demasiado relajado, puede terminar acusado de jugar con la vida personas (si no de realmente matarlas).

Esto sugiere que una evaluación de riesgo satisfactor sólo puede ser realizada por un grupo. En la medida de lo posible, el grupo debe representar a las personas que probablemente tengan un claro entendimiento del mecanismo de falla, los

efectos de falla (especialmente naturaleza de cualquier riesgo), la probabilidad de qué Fallas ocurran, y qué posibles medidas pueden ser tomadas para anticiparla o prevenirla. El grupo también debe incluir a las personas que tengan un punto de vista legítimo de la tolerabilidad o en todo caso de los riesgos. Esto significa, representantes de las probables víctimas (generalmente operadores o personal de mantenimiento en caso de riesgos directos para la seguridad) y la gerencia (que son hechos responsables cuando alguien resulte herido o si se infringe una normativa ambiental).

Si se aplica con el enfoque correcto y de una manera estructurada, la sabiduría colectiva de dicho grupo hará posible por asegurar que la organización se esfuerce para identificar y manejar todos los modos de falla que pudieran afectar la seguridad y el medio ambiente. (El uso de estos grupos sigue la tendencia mundial dirigida hacia leyes que enuncian que la seguridad es responsabilidad de todo el personal, no sólo de la gerencia).

Los grupos de esta naturaleza generalmente pueden llegar a un consenso rápido cuando tratan con riesgos directos para la seguridad, porque ellos mismos están incluidos entre las personas en riesgo. Los riesgos ambientales no son tan simples, porque es la sociedad en general la "posible víctima" y muchos de los temas incluidos son poco conocidos. Entonces cualquier grupo del que se espera que considere si una falla podría infringe una normativa o regulación ambiental,

debe primer averiguar cuáles de esas normativas y regulaciones cubren el proceso que se está revisando.

7. Seguridad y Mantenimiento Proactivo: Si una falla pudiese afectar la seguridad o el medio ambiente, el proceso de RCM estipula que debemos intentar prevenirla. La discusión anterior sugiere que:

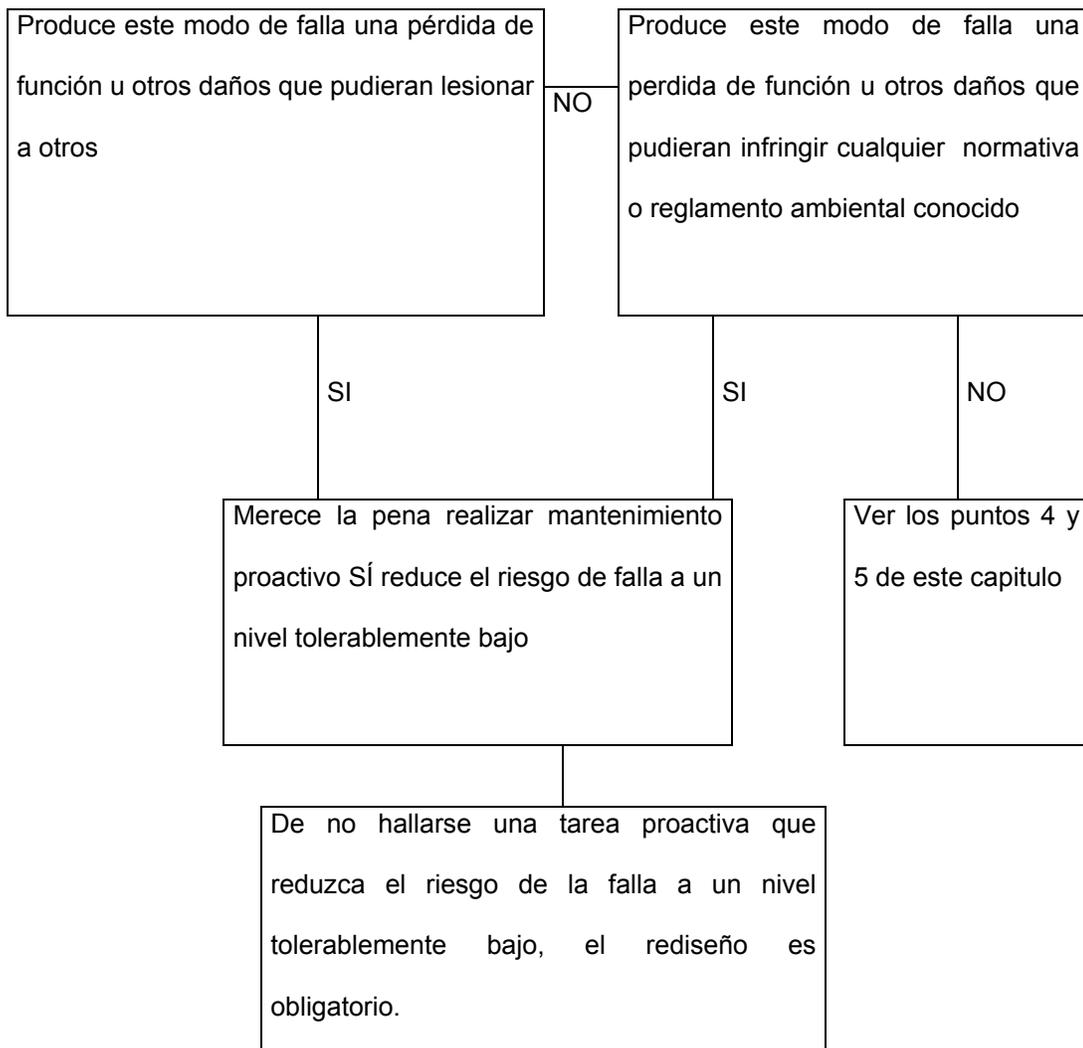
Para modos de falla que tienen consecuencias para la seguridad o el medio ambiente, sólo se justifica realizar una tarea proactiva si reduce la probabilidad de la falla a un nivel tolerablemente bajo.

Si no puede hallarse una tarea proactiva que logre este objetivo satisfaciendo al grupo que está realizando el análisis, estamos enfrentando un riesgo ambiental o para la seguridad que no puede ser adecuadamente anticipado o prevenido. Esto significa que algo debe ser cambiado para hacer que el sistema sea seguro. Este "algo" puede ser el activo físico mismo, un proceso, o un procedimiento operacional.

Notemos que al tratar con temas ambientales y de seguridad, RCM no introduce el tema económico. Si no es seguro, tenemos la obligación de, o bien prevenir que falle, o hacerlo seguro. Esto sugiere que el proceso de decisión para modos de

falla que tienen consecuencias para la seguridad o el medio ambiente, puede ser resumido como lo muestra la figura 35:

FIGURA 35. IDENTIFICACIÓN Y DESARROLLO DE UNA ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO PARA UNA FALLA QUE AFECTA LA SEGURIDAD O EL MEDIO AMBIENTE.



8. RCM y la Legislación de Seguridad: Frecuentemente surge la pregunta de cómo se vincula RCM con la legislación de la seguridad. Hoy en día, la mayoría de las leyes que gobiernan la seguridad meramente demandan que los usuarios sean capaces de demostrar que están haciendo todo lo que sea prudente para asegurar que sus activos físicos sean seguros.

Esto ha llevado a un veloz incremento del énfasis en el concepto de traza de auditoria, que básicamente requiere que los usuarios de los activos físicos sean capaces de producir evidencia documentada de que hay una base racional defendible para sus programas de mantenimiento. En la gran mayoría de los casos, RCM satisface completamente este tipo de requerimientos.

Sin embargo algunos reglamentos demandan la realización de tareas específicas en tipos de equipo específicos a intervalos específicos. Si el proceso RCM sugiere una tarea diferente y/o un intervalo diferente, es aconsejable continuar haciendo la tarea especificada por el reglamento y discutir el cambio sugerido con la autoridad reguladora apropiada.

✓ Consecuencias Operacionales

1. ¿Cómo las Fallas Afectan a las Operaciones? La función primaria de la mayoría de los equipos en la industria está vinculada de algún modo con la necesidad de producir ingresos o de apoyar alguna actividad económica.

Por ejemplo, la función primaria de la mayoría de los equipos utilizados en la fabricación es la de añadir valor a los materiales. En cambio los clientes pagan directamente para acceder a equipos de transporte y comunicación (autobuses, camiones, trenes o aviones).

Las fallas que afectan las funciones primarias de estos activos físicos afectan la capacidad generadora de ingresos de la compañía. La magnitud de estos efectos depende de cuánto se haya cargado el equipo y de la disponibilidad de alternativas. Sin embargo en la mayoría de los casos los efectos son mayores — frecuentemente mucho mayores — que el costo de reparar las fallas. Esto también se aplica a los equipos de las industrias de servicio, tales como entretenimiento, comercio y hasta la industria bancaria.

Por ejemplo, si fallan las luces en un estadio durante un partido, los espectadores pretenden que se les devuelva el dinero. Lo mismo ocurre si falla el proyector en un cine. Situado el aire acondicionado en un restaurante o un negocio, los clientes

se van (y generalmente no vuelven). Los bancos pierden sus negocios si fallan los cajeros automáticos.

En general las fallas afectan las operaciones de cuatro maneras:

- Afectan al volumen de producción total.
- Afectan la calidad del producto.
- Afectan el servicio al cliente.
- Incrementan el costo operacional sumando este costo adicional al costo directo de la reparación.

Si una falla evidente no supone una amenaza a la seguridad o el medio ambiente, el proceso RCM enfoca a continuación las consecuencias Operacionales de la falla.

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

Como hemos visto, estas consecuencias tienden a ser económicas por naturaleza, por lo que normalmente son evaluadas en términos económicos. Sin embargo, en ciertos casos más extremos (como perder una guerra), el "costo" puede tener que ser evaluado a partir de una base más cualitativa.

2. Evitando Consecuencias Operacionales: El efecto económico global de cualquier modo de falla que tiene consecuencias Operacionales depende de dos factores:

- Cuánto cuesta la falla cada vez que ocurre, en términos de su efecto sobre la capacidad operacional, más el costo de la reparación.
- Con qué frecuencia ocurre.

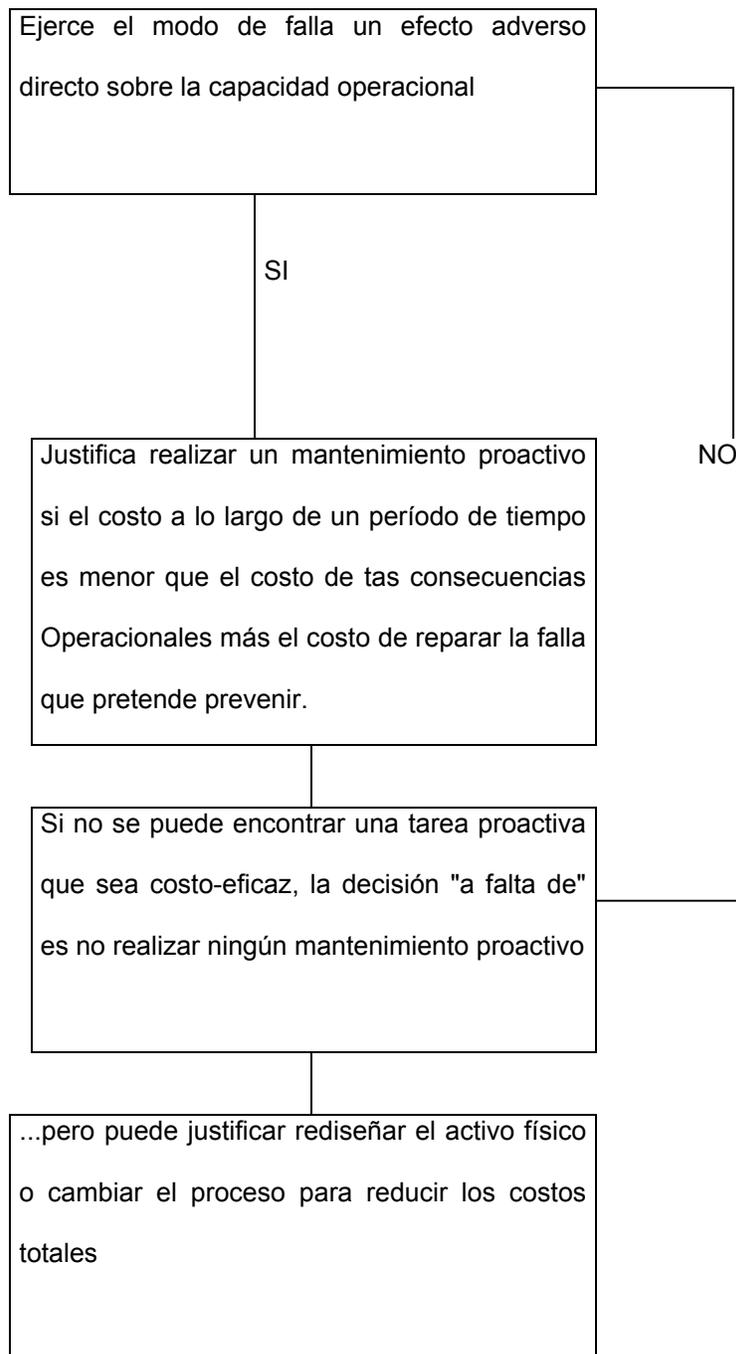
Anteriormente no prestamos demasiada atención a la frecuencia probable de las fallas. (Los porcentajes de falla no influyen mucho en las fallas relacionadas con la seguridad, porque el objetivo en estos casos es evitar cualquier falla condicionada a un porcentaje). Sin embargo, si las consecuencias de las fallas son económicas, el costo total es afectado por la probable frecuencia de las consecuencias. Es decir, para evaluar la trascendencia económica de estas fallas, debemos evaluar cuánto pueden costar a lo largo de un período de tiempo. Entonces si una falla trae consecuencias Operacionales, el criterio para decidir si merece la pena económicamente realizar una tarea proactiva es el siguiente:

Para modos de falla con consecuencias Operacionales, justifica realizar una tarea proactiva si, a lo largo de un período de tiempo cuesta menos que el costo de las consecuencias Operacionales más el costo de reparar la falla que pretende evitar.

Si no se puede encontrar una tarea proactiva que sea costo—eficaz, entonces no merece la pena realizar ningún mantenimiento proactivo para tratar de anticipar o prevenir el modo de falla en cuestión.

En algunos casos, la opción más costo-eficaz a esta altura podría simplemente ser la de decidir convivir con la falla. Como lo muestra la figura 36:

FIGURA 36: IDENTIFICACIÓN Y DESARROLLO DE UNA ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO PARA UNA FALLA QUE TIENE CONSECUENCIAS OPERACIONALES



Sin embargo, si no puede hallarse una tarea proactiva y las consecuencias de la falla todavía son inaceptables, puede ser deseable cambiar el diseño del activo físico (o cambiar el proceso) para reducir los costos totales:

- Reduciendo la frecuencia (y por ende el costo total) de la falla
- Reduciendo o eliminando las consecuencias de la falla
- Modificando una tareas proactiva para hacerlo costo-eficaz.

A la luz de estos comentarios, el proceso de decisión para fallas con consecuencias Operacionales puede ser resumido como lo muestra la Figura 36.

- ✓ **Consecuencias No Operacionales:** Las consecuencias de una falla evidente que no ejerce u efecto adverso directo sobre la seguridad, el medio ambiente, o la capacidad operacional, son clasificadas como no Operacionales.

Las únicas consecuencias asociadas con estas fallas son los costos directos de reparación. Entonces estas consecuencias son también económicas.

Esto sugiere que sólo merece la pena tratar de prevenir una falla que tiene consecuencias no Operacionales si, a lo largo de un período de tiempo, el costo

de la tarea proactiva es menor al costo de reparar la falla cuando ocurre. Si no lo es, entonces no merece la pena realizar mantenimiento programado.

Para modos de falla con consecuencias no operacionales merece la pena realizar tareas Proactivas a lo largo de un período de tiempo, cuesta menos que el costo de reparar las fallas que pretende prevenir.

Si no merece la pena realizar una tarea proactiva, entonces en algunos casos poco comunes podría justificarse un rediseño por razones similares a las que se aplican a falla con consecuencias Operacionales.

✓ **CONSECUENCIAS DE FALLAS OCULTAS**

1. Fallas Ocultas y Dispositivos de Seguridad: anteriormente se menciona que los dispositivos de seguridad de protección funcionan en una de cinco maneras:

- Alertar a los operadores ante condiciones anormales
- Parar el equipo en caso de falla
- Eliminar o aliviar las condiciones anormales originada: por una falla y que de otra manera podrían causar daño; más serios
- Asumir control de una función que ha fallado
- Prevenir que surjan situaciones peligrosas.

La función esencial de estos dispositivos es la de garantizar que las consecuencias de la falla de la función protegida sean mucho menos graves de lo que serían si no hubiera protección." Entonces cualquier dispositivo de seguridad es de hecho parte de un sistema con al menos dos componentes:

- La función protectora (el dispositivo de seguridad)
- La función protegida

La existencia de tales sistemas crea dos tipos de posibilidades de falla, dependiendo de sí el dispositivo de seguridad tiene seguridad inherente o no.

Consideramos las incidencias de cada tipo en los párrafos siguientes, comenzando por los dispositivos que tienen seguridad inherente.

Dispositivos de protección con seguridad inherente: En éste contexto, seguridad inherente significa que la falla del dispositivo por sí sola se hará evidente para el grupo de operarios bajo circunstancias normales. Esto significa que, en un sistema que incluye un dispositivo de seguridad con seguridad inherente, hay tres posibilidades de falla en cualquier período:

La primera posibilidad es que no falla ninguno de los dispositivos. En este caso todo se desarrolla normalmente.

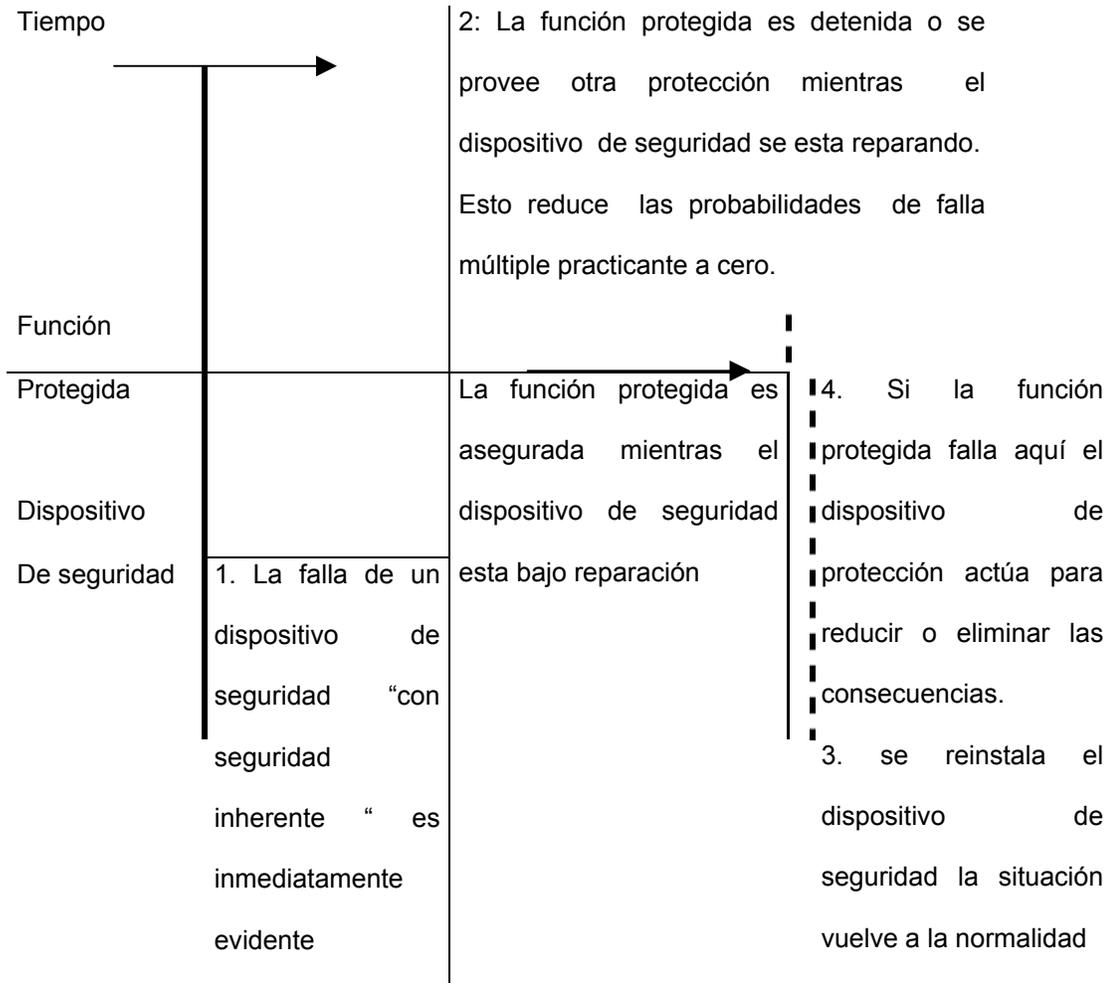
La segunda posibilidad es que la función protegida falla antes que el dispositivo de seguridad. En este caso el dispositivo de seguridad cumple con su función asignada y, dependiendo de la naturaleza de la protección, las consecuencias de falla de la función protegida son reducidas o eliminadas.

La tercera posibilidad es que el dispositivo de seguridad falle antes que la función protegida. Esto sería evidente porque de no serlo el dispositivo no contaría con seguridad inherente en el sentido en que se definió anteriormente. Si se hacen las cosas en forma correcta, la posibilidad de que el dispositivo protegido falle mientras el dispositivo de seguridad se encuentra averiado puede ser casi eliminada, o bien deteniendo la función protegida o aportando una protección alternativa mientras el dispositivo de seguridad fallado es reparado.

Por ejemplo, podría pedírsele a un operador que vigile un medidor de presión, y que esté alerta para – en caso necesario - presionar el botón de parada, mientras se está reemplazando un switch de presión.

Esto significa que las consecuencias de la falla de un dispositivo de seguridad con seguridad inherente generalmente caen en las categorías de "operacional" o "no operacional". La secuencia de estos eventos se resume en la Figura 37.

FIGURA 37. CONSECUENCIA DE FALLAS OCULTAS.



2. Dispositivos de seguridad que no cuentan con seguridad inherente: En un sistema que contiene un dispositivo de seguridad que no cuenta con seguridad inherente, el hecho de que el dispositivo sea incapaz de cumplir su función no es evidente bajo circunstancias normales. Esto crea cuatro posibilidades de falla en cualquier periodo dado, dos de los cuales son los mismos que ocurren en los

dispositivos con seguridad inherente. La primera es cuando ninguno de los dispositivos falla, en cuyo caso todo se desarrolla normalmente como antes.

La segunda es que falle la función protegida en un momento en que el dispositivo de protección todavía está funcionando. Como en este caso el dispositivo de protección también cumple con su función, las consecuencias de la falla de la función protegida son nuevamente reducidas o eliminadas completamente.

Por ejemplo, consideremos una válvula de alivio (dispositivo de protección o de seguridad), que está montada en una caldera (la función protegida). Si la presión asciende más allá de los límites aceptables, la válvula abre (alivia) y al hacerlo reduce o elimina las consecuencias de la presión excesiva. De manera similar, si la bomba B en la figura 33 falla, la bomba C toma su función.

La tercera posibilidad es que la falla el dispositivo de seguridad mientras la función protegida sigue funcionando. En este caso, la falla no tiene consecuencias directas. De hecho nadie sabe que el dispositivo de seguridad se encuentra en estado de falla.

Por ejemplo, si la válvula de alivio hubiera quedado en posición cerrada, nadie sería consciente de este hecho mientras la presión en la caldera permaneciera dentro de los límites operacionales normales. De manera similar, si la bomba C

fallase de alguna manera mientras la bomba B está trabajando, nadie sabría de este hecho a menos que fallara también la bomba B.

La discusión anterior sugiere que las funciones ocultas pueden ser identificadas al hacerse la siguiente pregunta:

¿Será evidente para el equipo de operaciones la pérdida de función originada por este modo de falla por sí solo bajo circunstancias normales?

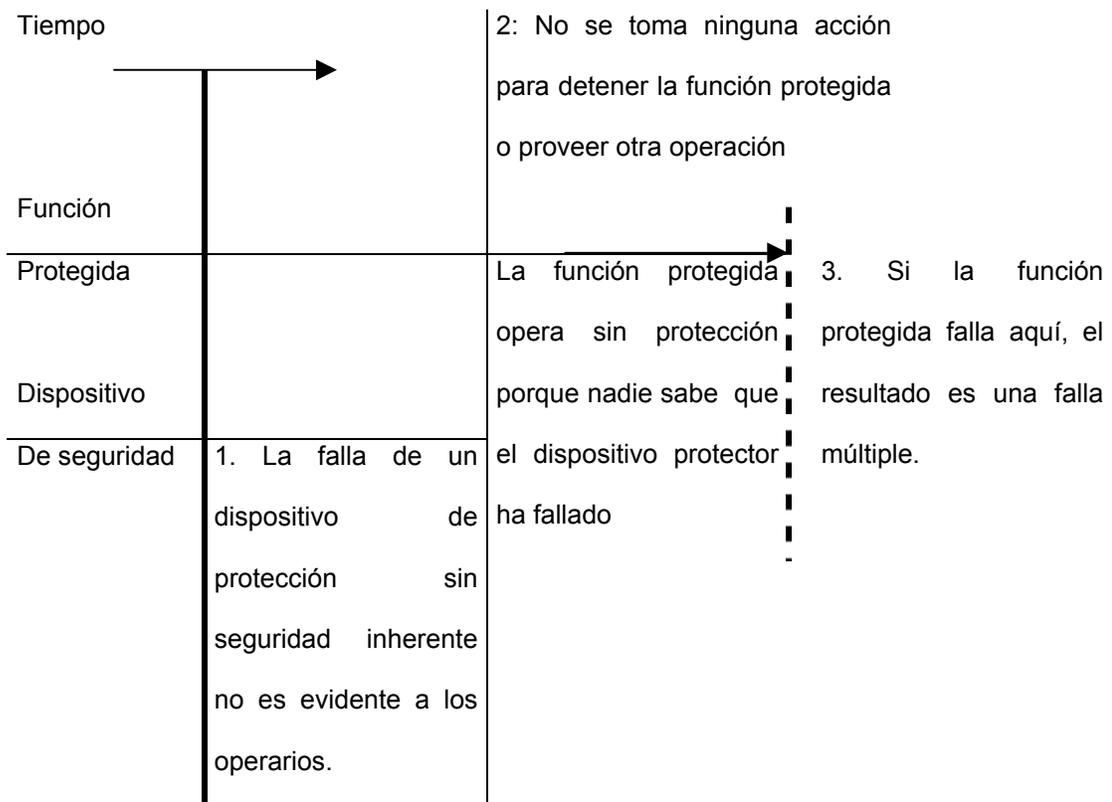
Si la respuesta a esta pregunta es no, entonces se trata de un modo de falla oculto. Si la respuesta es sí, es evidente. Notemos que en este contexto, "por sí sólo" significa que nada más ha fallado. Notemos también que asumimos en este punto del análisis, que no se está haciendo nada para chequear si la función oculta sigue funcionando. Esto es porque tales chequeos son una forma de mantenimiento programado, y el propósito del análisis es precisamente ver si tal mantenimiento es necesario.

La cuarta posibilidad durante un ciclo cualquiera es que el dispositivo de seguridad falla, y luego la función protegida falla mientras el dispositivo de seguridad está en su estado de falla. La situación es conocida como falla múltiple (esta es una posibilidad real simplemente porque la falla del dispositivo de seguridad no es evidente, por eso nadie sabría de la necesidad de tomar una acción correctiva - o

alternativa - para evitar la falla múltiple). Sólo ocurre una falla múltiple si una función protegida falla mientras el dispositivo de protección se encuentra en estado de falla.

La secuencia de eventos que lleva a una falla múltiple se resume en la Figura 38.

FIGURA 38. FALLA DE UN DISPOSITIVO DE PROTECCIÓN CUYA FUNCIÓN ES OCULTA



En el caso de una válvula de alivio, si la presión en el recipiente asciende excesivamente mientras la válvula se encuentra atascada, el recipiente

probablemente explotará (a menos que alguien actúe con rapidez o a menos que haya otra protección en el sistema). Si la bomba B falla mientras la bomba C se encuentra fallada, el resultado será una pérdida total del bombeo.

Dado que la prevención de fallas principalmente persigue evitar las consecuencias de la falla, este ejemplo también sugiere que cuando desarrollamos programas de mantenimiento para funciones ocultas, nuestro objetivo de hecho es prevenir - o al menos reducir - las probabilidades de la falla múltiple asociada.

El objetivo de un programa de mantenimiento para una función oculta es prevenir - o al menos reducir - la probabilidad de la falla múltiple asociada

Cuánto nos esforzamos en tratar de prevenir la falla oculta depende de las consecuencias de la falla múltiple. Si las consecuencias de la falla múltiple son realmente serias, haríamos grandes esfuerzos para preservar la integridad de la función oculta. Si las consecuencias de la falla múltiple son puramente económicas, entonces el "cuánto cuesta" influenciaría el "cuánto nos esforzamos" en tratar de prevenir la falla oculta.

3. La Disponibilidad que Requieren las Funciones Ocultas: Hasta aquí, ésta sección ha definido fallas ocultas y descrito la relación entre dispositivos de

seguridad y funciones ocultas. La siguiente pregunta lleva a analizar de más cerca el funcionamiento que requerimos de las funciones ocultas.

Una de las conclusiones más importantes a la que se ha llegado hasta ahora es que la única consecuencia directa de una falla oculta es un incremento en la exposición al riesgo de una falla múltiple. Ya que es esta última la que más deseamos evitar un elemento clave de desempeño requerido de una función oculta debe estar vinculada con la falla múltiple asociada.

Hemos visto que cuando un sistema está protegido por un dispositivo sin seguridad inherente, sólo ocurre una falla múltiple si el dispositivo protegido falla mientras dispositivo de seguridad se encuentra fallado, como ilustra la Figura 38.

Entonces la probabilidad de una falla múltiple en cualquier período debe estar dada por la probabilidad que la función protegida falle cuando el dispositivo seguridad se encuentra fallado durante el mismo período La Figura 39 muestra que esto puede calcularse de siguiente manera:

FIGURA 39. PROBABILIDAD DE FALLA MÚLTIPLE

| | | | | |
|--------------------------------|---|---|---|---|
| Probabilidad de falla múltiple | = | Probabilidad de falla de la función protegida | x | Indisponibilidad promedio de dispositivo de seguridad |
|--------------------------------|---|---|---|---|

La probabilidad tolerable de la falla múltiple es determinada por los usuarios del sistema, como se trata en siguiente parte de este capítulo. Generalmente a la probabilidad de falla de la función protegida es un dato dado. Por lo tanto si se conocen estas dos variables, la disponibilidad permitida puede ser expresada de la siguiente manera:

$$\text{Indisponibilidad promedio del dispositivo de seguridad} = \frac{\text{Probabilidad de falla múltiple}}{\text{Probabilidad de falla de la función protegida}}$$

Entonces un elemento crucial del funcionamiento requerido de cualquier función oculta es la disponibilidad requerida para reducir la probabilidad de la falla múltiple asociada a un nivel aceptable. La discusión anterior sugiere que esta disponibilidad puede determinarse en las tres etapas siguientes:

- Primero establecer qué probabilidad de falla múltiple está preparada a tolerar la organización.
- Luego determinar la probabilidad de que falle la función protegida en el período en cuestión (esto también conoce como índice de demanda)
- Finalmente, determinar qué disponibilidad debe lograr la función oculta para reducir la probabilidad de la falla múltiple al nivel requerido.

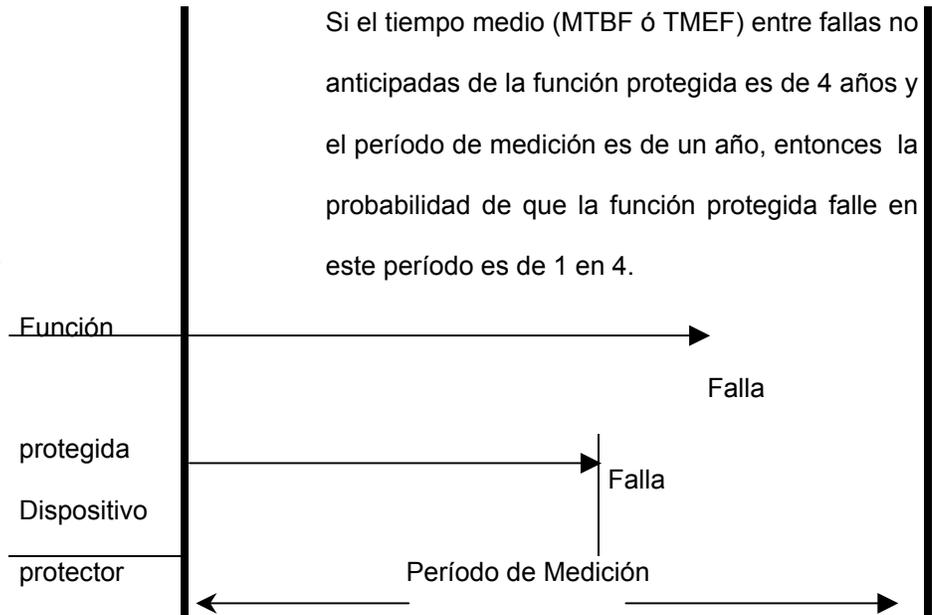
Notar que generalmente es posible variar tanto la probabilidad de falla de la función protegida como (y especialmente) la indisponibilidad del dispositivo protector adoptando las políticas apropiadas de mantenimiento y operaciones. Como resultado, también es posible reducir la probabilidad de la falla múltiple a casi cualquier nivel deseado que sea razonable, adoptando dichas políticas ("Cero" por supuesto es un ideal inalcanzable.)

En la práctica, la probabilidad que se considera tolerable para cualquier falla múltiple depende de sus consecuencias. En la gran mayoría de los casos la evaluación debe ser realizada por los usuarios del activo físico. Estas consecuencias varían enormemente de un sistema a otro, por que "lo que se estima tolerable" varía con la misma amplitud. Para ilustrar este punto, la Figura 40 sugiere cual evaluación es posible para cuatro sistemas diferentes:

La probabilidad de que falle una función protegida en cualquier período es la inversa de su tiempo medio entre fallas, como lo ilustra la figura 39a:

Figura 39a:

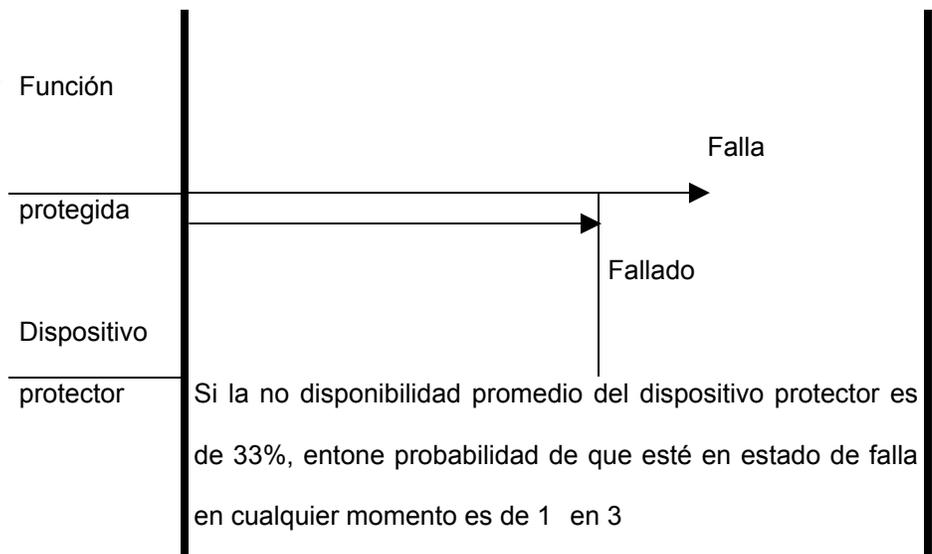
Probabilidad y funciones protegidas



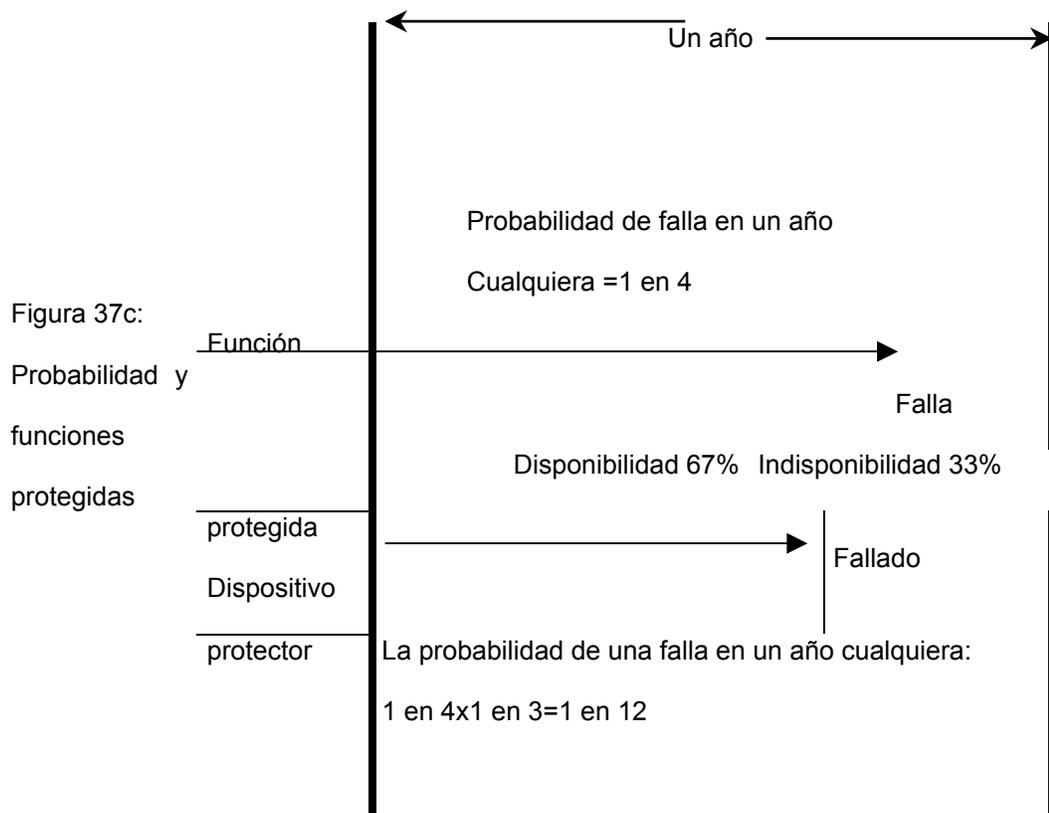
La probabilidad de que el dispositivo de protección esté fallado en un momento cualquiera está dada por el porcentaje de tiempo que está en estado de falla. Esto es ciertamente medido por su indisponibilidad (también conocido como tiempo de parada de máquina), como lo muestra la figura 39b abajo:

Figura 39b:

Probabilidad y Función protegidas



La probabilidad de la falla múltiple es calculada multiplicando la probabilidad de falla de la función protegida por la indisponibilidad promedio del dispositivo protector. Para el caso descrito en la Figura 39(a) y (b) anteriores, la probabilidad de una falla múltiple será la que indica la siguiente Figura 39(c):



Reflejan el punto de vista del autor. Pretenden demostrar que en cualquier sistema protegido, alguien debe decidir qué es tolerable antes de que sea posible decidir el nivel de protección necesaria, y que esta evaluación será diferente para sistemas diferentes.

4. Mantenimiento de Rutina y Funciones Ocultas: En un sistema que incorpora un dispositivo de seguridad con seguridad inherente, la probabilidad de una falla múltiple puede ser reducida de la siguiente manera:

- Reducir la frecuencia de falla de la función protegida
- Haciendo algún tipo de mantenimiento proactivo
- Cambiando la manera en que se opera la función protegida
- Cambiando el diseño de la función protegida
- Incrementar la disponibilidad del dispositivo de protección
- Haciendo algún tipo de mantenimiento proactivo.
- Verificando periódicamente si el dispositivo de protección ha fallado
- Modificando el dispositivo de protección

5. Prevenir la falla de la función protegida: Hemos visto que la probabilidad de una falla múltiple está en parte basada en la frecuencia de falla de la función protegida. Esto, casi con certeza, puede ser reducido mejorando el mantenimiento o la operación del dispositivo protegido o, como último recurso, cambiando el diseño.

6. Prevenir la falla oculta: Para prevenir una falla múltiple, debemos tratar de asegurar que la función oculta no se encuentre en estado de falla si y cuando falla la función protegida. Si pudiera encontrarse una tarea proactiva que fuera lo

suficientemente buena como para asegurar un 100% de disponibilidad del dispositivo protector, entonces una falla múltiple es teóricamente imposible. En la práctica, es poco probable que alguna tarea proactiva pudiera lograr que una función alcanzara una disponibilidad de 100% indefinidamente. Lo que debe hacer, sin embargo, es dar la disponibilidad necesaria para reducir la probabilidad de una falla múltiple a un nivel tolerable. Entonces:

FIGURA 40. FRECUENCIA DE FALLAS MÚLTIPLES

| Falla de la Función Protegida | Estado de Falla del Dispositivo de Protección | Falla Múltiple | Frecuencia Tolerable de Falla Múltiple |
|--|---|---|---|
| Error de ortografía en un memo o e-mail interno entre oficinas | Corrector de ortografía de un programa de procesador de textos, incapaz de detectar errores | Error de ortografía no detectado | ¿10 por mes? |
| El motor de 10 KW de la bomba B sobrecargado | Disyuntor atascado en posición cerrada | El motor se quema: 800 dólares para rebobinar | ¿1 en 50 años? |
| Falla la bomba de servicio B | Bomba de reserva C fallada | Pérdida total de la capacidad de bombeo: 18 000 dólares de - producción perdida | ¿1 en 1 000 años? |
| Exceso de presión en la caldera | Válvulas de alivio atascadas en posición cerrada | Explota la caldera: mueren 10 personas | ¿1 en 10 000 000 años? |

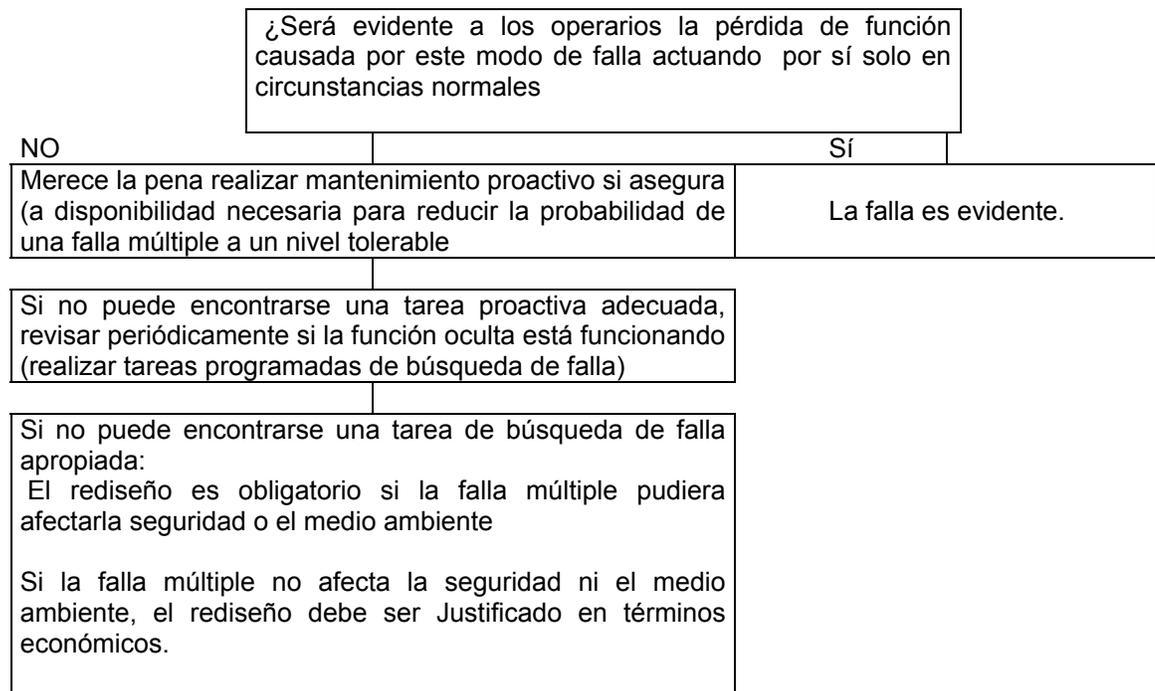
Para fallas ocultas, merece la pena realizar una tarea proactiva si asegura la disponibilidad necesaria para reducir la probabilidad de una falla múltiple a un nivel tolerable.

Si no podemos encontrar una manera de prevenir una falla oculta, debemos encontrar alguna otra manera de mejorar la disponibilidad de la función oculta.

7. Detectar la falla oculta: Si no podemos encontrar una manera adecuada de prevenir una falla oculta, todavía es posible reducir el riesgo de una falla múltiple revisando la función oculta periódicamente para saber si sigue funcionando. Si ésta revisión (llamada tarea de "búsqueda de falla") es llevada a cabo a intervalos adecuados y si la función es restaurada en cuanto se descubre que está defectuosa, todavía es posible asegurar altos niveles de disponibilidad.

8. Modificar los equipos (rediseño): En un pequeño número de casos, es o bien imposible encontrar alguna clase de tarea de rutina que asegure el nivel de disponibilidad deseado, o es poco práctico hacerlo con la frecuencia requerida. Sin embargo, aún debe hacerse algo para reducir el riesgo de la falla múltiple a un nivel tolerable. Por eso, en estos casos, generalmente es necesario volver a considerar el diseño. Si la falla múltiple pudiera afectar la seguridad o el medio ambiente, es obligatorio rediseñar. Si la falla múltiple solo tiene consecuencias económicas, la necesidad de rediseñar es evaluada en términos económicos.

FIGURA 41: IDENTIFICACIÓN Y DESARROLLO DE UNA ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO PARA UNA FUNCIÓN OCULTA



9. Funciones Ocultas: El Proceso de Decisión: Todo lo que hemos dicho acerca del desarrollo de una estrategia de mantenimiento para funciones ocultas puede ser resumido como lo muestra la figura 41.

2.1.17 Resumen: Esta sección ha demostrado cómo el proceso RCM provee un marco estratégico de trabajo completo para manejar las fallas. Como lo resume la Figura 42.

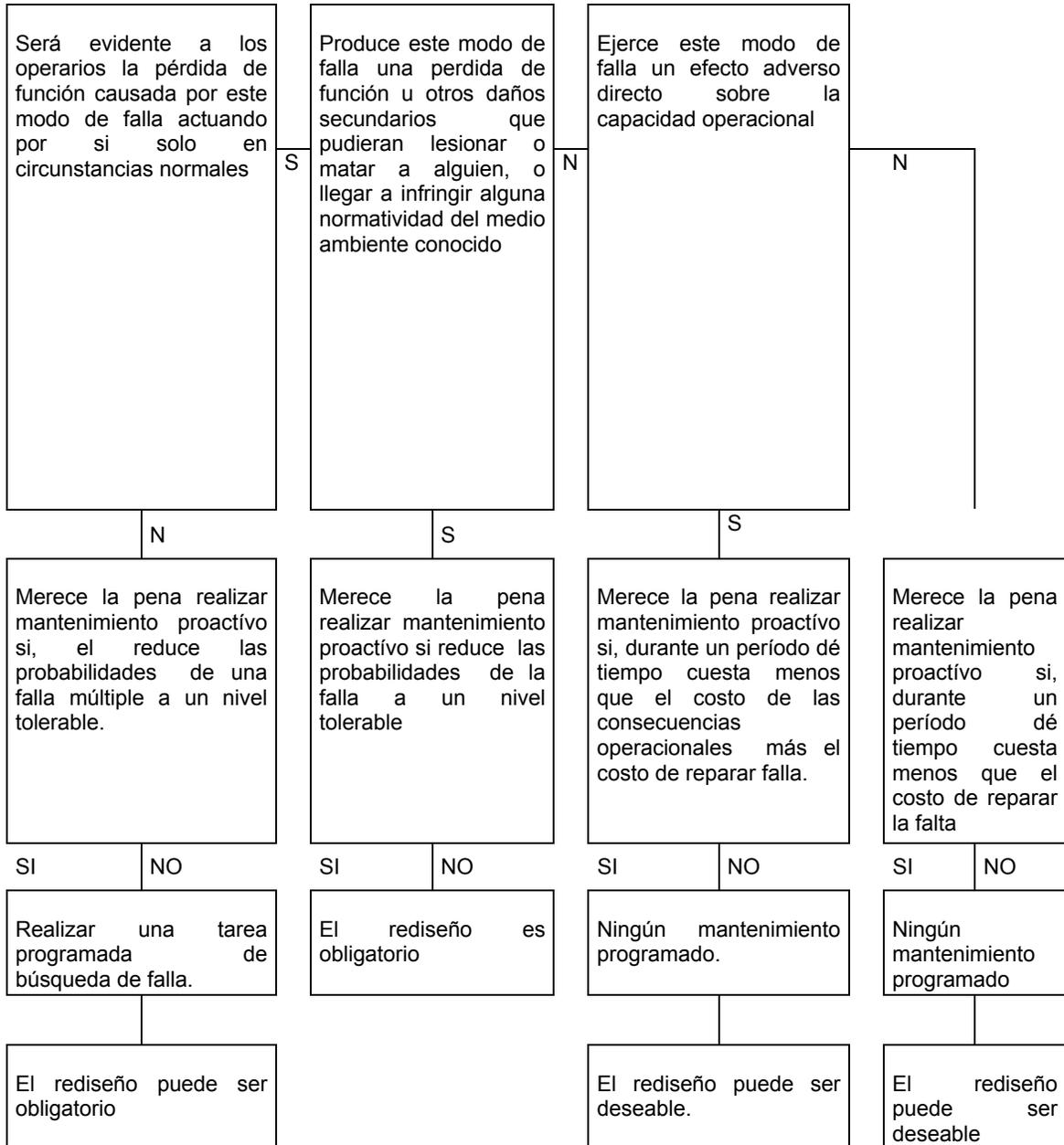
- Clasifica todas las fallas basándose en sus consecuencias. Al hacerlo así, separa las fallas ocultas de las fallas evidentes, y luego ordena las consecuencias de las fallas evidentes en un orden de importancia decreciente

- Provee una base para decidir caso por caso, si merece la pena realizar mantenimiento proactivo

- Sugiere qué acción debe tomarse si no puede encontrarse una tarea proactiva adecuada.

- Los diferentes tipos de tareas proactivas y "acciones a falta de", son abordados en los próximos cuatro capítulos, junto con un enfoque integrado de la evaluación de consecuencias y selección de tareas.

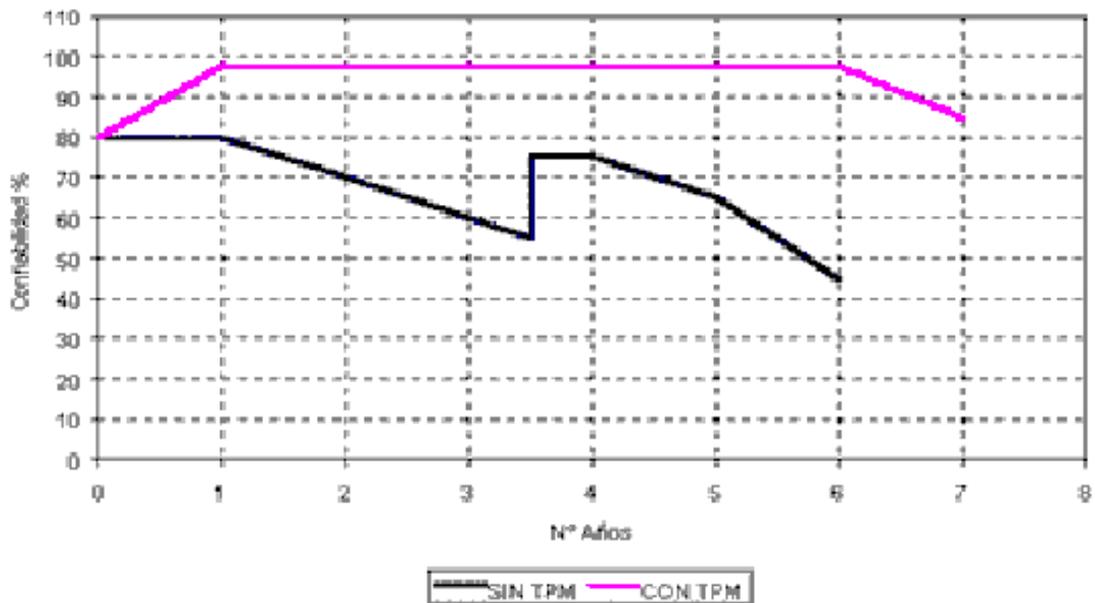
FIGURA 42: LA EVALUACIÓN DE LAS CONSECUENCIAS DE LA FALLA



2.2 TPM

Mantenimiento Productivo Total es la traducción de TPM (Total Productive Maintenance). El TPM es el sistema japonés de mantenimiento industrial desarrollado a partir del concepto de "mantenimiento preventivo" creado en la industria de los Estados Unidos. El TPM genera una relación directa entre mantenimiento y productividad, demostrando cómo el buen cuidado y conservación del equipo en óptimas condiciones resultan en mayor productividad.

FIGURA 43. IMPACTO DEL TPM SOBRE LA CONFIABILIDAD DE LOS EQUIPOS



Es asumido el término TPM con los siguientes enfoques: la letra M representa acciones de *management* y *mantenimiento*. Es un enfoque de realizar

actividades de dirección y transformación de empresa. La letra P está vinculada a la palabra "productivo" o "productividad" de equipos pero se ha considerado que se puede asociar a un término con una visión más amplia como "perfeccionamiento". La letra T de la palabra "total" se interpreta como "*todas las actividades que realizan todas las personas que trabajan en la empresa*".*

El TPM es una estrategia compuesta por una serie de actividades ordenadas que una vez implantadas ayudan a mejorar la competitividad de una organización industrial o de servicios. Se considera como estrategia, ya que ayuda a crear capacidades competitivas a través de la eliminación rigurosa y sistemática de las deficiencias de los sistemas operativos. El TPM permite diferenciar una organización con relación a su competencia debido al impacto en la reducción de los costes, mejora de los tiempos de respuesta, fiabilidad de suministros, el conocimiento que poseen las personas y la calidad de los productos y servicios finales.

El [JIPM](#) define el TPM como un sistema orientado a lograr:

- cero accidentes,
- cero defectos
- cero averías

* Tomado del texto Introducción al TPM. Nakajima Seiichi

Estas acciones deben conducir a la obtención de productos y servicios de alta calidad, mínimos costes de producción, alta moral en el trabajo y una imagen de empresa excelente. No solo deben participar las áreas productivas, se debe buscar la eficiencia global con la participación de todas las personas de todos los departamentos de la empresa. La obtención de las "cero pérdidas" se debe lograr a través de la promoción de trabajo en grupos pequeños, comprometidos y entrenados para lograr los objetivos personales y de la empresa.

2.2.1 Historia: El mantenimiento preventivo fue introducido en Japón en la década de los cincuenta en conjunto con otras ideas como las de control de calidad, Ciclo Deming y otros conceptos de management americano. Posiblemente en la creación del TPM influyó el desarrollo del modelo *Wide - Company Quality Control* o *Total Quality Management*. En la década de los sesenta en el mundo del mantenimiento en empresas japonesas se incorporó el concepto Kaizen o de mejora continua. Esto significó que la tarea del mantenimiento no solo era corregir las averías, sino mejorar la fiabilidad de los equipos en forma permanente con la contribución de todos los trabajadores de la empresa.

Este progreso de las acciones de mejora llevo a crear el concepto de prevención del mantenimiento, realizando acciones de mejora de equipos en todo el ciclo de vida: diseño, construcción y puesta en marcha de los equipos productivos para eliminar actividades de mantenimiento.

La primera empresa en introducir estos conceptos fue la Nippon Denso Co. Ltda., en el año 1971. Es muy seguro que el efecto de la implantación de estrategias de Total Quality Management hicieron que el TPM se desarrollara en esta empresa, ya que también se destaca esta empresa como una de las pioneras en la aplicación de principios como Hoshin Kanri, Daily Management y Cross Functional Management característicos de modelos avanzados del TQM. A esta empresa se le reconoció con el Premio de Excelencia Empresarial y que más tarde se transformó en Premio PM (Mantenimiento Productivo).

En la década de los ochenta se introdujo el modelo de mantenimiento basado en el tiempo (TBM) como parte del modelo TPM. El aporte del sistema RCM (Reliability Center Maintenance) o mantenimiento centrado en la fiabilidad ayudó a mejorar la eficiencia de las acciones preventivas de mantenimiento. El TPM ha progresado muy significativamente y continuará beneficiando los desarrollos recientes de las telecomunicaciones, tecnologías digitales y otros modelos emergentes de dirección y tecnologías de mantenimiento. Posiblemente en los siguientes años se incorporen al TPM modelos probados de gestión de conocimiento, nuevos sistemas económicos y financieros, tecnología para el análisis y estudio de averías automático y nuevos desarrollos.

2.2.2 Objetivos del TPM: El fin que una organización busca al implantar el TPM pueden tener diferentes dimensiones:

➤ **Objetivos estratégicos**

El proceso TPM ayuda a construir capacidades competitivas desde las operaciones de la empresa, gracias a su contribución a la mejora de la efectividad de los sistemas productivos, flexibilidad y capacidad de respuesta, reducción de costes operativos y conservación del "conocimiento" industrial.

➤ **Objetivos operativos**

El TPM tiene como Propósito en las acciones cotidianas que los equipos operen sin averías y fallos, eliminar toda clase de pérdidas, mejorar la fiabilidad de los equipos y emplear verdaderamente la capacidad industrial instalada.

➤ **Objetivos organizativos**

El TPM busca fortalecer el trabajo en equipo, incremento en la moral en el trabajador, crear un espacio donde cada persona pueda aportar lo mejor de sí, todo esto, con el Propósito de hacer del sitio de trabajo un entorno creativo, seguro, productivo y donde trabajar sea realmente grato.

2.2.3 Características: Dentro del TPM las características más significativas son:

- Acciones de mantenimiento en todas las etapas del ciclo de vida del equipo.
- Participación amplia de todas las personas de la organización.
- Es observado como una estrategia global de empresa, en lugar de un sistema para mantener equipos.
- Orientado a la mejora de la Efectividad Global de las operaciones, en lugar de prestar atención a mantener los equipos funcionando.
- Intervención significativa del personal involucrado en la operación y producción en el cuidado y conservación de los equipos y recursos físicos.
- Procesos de mantenimiento fundamentados en la utilización profunda del conocimiento que el personal posee sobre los procesos.

El modelo original TPM propuesto por el Instituto Japonés de Mantenimiento de Plantas sugiere utilizar [pilares](#) específicos para acciones concretas diversas, las cuales se deben implantar en forma gradual y progresiva, asegurando cada paso dado mediante acciones de autocontrol del personal que interviene. El TPM se orienta a la mejora de dos tipos de actividades directivas:

a) dirección de operaciones de mantenimiento y

b) dirección de tecnologías de mantenimiento.

El TPM es sinérgico con otras estrategias de mejora de las operaciones como el sistema de producción Justo a Tiempo, Mass Customization, Total Quality Management, Gestión del Conocimiento Industrial, modelos de certificación de sistemas de calidad, etc.

2.2.4 Tres requerimientos para la mejora fundamental: La meta del TPM es efectuar mejoras fundamentales dentro de una compañía mejorando la utilización de equipo y trabajadores. Para eliminar las seis grandes pérdidas, debemos primero cambiar las actitudes del personal e incrementar su motivación (*yuraki*) y competencia (*varuude*), lo cual maximizara la efectividad y operación del equipo. Estas dos condiciones proporcionan mejoras en la calidad, funcionamiento del equipo y en la visión mental constituyéndose así en requerimientos esenciales para la mejora fundamental de las corporaciones.

Yuraba, o entorno de trabajo, es una tercera condición importante para la mejora. Debemos crear un entorno de trabajo que apoye el establecimiento de un programa sistemático para la implantación del TPM. Sin embargo, a menos que la alta dirección asuma el liderazgo atacando seriamente este tema, no progresara

regularmente la necesaria transformación en actitudes de equipo y constitución corporativa local.

2.2.5 Los doce pasos del desarrollo del TPM: Lleva como mínimo tres años de implantación del TPM para que pueda lograrse resultados al nivel de ganador de premio. Muchos altos directivos, emprendedores y deseosos de implantar programas beneficiosos, pueden decir, “ Si otras compañías pueden hacerlo en tres años, nosotros podemos hacerlos en uno”. Su entusiasmo es encomiable, pero pensar en invertir tan poco tiempo en un empeño de esta clase puede solamente conducir a un fracaso.

PASO 1. ANUNCIO DE LA ALTA DIRECCIÓN DE LA DECISIÓN DE INTRODUCIR EN EL TPM

El primer paso en el desarrollo del TPM es hacer un anuncio oficial de la decisión de implantar el TPM. La alta dirección debe informar a sus empleados de su decisión e infundir entusiasmo por el proyecto. Esto puede cumplirse a través de una presentación formal que introduce el concepto, metas, y beneficios esperados del TPM, y también incluye propuestas personales de la alta dirección de los empleados sobre las razones que fundamentan la decisión de implantar el TPM. Esto puede seguirse con información impresa en boletines internos.

Es esencial en este punto que la alta dirección tenga un fuerte compromiso con el TPM y entienda lo que entraña el compromiso. Como se ha mencionado anteriormente, la preparación para la implantación significa crear un entorno favorable para un cambio efectivo. Durante este periodo (como es la fase de diseño de un producto), debe crearse un fundamento fuerte de forma que las anteriores modificaciones (como los cambios de diseño que pueden resultar en retraso de entregas) no sean necesarias.

Esto es por lo que el TPM debe implantarse con el persistente apoyo y el firme liderazgo de la alta dirección aunque el programa dependa de la participación total de los empleados, desde la alta dirección de los trabajadores de líneas. El TPM respeta la autonomía de los trabajadores, pero promueve las autónomas solamente después de que estén suficientemente motivados y tengan la competencia adecuada para dirigirse con éxito sus propias actividades, y solamente cuando se haya creado un entorno de trabajo que apoye las actividades autónomas. Establecer ese entorno favorable es la responsabilidad primaria de la dirección con esta fase.

Durante las dos primeras fases del desarrollo del TPM, la dirección debe entrenar a los trabajadores para tratar el equipo, con el fin de ir mejorando sus capacidades de operación y mantenimiento y promoviendo el mantenimiento autónomo. Esto puede hacerse solamente con un estilo de dirección no autoritario, pero también

los empleados deben comprometerse para resultar capaces de manejar y mantener el equipo. Los empleados verdaderamente independientes surgirán solamente cuando su motivación encaje con un ambiente favorable creado por la dirección.

Lleva un tiempo considerable cambiar las actitudes y hábitos del personal, pero merecen la pena el esfuerzo porque se tiene a su alcance un 50 por ciento de incremento en la productividad. Entonces, conforme mejora el entorno de la fábrica, los empleados encuentran su trabajo más satisfactorio.

La alta dirección debe entender y creer en el concepto de TPM antes de implementarlo. Las consultas con otros directores que hayan implementado con éxito el TPM o las visitas a sus instalaciones pueden ayudar a eliminar dudas y mejorar por tanto la calidad de su apoyo a los trabajadores de la fábrica.

PASO 2. LANZAMIENTO DE CAMPAÑA EDUCACIONAL

El segundo paso en el programa de desarrollo de TPM es el entrenamiento y promoción en el mismo, lo que debe empezar tan pronto como sea posible después de introducir el programa.

El objetivo de la educación es, no solamente explicar el TPM, sino también elevar la moral y romper la resistencia al cambio- en este caso, el cambio al TPM.

La resistencia frente al TPM puede adoptar diferentes formas: algunos trabajadores pueden preferir la división de tareas más convencional (los operarios manejan el equipo, mientras los trabajadores de mantenimiento lo reparan). Los trabajadores de la línea de producción a menudo temen que el TPM incrementara la carga de trabajo, mientras el personal de mantenimiento es escéptico sobre la capacidad de los operarios de línea para practicar el PM. Adicionalmente, los que están practicando el PM con buenos resultados pueden dudar que el TPM provea beneficios añadidos. La realización de la educación TPM debe diseñarse para eliminar la resistencia y elevar la moral. En Japón, por ejemplo ha sido muy efectivo organizar jornadas de 2-3 días de entrenamiento por niveles para directores y jefes de sección para proveer apoyo con su resistencia.

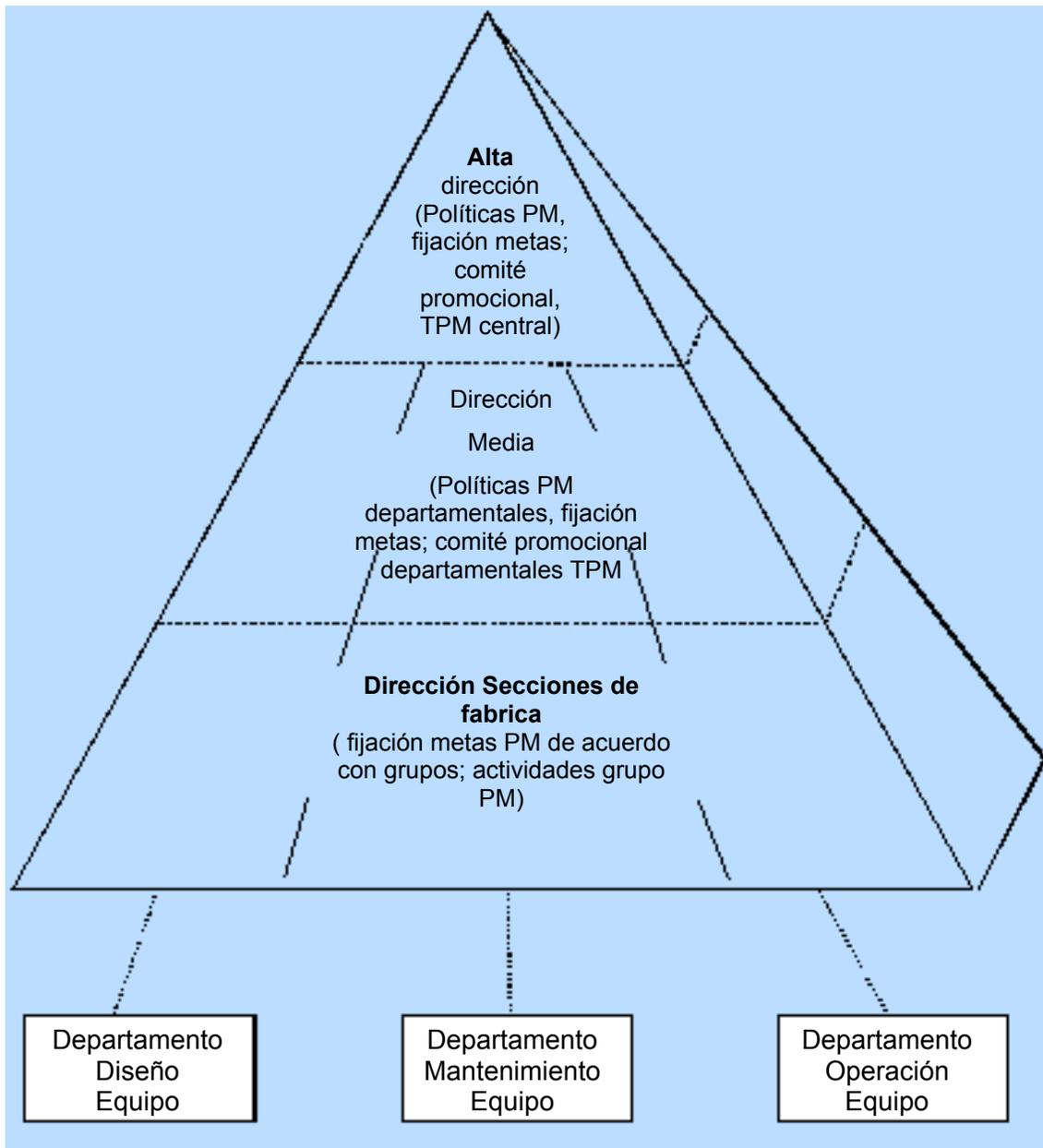
Los trabajadores de fabrica pueden entrenarse mediante presentaciones visuales (películas, filminas). Este entrenamiento puede forzarse invitando a supervisores y otros directivos a asistir reforzando e invitando a supervisores y otros directivos a asistir a reuniones de pequeños grupos sobre TPM para que relaten lo que han aprendido en sus propias reuniones. Durante la fase de educación TPM, se organizan usualmente una compañía para promover el entusiasmo para la implantación del TPM. Las compañías japonesas a menudo usan banderolas, placas, y distintivos que llevan inscritos eslóganes TPM para crear un entorno positivo.

PASO 3. CREAR ORGANIZACIONES PARA PROMOVER EL TPM

Una vez que se ha completado la educación introductoria al nivel de personal de dirección (de jefes de sección hacia arriba), puede empezar la creación de un sistema promocional del TPM. La estructura promocional TPM se basa en una matriz organizacional, conformada por grupos horizontales tales como comités y grupos de proyecto en cada nivel de la organización vertical de dirección. Es extremadamente importante para el éxito y desarrollo general del TPM. Como se ilustra en la figura 44, los grupos se organizan por rangos, por ejemplo, el comité promocional del TPM, los comités promocionales de fábrica y departamento, y los círculos PM al nivel del suelo de la fábrica. Es critica la integración arriba-bajo,

desde las metas orientadas por la dirección con los movimientos desde abajo, y las actividades de los pequeños grupos en la fábrica

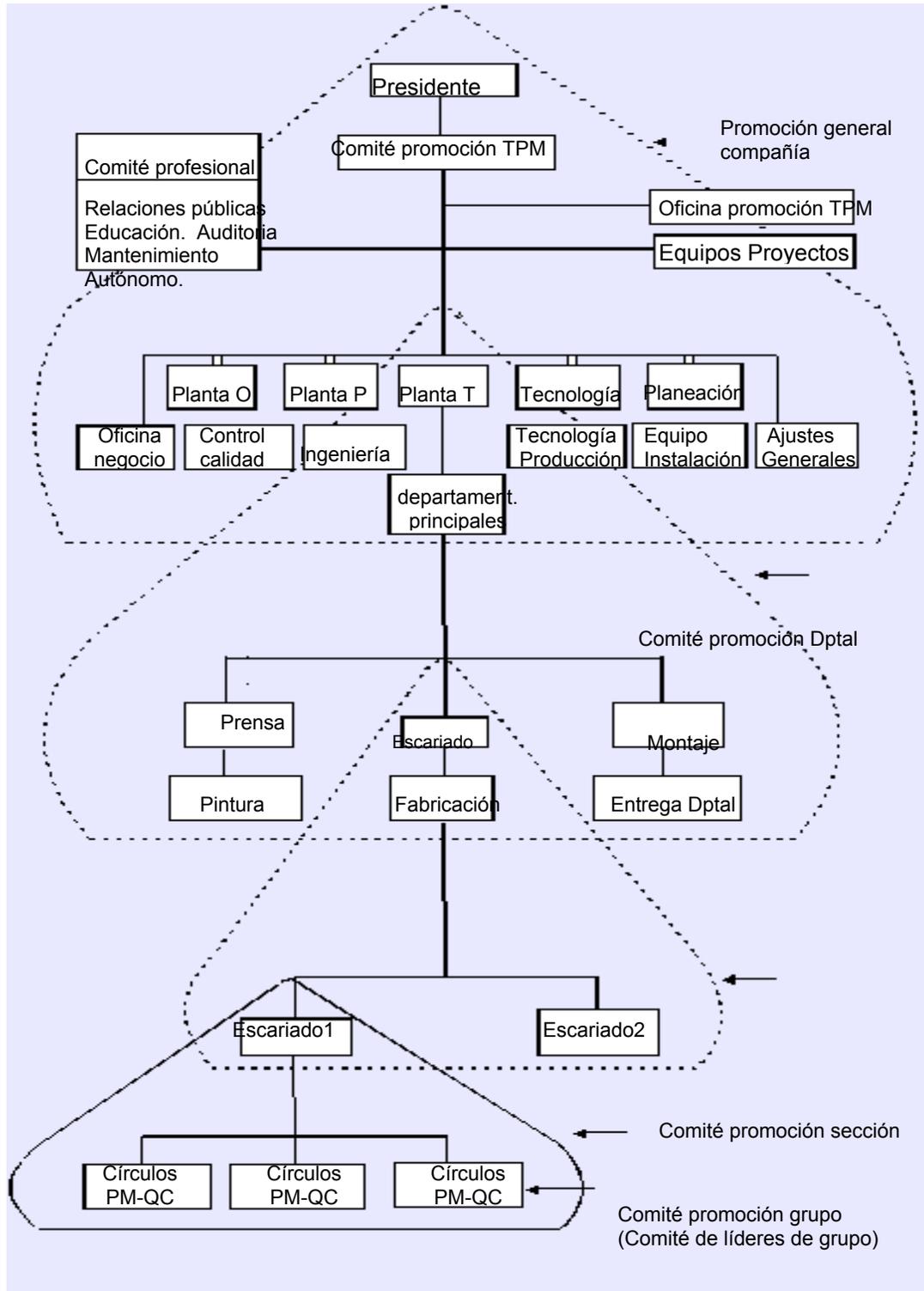
FIGURA 44. ESTRUCTURA PROMOCIONAL TPM



Tradicionalmente, las actividades de pequeños grupos, tales como los círculos QC (Círculos de calidad), se organizan aparte de la estructura de dirección. Cuando las actividades TPM no pueden integrarse completamente dentro de una estructura de dirección, estos círculos QC pre-existentes pueden utilizarse para promover las actividades PM. Sin embargo, normalmente las actividades de los pequeños grupos autónomos pueden realizarse dentro de la estructura de dirección existente. Nuevos círculos PM o grupos pueden crearse dentro de esta estructura asignando responsabilidades de liderazgo a líderes de sección, líderes de grupo, o supervisores.

Rensis Likert abogó por las actividades de pequeños grupos como medio de promover la dirección participativa. Siguiendo a Liker, el JIPM recomienda una red de pequeños grupos superpuestos, organizados en cada nivel desde la alta dirección hasta el último nivel de la compañía. Cada líder participa como miembro de un pequeño grupo en el nivel siguiente. En otras palabras, los líderes de grupo sirven como conexiones entre niveles, facilitando la comunicación horizontal y vertical. La figura 45 es un ejemplo de este tipo de organizaciones para las actividades de pequeños grupos, que ilustran la estructura promocional del TPM del ganador del premio PM de 1982, Central Motor Wheel Co. En sus plantas, además de las actividades de pequeños grupos en cada nivel, se ha organizado comités y equipos de proyecto para promover la eliminación de las seis grandes pérdidas.

FIGURA 45. EJEMPLO DE ESTRUCTURA PROMOCIONAL DEL TPM



Como el TPM se implementa a lo largo de un periodo de tres años, es importante que se establezca y dote de staff a una oficina central promocional del TPM. Sirviendo como staff general para la alta dirección, estos profesionales juegan un rol crucial en la estructura promocional del TPM. Idealmente, estas personas deben ser empleados a tiempo completo de gran formación y entrenados en la gestión de equipos.

PASO 4: ESTABLECER POLÍTICAS Y METAS PARA EL TPM

Las oficinas centrales promocionales del TPM deben empezar establecimiento políticas y metas básicas. Como toma como mínimo tres años moverse hacia la eliminación de defectos y averías, a través del TPM una política de dirección básica debe ser comprometerse con el TPM e incorporar procedimientos concretos de desarrollo del TPM en el plan de dirección general a medio y largo plazo.

Aunque a menudo los eslóganes y lemas de la compañía se exhiben en paneles y vallas, no hay que olvidar en adherir también a los mismos medios, políticas concretas básicas y metas anuales. Aunque las políticas pueden consistir de proposiciones abstractas verbales o escritas, las metas deben ser cuantitativas y precisas, especificando la meta (qué), la cantidad (cuanto) y el período de tiempo (cuando). Por ejemplo, una política de dirección básica puede ser: “ Para producir

las pérdidas eliminando las averías, los defectos y los accidentes mientras se relanza la rentabilidad de la compañía creando un entorno de trabajo favorable para todos los empleados”. En esta proposición, las metas de la dirección son claras y sucintas y la política básica puede expresarse en números concretos, tales como objetivos cuantitativos. Por supuesto, eliminar totalmente averías y defectos puede ser una meta inalcanzable. Por tanto, la dirección debe fijar metas intermedias: un plan de tres años, por ejemplo.

Para fijar una meta alcanzable, debe medirse y comprenderse el nivel actual y características de las averías y tasas de defectos de procesos por pieza o equipo. En algunas compañías esta información no está disponible y debe comenzarse identificando las condiciones actuales.

Si asumimos que las investigaciones revelan que ocurren actualmente 40 averías por mes, y la tasa de defectos de procesos es del tres por ciento, emplearemos estos números como una marca de referencia, y estimaremos que es posible reducir la tasa incidente a una décima parte en tres años, esto es, a cuatro averías por mes y una tasa de defectos de proceso de 0,3. Para decidir cuáles deben ser los niveles de los objetivos, debemos considerar necesidades internas y externas. Cuando esto se ha establecido, las metas de tres años deben compararse con las condiciones actuales. Entonces deben predecirse las mejoras, estimarse las

contribuciones a los negocios de la compañía, y calcularse la tasa de beneficios por mejoras de costes.

Una vez fijadas las metas a medio y largo plazo para la compañía y fábrica, deben desarrollarse adicionalmente en cada departamento y nivel. Las metas anuales se determinan por los directores y supervisores asegurado los temas y metas establecidos independientemente por los pequeños grupos de trabajadores son consientes con las metas globales de la compañía.

PASO 5. FORMULAR UN PLAN MAESTRO PARA EL DESARROLLO DEL TPM

Las siguientes responsabilidades de la oficina central del TPM son establecer un plan maestro para el desarrollo TPM. Esto debe incluir el programa diario de promoción de TPM, empezando por la fase de preparación anterior a la implementación. La figura 46 es un plan maestro real tomado de Central Motor Wheel Co., donde el desarrollo del TPM se centra en las siguientes cinco actividades de mejoras básicas:

- a) Mejorar la efectividad del equipo a través de la eliminación de las seis grandes pérdidas (realizando por equipos de proyectos).
- b) Establecer un programa de mantenimiento autónomo por los operarios (siguiendo un método de siete pasos).
- c) Aseguramiento de la calidad.

- d) Establecer un programa de mantenimiento planificado por el departamento de mantenimiento.
- e) Educación y entrenamiento para aumentar las capacidades personales.

FIGURA 46. PLAN MAESTRO PARA PROMOCION DE TPM

| | 1979 | 1980 | 1981 | 1982 | | |
|-------------------------------|--|------------|-----------|-----------|-------------|-----------------------|
| | Preparar | Introducir | Implantar | Completar | Estabilizar | Mejorar Mantenimiento |
| Efectividad equipo | <p>Crear línea modelo a través de actividades como:</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">Mantenimiento Preventivo</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">Reducir roturas piezas</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">Reducir tiempos preparación / ajuste</div> </div> | | | | | |
| Mantenimiento Autónomo | <p>Creación de fundamentos para el mantenimiento autónomo</p> <p>Promover mantenimiento autónomo</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Limpieza inicial 2. Resolver problemas difíciles 3. Estándares Limpieza/ Lubricación 4. Inspección General 5. Revaluar pasos 2 v 4. 6. Auto – Auditoria 7. Organización / Orden. 8. Metas dirección | | | | | |
| calidad | <ul style="list-style-type: none"> • Trabajar produciendo calidad razonable (incluye mantenimiento predictivo del equipo de soldadura); asegurar calidad en arranque de fabricación. • Mejora de la mantenibilidad y de los sistemas de prevención del mantenimiento. • Sistema completo de control del "Commissioning" | | | | | |
| Mto Planificado | <ul style="list-style-type: none"> • Trabajar produciendo calidad razonable (incluye mantenimiento predictivo del equipo de soldadura); asegurar calidad en arranque de fabricación. • Mejora de la mantenibilidad y de los sistemas de prevención del mantenimiento. • Sistema completo de control del "Commissioning" | | | | | |
| Destrezas | <p>Perfectas habilidades de mantenimiento:</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">12/80 Primera reunión compañía</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">6/81 Segunda reunión compañía</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">5/82 Tercera reunión compañía</div> </div> | | | | | |

PASO 6. EL “DISPARO DE SALIDA” DEL TPM

El disparo de salida es el primer paso para la implantación, el comienzo de la batalla contra las seis grandes pérdidas. Durante la fase de preparación (pasos 1-5) la dirección y el staff profesional juegan el rol dominante. Sin embargo, a partir de este punto, los trabajadores individuales deben cambiar desde sus rutinas de trabajo diario tradicionales y empezar a practicar el TPM. Cada trabajador juega ahora un rol crucial. Como alguien ha dicho, “No hay lugar para ser espectador en el TPM”, indicando que cada persona es un participante – no puede haber “mirones”. Por esta razón, cada trabajador debe apoyar la política sobre TPM de la alta dirección a través de actividades para eliminar las seis grandes pérdidas.

El “disparo de salida” debe ayudar a cultivar una atmósfera que incremente la moral y dedicación de los trabajadores. Japón, a menudo se organiza una reunión de todos los empleados. Frecuentemente se invitan también a representantes de compañías clientes y relacionadas. En la reunión, los directores de alto nivel informan sobre los planes preparados y el trabajo cumplido durante la fase de preparación, tal como la estructura promocional del TPM, las metas y políticas básicas del TPM, y el plan maestro para el desarrollo del TPM. Después, unos representantes de los trabajadores afirman el compromiso común para las metas y ganar el premio PM.

PASO 7. MEJORAR LA EFECTIVIDAD DEL EQUIPO

El TPM se implementa a través de las cinco actividades de desarrollo básicas del TPM, la primera de las cuales es mejorar la efectividad de cada pieza del equipo que experimenta una pérdida. El staff de ingeniería y mantenimiento, los supervisores de línea, y los miembros de pequeños grupos se organizan en equipos de proyecto que harán mejoras para eliminar las pérdidas. Estas mejoras producirán resultados positivos dentro de la compañía. Sin embargo, durante las fases tempranas de la implantación, habrá personas que duden el potencial del TPM para producir los resultados – incluso algunos que hayan visto como en otras compañías el uso del TPM incrementa la productividad y calidad, reduce los costes, mejora los resultados, y crea un entorno favorable de trabajo.

Para superar estas dudas y crear confianza en el TPM, debemos demostrar efectividad centrandos los esfuerzos de los grupos de trabajo sobre los equipos que sufren pérdidas crónicas durante la operación – piezas que mostraran mejoras significativas en un periodo de tres meses. En cada taller se seleccionara varias piezas de equipos como modelos y un equipo de proyecto se asignara a cada pieza. Estos proyectos tienen un beneficio dual: prueba la efectividad del TPM y dan al staff de ingeniería y mantenimiento una experiencia directa. Adicionalmente los líderes del grupo pueden usar estas experiencias ganadas con la mejora de otros equipos en centros de trabajo individuales. Los directores no deben vacilar

en aplicar IE (ingeniería industrial), QC, o cualesquiera otras técnicas para promover la mejora en las áreas seleccionadas. El análisis PM (desarrollado por el consultor Kunio Shrose del JIPM) es otra técnica efectiva para eliminar las pérdidas crónicas del equipo. El análisis PM consiste en lo siguiente:

1. Definir el problema: examinar el problema (pérdida) cuidadosamente; compara sus síntomas, condiciones, partes afectadas, y el equipo con los casos similares.
2. Hacer un análisis físico del problema: hacer un análisis físico clarifica detalles y consecuencias ambiguos. Todas las pérdidas pueden explicarse con leyes físicas simples. Por ejemplo, si son frecuentes las muescas o rayados procedentes de un proceso, debe sospecharse fricción o contacto entre dos objetos. (De los dos objetos, las muescas o rayados aparecerán en el objeto menos resistente). Por tanto, examinado los puntos de contacto, se revelaran las áreas problemáticas específicas y los factores contribuyentes.
3. Aislar cada condición que pueda causar el problema: un análisis físico del fenómeno de una avería revelan los principios que controlan su ocurrencia y descubren las condiciones que la producen. Explorar todas las causas posibles.

4. Evaluar el equipo material, y métodos: considerar cada condición identificada en relación con el equipo, y útiles y materiales y métodos de operación y extraer una lista de factores que influyen las condiciones.
5. Planificar la investigación: Planificar cuidadosamente el perfil y dirección de investigación de cada factor. Decidir que medir y como medir y seleccionar un plano de datos.
6. Investigar las disfunciones: Todos los ítems planificados en el paso 5 deben ser investigados completamente, manteniendo en el pensamiento las condiciones optimas a conseguir y la influencia de defectos ligeros. Evitar el enfoque tradicional de análisis factorial: No ignorar las disfunciones que podrían de otro modo considerarse peligrosas.
7. Formular planes de mejora.

Las tablas 8 y 9 se basan en ejemplos de análisis de TPM aplicados a defectos crónicos de calidad y paradas menores.

TABLA 8. EJEMPLO DE ANÁLISIS PM(1)

| Fabrica | Fenómeno | Descripción | Condición básicas | Relevancia del equipo, materiales |
|-------------------------------------|-----------------|--|---------------------------------------|--|
| Proceso extrusión cloruro de vinilo | Pirólisis | Carbonización causada por calor excesivo acompañada por una gran obstrucción causada por flujo anormal | Holgura entre cilindro y tornillo | |
| | | | Causas en el tornillo | Muestras / Suciedad Excentricidad |
| | | | Precisión montaje piezas individuales | Precisión montaje |
| | | | Precisión piezas individuales | Suciedad en área circundante |

TABLA 9. EJEMPLO DE ANÁLISIS PM(2)

| Fabrica | Fenómeno | Descripción | Condición básicas | Relevancia del equipo, materiales |
|------------------------|---|--|--|--|
| Proceso Secado batería | Las baterías resbalan en mesa giratoria | Pérdida de equilibrio acompaña al cambio del centro de gravedad por causa de condiciones | Las condiciones crean fricción: - Contacto entre tabla giratoria y producto - Factores inherentes al producto (fondo torcido, fijación anormal). | Omitido |

| | | | | |
|--|--|--|---|--|
| | | condiciones externas (golpe, fricción, Balanceo, etc.) | Condiciones que crean balanceo: - Factores inherentes a tabla giratoria (balanceo involuntario, ondulación) - Contacto entre tabla giratoria y guías alrededor. | superficie de la tabla, balanceo y nivelación -Giro irregular punto contacto Perfil guía, posición, angulo |
|--|--|--|---|--|

PASO 8. ESTABLECER UN PROGRAMA DE MANTENIMIENTO AUTÓNOMO PARA LOS OPERARIOS

La segunda de las cinco actividades de desarrollo del TPM, el mantenimiento autónomo, es el paso octavo del programa de desarrollo. Debe atacarse justo después del “disparo de salida”.

El mantenimiento autónomo por los operarios es una característica única del TPM; su organización es central para la promoción del TPM dentro de la compañía. Cuanto más antigua es una compañía, más dificultoso es implantar el mantenimiento autónomo, porque los operarios y el personal de mantenimiento encuentran penoso apartarse del concepto: “Yo opero-tu reparas”.

Los operarios están acostumbrados a dedicarse a tiempo completo a la producción, y el personal de mantenimiento espera asumir la plena

responsabilidad del mismo. Tales actitudes y expectativas no pueden cambiarse de la noche a la mañana, lo que es una de las razones por las que es típico que lleve de dos a tres años progresar desde la introducción del TPM hasta su plena implantación. Cambiar el pensamiento y el entorno de una compañía y lleva tiempo.

En la promoción del TPM, cada persona desde la dirección hasta el último operario deben creer que es factible que los operarios realicen el mantenimiento autónomo y que los trabajadores deben ser responsables de su propio equipo. Adicionalmente, cada operario debe estar entrenado en las herramientas necesarias para realizar el mantenimiento autónomo.

Algunas compañías japonesas que no han implantado todavía el TPM insisten en que sus operarios realizan actividades de mantenimiento autónomo tales como inspección, lubricación y limpieza. Sin embargo, en la mayoría de los casos realizan mecánicamente algunos movimientos sin esforzarse en nada en particular. Las hojas de chequeo diario que rellenan revelan su actitud: algunos operarios chequean elementos por anticipado (de forma que no tenga que molestarse con ello al día siguiente); se pasan por alto algunas tareas importantes (por ejemplo, un engrasador que hay que rellenar regularmente se encuentra casi vacío). Adicionalmente, como estas compañías el equipo no está mantenido

aproximadamente, la abrasión, sacudidas, aflojamiento de pernos, contaminación, y corrosión causan averías y defectos de calidad.

➤ **Mantenimiento autónomo en siete pasos.**

Las 5 S: Seiri, Seiton, Seiso, Seiketsu y Shitsuke (aproximadamente, organización, buen arreglo, pureza, limpieza y disciplina) son principios básicos de la dirección de operaciones. En el momento actual, aunque la mayoría de las prácticas aplican algunos de estos principios, muchas lo hacen superficialmente.

La dirección está a menudo más interesada con las apariencias, tales como pintar ciertas partes de las instalaciones, e ignorar la limpieza interna que exige desmontar y mover piezas. Cubrir con pintura el polvo, la suciedad, y la grasa es como poner sobre una piel sucia o enferma un grueso vestido que la tape.

El JIPM recomienda que las compañías que deseen evitar un mantenimiento autónomo superficial adopten un enfoque de siete pasos que incluyan la maestría progresiva de las 5 S.

Los trabajadores individuales adquieren las capacidades correspondientes a cada paso a través del mantenimiento y la práctica. Solamente después de

complementar el entrenamiento en un concepto y de confirmado el hecho, se permite al trabajador progresar al próximo paso.

La tabla 10 resume el método de siete pasos desarrollados por el consultor del UIMP Fumio Goto. Aquí se resumen las metas y objetivos de cada paso.

TABLA 10. EJEMPLOS DE 7 PASOS PARA DESARROLLAR EL MANTENIMIENTO AUTÓNOMO

| PASO | ACTIVIDADES |
|--|--|
| 1. Limpieza Inicial | Limpiar para eliminar el polvo y suciedad principalmente en el bastidor del equipo; Lubricar y apretar pernos; descubrir problemas y corregirlos. |
| 2. Contramedidas en la fuente de los problemas | mejorar partes que son difíciles de limpiar y lubricar; reducir el tiempo requerido para limpiar y lubricar. |
| 3. Estándares para limpiar y lubricar | Establecer estándares que reduzcan el tiempo gastado limpiando, lubricando y apretando (tareas diarias y periódicas). |
| 4. Inspección generalizada | de círculos descubren y corrigen defectos menores del equipo. |
| 5. Insp. Autónoma | Desarrollar y emplear listas de chequeo para Insp. Autónoma. |
| 6. Organización y Orden | individuales; sistematizar a fondo el control de mantenimiento. Estándares para: Inspección de limpieza y lubricación, registrar datos y mantenimiento de piezas y herramientas. |
| 7. Mantenimiento Autónomo pleno | Desarrollo adicionales de políticas y metas compañía; Incrementar regularidad de actividades de mejora. Registrar resultados análisis MTBF y diseñar contramedidas |

➤ **Limpieza inicial**

Los operarios desarrollan el interés y compromiso con sus maquinas a través de una limpieza profunda de las mismas. La limpieza es un proceso

educacional del que surgen diversas cuestiones (“¿por qué esta parte acumula suciedad tan rápidamente?”) y se contestan otras (“no hay vibraciones cuando este perno esta adecuadamente apretado”). Los operarios aprenden que la limpieza es inspección. También aprenden una lubricación básica y las técnicas de anclaje y se capacitan en detectar problemas de equipo.

- **Contra medidas por las causas y efectos de la suciedad y el polvo:** Cuanto más difícil sea para una persona realizar la limpieza inicial, mas fuerte es el deseo de mantener limpio el equipo y, por tanto, de reducir el tiempo de limpieza. Deben adoptarse medidas para eliminar las causas de la suciedad, polvos, esquirlas, etc., o de limitar la dispersión y adherencia de partículas (p.e., usando cubiertas y blindajes).

Si una causa no puede retirarse completamente, deben determinarse procedimientos de limpieza e inspección más eficientes para las áreas problema. Cada taller es responsable de limpiar y mejorar su are de trabajo, pero el staff de ingeniería y mantenimiento deben cooperar con ello y apoyar sus esfuerzos.

- **Estándares de limpieza y lubricación:** En los pasos 1 y 2, los operarios identifican las condiciones básicas que deben aplicarse al equipo. Cuando se ha hecho esto, los círculos TPM pueden establecer estándares para un trabajo

de mantenimiento básico y efectivo para evitar deterioro, p.e., limpiar, lubricar y apretar pernos en cada pieza del equipo.

Obviamente, el tiempo disponible para limpieza, lubricación apretado de pernos y detectar los defectos menores es limitado. Los supervisores deben dar a los operarios, márgenes de tiempo razonable para gastarlos en esas tareas – por ejemplo, diez minutos cada diez días antes y después de operación, treinta minutos en los fines de semana y una hora al final de cada mes.

Si los estándares fijados por los operarios no pueden mantenerse dentro de los márgenes de tiempo establecidos, deben mejorarse las prácticas de limpieza y lubricación. Esto puede conseguirse investigando ideas innovativas, tales como controles visuales que muestren los límites en los calibres de nivel de los engrasadores, junto con un mejor posicionamiento de los engrasadores, y métodos más eficientes de lubricación. En tales casos, los operarios pueden hacerse cambios con el pleno apoyo y cooperación de supervisores y staff.

La figura 47 muestra estándares de limpieza y lubricación fijados tentativamente por un círculo. Se reevalúan mas adelante como estándares de mantenimiento autónomo en el paso 5, inspección autónoma.

FIGURA 47. EJEMPLO DE ESTÁNDARES DE LIMPIEZA Y LUBRICACIÓN DE TOTAL GOMU

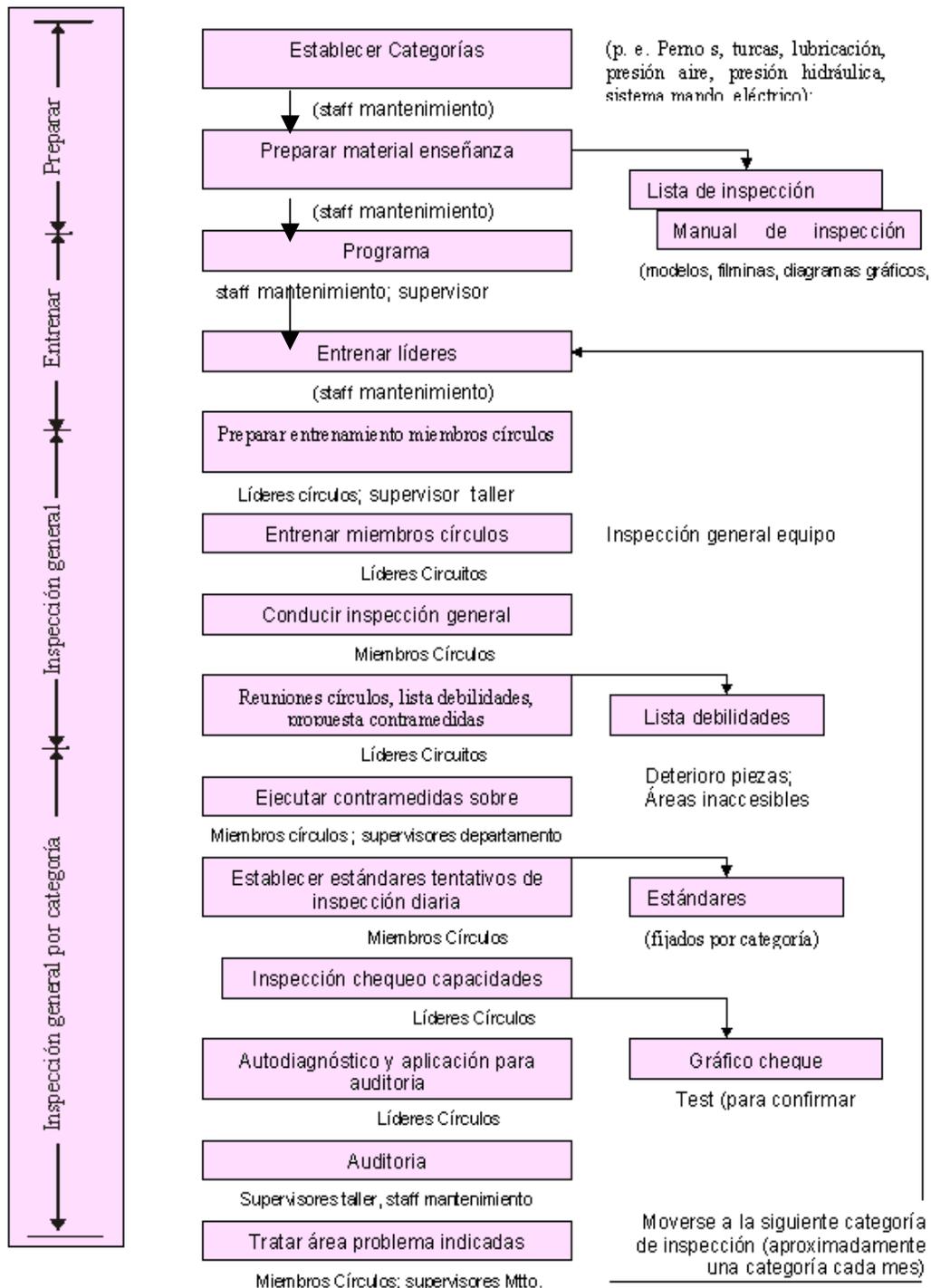
| Estándares de limpieza y lubricación para 3-S /RL | | Director planta: Jefe sección: Ingeniero PM: Supervisor: | | | | |
|---|-----------------------------------|---|-----------------|-------------------|------|-----|
| Estándares de limpieza | Métodos Limpieza | Útiles limpieza | Tiempo Limpieza | Ciclo Limpieza | | |
| | | | | Día | Sem. | Mes |
| No adherencia desechos caucho al bastidor | Remover con rascador acero; lavar | | 15min. | | ○ | |
| No dispersión desechos cauchos | Barrer con cepillo | | 5min. | ○ | | |
| Nivel aceite fácil de leer | | | 3min. | | ○ | |
| No aceite y polvo | | | 10min. | | ○ | |
| No Fugas o suciedad | | | 30min. | | | ○ |
| 1. Apretar pernos junta anillo bomba suministro automático | | | | | | |
| 2. Apretar válvula suministro aceite y chequear fugas | | | | | | |
| 3. Apretar pernos fijación guía bobina | | | | | | |
| Estándares lubricación | Métodos lubricación | Equipo lubricación | | Ciclo lubricación | | |
| | | | | Día | Sem. | Mes |
| | Echar a mano | | 10min. | | ○ | |
| | Aceitera | | 5min. | | | ○ |
| | | | 5min. | | | ○ |
| | Usar aplicador aceite | | 5min. | | ○ | |
| 1. Asegurar cubierta gran rueda engranaje (no ruidos) | | | | | | |
| 2. Asegurar fijación pernos de bomba suministro automático aceite | | | | | | |
| 3. Chequear unidad 3 FRL (filtro, regulador, lubricador) y tasa destilación | | | | | | |

➤ **Inspección general:** Los pasos 1 al 3 se realizan para evitar el deterioro y controlar las condiciones básicas de mantenimiento del equipo – limpieza, lubricación y apretado de pernos. En el paso 4, intentamos medir el deterioro del equipo. Adicionalmente al trabajar restaurando las buenas condiciones de operación del equipo, se incrementa la competencia de los operarios del equipo. Inicialmente, los líderes de círculo TPM reciben entrenamiento en estos procedimientos de inspección (una categoría de inspección a la vez) usando un manual de inspección general preparado por el staff y supervisores. Estos líderes participan lo aprendido con los miembros de su círculo. Los grupos de trabajadores trabajan juntos para identificar y reconocer las áreas problemáticas descubiertas durante la inspección del mantenimiento, el círculo toma la acción necesaria para corregir el deterioro y mejorar las áreas afectadas. La figura 48 muestra el desarrollo de pasos necesarios para entrenar a trabajadores y ejecutar una inspección general del equipo.

El entrenamiento en inspección general debe realizarse en una categoría a la vez, empezando con el desarrollo de capacidad. Su efectividad se audita y refuerza con entrenamiento adicional y aplicaciones prácticas. Este ciclo de entrenamiento, aplicación, auditoria, y modificación se repite para cada categoría de inspección.

El cuarto paso puede requerir largo tiempo para completarse, porque todos los operarios deben desarrollar la habilidad para detectar anomalías. Sin embargo, es el mejor método para producir operarios competentes, de forma que es un paso que no debe apresurarse. Los resultados positivos no podrán lograrse hasta que cada trabajador adquiera los conocimientos necesarios.

FIGURA 48. PROCEDIMIENTOS PARA DESARROLLAR EDUCACIÓN Y ENTRENAMIENTO EN INSPECCIÓN.



Los tres primeros pasos del mantenimiento autónomo se centran en requerimientos básicos, y por tanto los esfuerzos en estos pasos iniciales no pueden siempre exhibir resultados dramáticos. Sin embargo para el final del paso 4, la compañía debe poder contemplar cambios espectaculares, tales como una reducción del 80 por ciento en los fallos del equipo o una tasa de efectividad global del equipo por encima del 80 por ciento.

Si por este tiempo no aparecen resultados, probablemente no se ha adquirido maestría en los conocimientos enseñados en los pasos iniciales. Ello puede también señalar un nivel bajo generalizado de “expertise “técnico. Si este es el caso, es mejor empezar otra vez y comenzar por elevar el nivel técnico.

➤ **Inspección autónoma:** En este paso, los estándares en los pasos 1 al 3 y los estándares de inspección tentativos se comparan y reevalúan para eliminar cualesquiera, inconsistencia y asegurar que las actividades de mantenimiento encajan dentro de las metas y periodos de tiempo establecidos.

En este periodo de los operarios ya están plenamente entrenados para conducir una inspección general (paso 4), y el departamento de mantenimiento debe establecer un calendario de mantenimiento anual y prepara sus propios estándares de mantenimiento. Los estándares desarrollados por los círculos de talleres deben entonces compararse con estos estándares de mantenimiento para

corregir omisiones y eliminar solapes en categorías individuales. Las responsabilidades de los dos grupos deben definirse claramente de forma que se realiza una inspección completa para cada categoría.

➤ **Organización y orden:** Seiri, u organización, significa identificar los aspectos a dirigir del área de trabajo y fijar estándares apropiados para ello. Esto es un trabajo de directores y supervisores, quienes deben minimizar y simplificar los objetos ó condiciones a gestionar. Seiton u orden o arreglo apropiado, que significa adherirse a los estándares establecidos, es principalmente de la responsabilidad del operario. Parte de las actividades de los círculos debe siempre enfocarse a mejoras que hagan más fácil seguir los estándares.

Seiri y Seiton son por tanto actividades de mejora que promueven la simplificación, organización y adherencia a los estándares, modos de asegurar que la estandarización y controles visuales se instituyen en toda la fábrica.

Los pasos 1 al 5 enfatizan las actividades concernidas con la inspección y mantenimiento de las condiciones básicas del equipo (limpieza, lubricación, y apretado de pernos). Sin embargo, el rol del operario es mucho más amplio que esto.

En el paso 6, los directores y supervisores toman el liderazgo para completar la implantación del mantenimiento autónomo evaluando el rol de los operarios y clarificando sus responsabilidades. Por ejemplo, ¿qué deben hacer los operarios para evitar averías y defectos, y que capacidades adicionales deben adquirir? Sobre la base de las experiencias de los operarios hasta este punto, los directores deben ampliar el perfil de sus actividades relacionadas con el equipo. Además del mantenimiento de las condiciones básicas y de la inspección del equipo, los operarios deben ser también responsables de:

- ✓ Operación y preparaciones de maquinas correctas.(condiciones de montaje y chequeo de calidad del producto).
- ✓ Detección y tratamiento de condiciones anormales.
- ✓ Registrar datos de la operación, calidad y condiciones de proceso.
- ✓ Servicios menores de maquinas, moldes, plantillas y útiles.

➤ **Implantación plena del mantenimiento autónomo:** A través de las actividades de los círculos de calidad conducidas por los supervisores (paso 6), los trabajadores desarrollan una mayor moral y competencia. Últimamente, llegan a ser trabajadores independientes, entrenados y en los que se puede confiar, de los que cabe esperar que verifiquen su propio trabajo e implanten mejoras autónomamente. En esta fase, las actividades de los círculos se centran en

eliminar las pérdidas e implantar en cada taller las mejoras adoptadas por los equipos de proyecto en los equipos de modelo.

➤ **Auditoria del mantenimiento autónomo**

Las auditorias de las actividades de los círculos sobre los equipos realizados por supervisores y staff juegan un rol importante en el desarrollo efectivo del sistema de mantenimiento autónomo. Para conducir las efectivamente, los supervisores y el staff deben entender a fondo el entorno del área de trabajo; deben proveer a los círculos con las instrucciones apropiadas y estimularles a dar a los trabajadores un sentido de logro conforme completan cada paso.

PASO 9. ESTABLECER UN PROGRAMA DE MANTENIMIENTO PARA EL DEPARTAMENTO DE MANTENIMIENTO

El noveno paso en el programa de desarrollo es también una de las cinco actividades básicas del TPM. Como se mencionó el mantenimiento programado realizado por el departamento de mantenimiento, debe coordinarse con las actividades de mantenimiento autónomo del departamento de operaciones, de forma que los departamentos puedan funcionar como las ruedas de un coche.

Hasta que la inspección general llegue a formar parte de la rutina de los trabajadores, se requerirá la asistencia del departamento de mantenimiento más a menudo de los que era antes de introducir el programa de desarrollo del TPM. Por ejemplo, las operaciones confiarán en los servicios de mantenimiento hasta identificar las debilidades y diseñar contramedidas en las áreas de problemas. Adicionalmente, las averías accidentales, mientras decrecen gradualmente, continuarán exigiendo atención. Por tanto, la carga de trabajo del departamento de mantenimiento será elevada durante cierto tiempo. Este excedente de carga temporal debe manejarse con prontitud a través de horas extras y subcontratación, apoyando el compromiso de los operarios. De otro modo, los operarios perderán su entusiasmo por el desarrollo del mantenimiento autónomo.

El volumen del trabajo del mantenimiento disminuirá de nuevo cuando la inspección general llegue a ser parte del trabajo de rutina de los operarios. El número de averías decrecerá significativamente y también remitirán las actividades de mantenimiento. En este punto, el departamento de mantenimiento se centrará en su propia organización.

El desarrollo de un programa de mantenimiento periódico debe comenzar antes que el procedimiento de inspección general por los operarios se haya completado (paso 4). Como se ha mencionado anteriormente, el departamento de mantenimiento debe desarrollar independientemente estándares para el equipo,

de forma que durante la fase de inspección autónoma (paso 5) puedan compararse contra los estándares fijados por el departamento de operaciones.

Una clara división de responsabilidades entre los dos departamentos es clave para una inspección efectiva y completa y puede cumplirse solamente cuando se combinan apropiadamente ambos conjuntos de estándares. Como el mantenimiento productivo se introdujo primero, el tema del mantenimiento programado ha sido examinado ampliamente y no necesita revisarse de nuevo.

Todo lo que necesitamos decir aquí es que si en una compañía el mantenimiento programado es inadecuado, debe reevaluarse como parte del desarrollo del programa de implementación del TPM. (Ver figuras 49 y 50)

FIGURA 49. EJEMPLO DE SISTEMA DE MANTENIMIENTO PRODUCTIVO

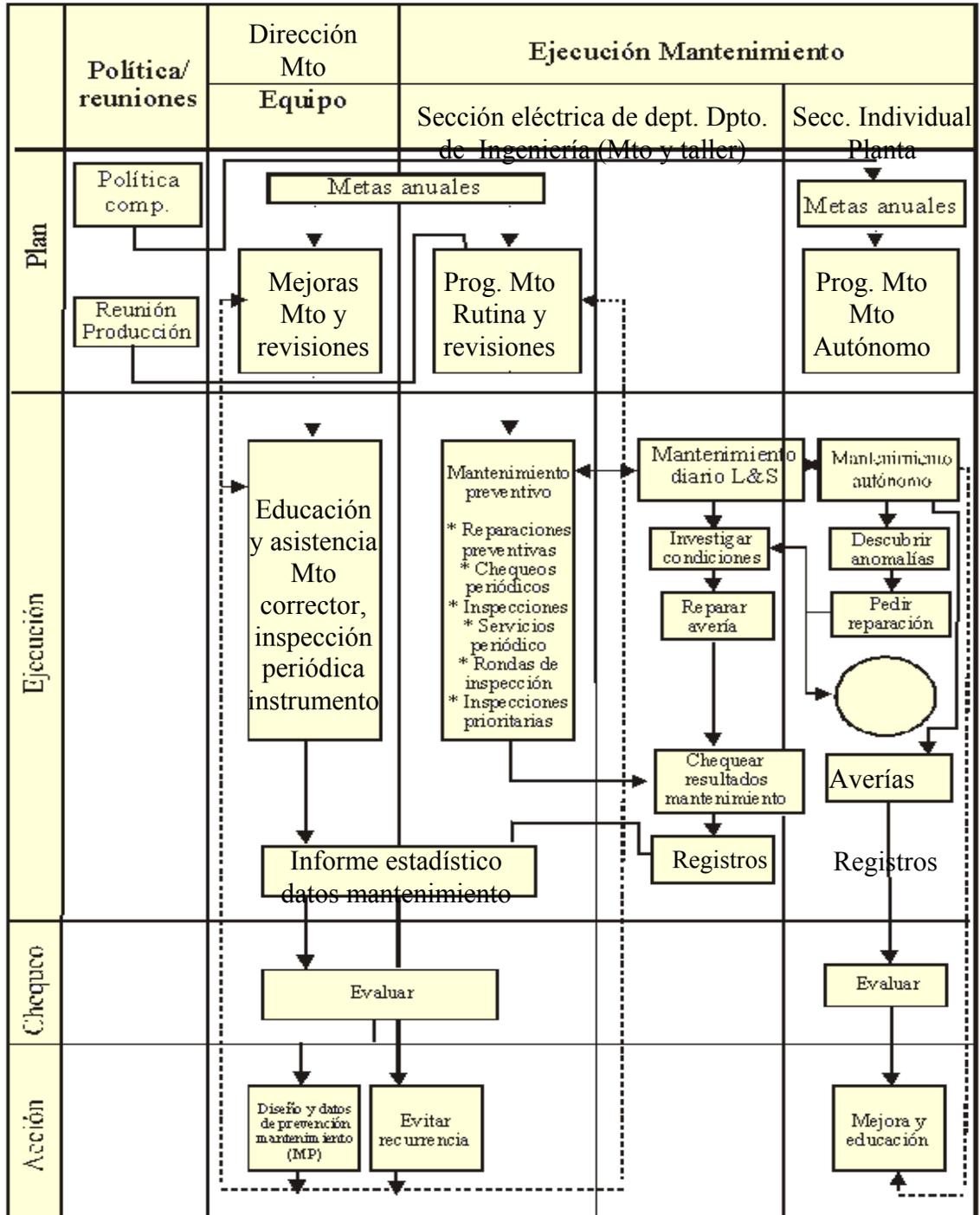


FIGURA 50. EJEMPLO DE GRAFICO DE FLUJO DE CONTROL DE MANTENIMIENTO

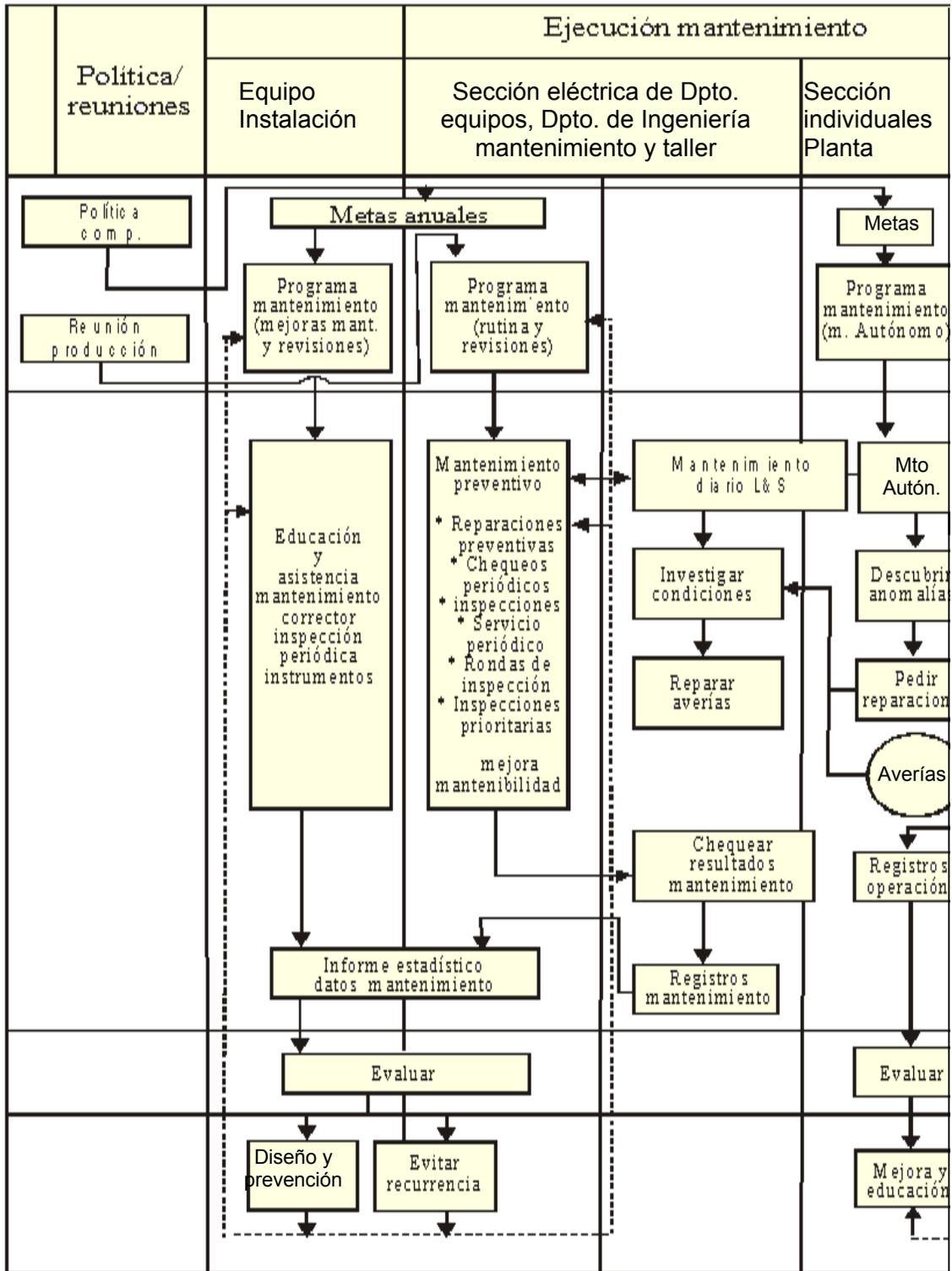
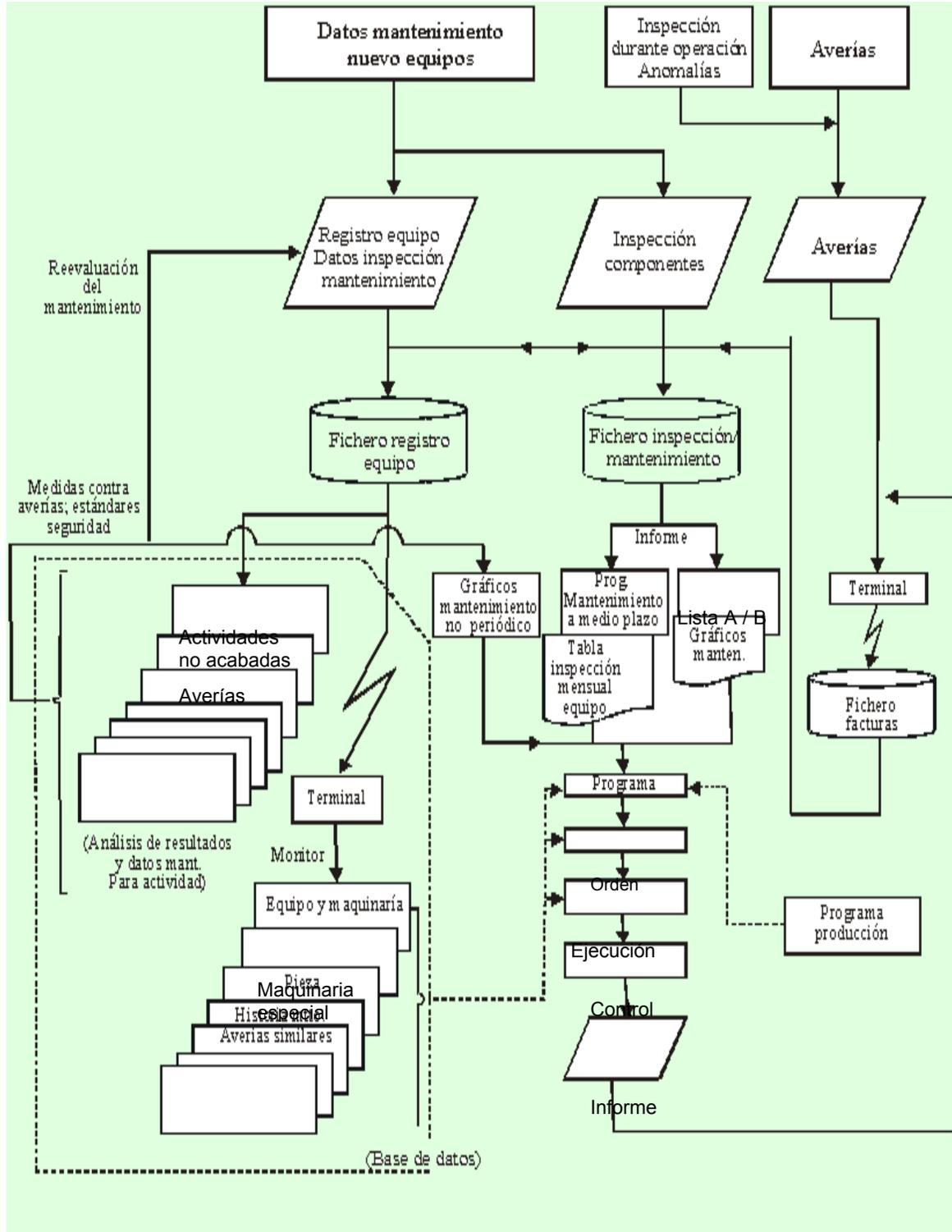


FIGURA 51. EJEMPLO DE ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO BASADOS EN EDP.



PASO 10. CONDUCIR ENTRENAMIENTO PARA MEJORAR CAPACIDADES DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

La mejora de las capacidades de operación y mantenimiento es la cuarta actividad de desarrollo del TPM y el décimo paso del programa del desarrollo del TPM.

En Japón, las grandes corporaciones del acero y la electrónica proveen a sus empleados con entrenamiento técnico en centros bien equipados, pero otras compañías infraestiman el valor del entrenamiento, especialmente el entrenamiento en técnicas de mantenimiento. La educación y el entrenamiento son inversiones en personal que rinden múltiples beneficios. Una compañía que implante el TPM debe invertir en entrenamiento que permita a los empleados gestionar apropiadamente el equipo. En adición al entrenamiento en técnicas de mantenimiento, los operarios deben afinar también sus capacidades en operación convencional.

El contenido y organización de los materiales introductorios pueden no variar mucho de una a otra compañía; por otro lado la educación técnica y entrenamiento para operación y mantenimiento debe ajustarse a los requerimientos individuales del área de trabajo.

El personal de mantenimiento es como los médicos, deben ser competentes, de otra manera la condición de sus pacientes puede solamente empeorar.

PASO 11. DESARROLLO TEMPRANO DE UN PROGRAMA DE GESTIÓN DE EQUIPOS

En la figura 51, la última categoría de las actividades de desarrollo del TPM es la gestión temprana o anticipada del equipo. Cuando se instala el nuevo equipo, a menudo aparecen problemas durante las operaciones de test y arranque, aunque durante el diseño, la fabricación, y la instalación todo parece marchar normalmente.

Puede que los ingenieros de mantenimiento e ingeniería tengan que hacer muchas mejoras antes de que comience la operación normal. Incluso entonces, se necesitan reparaciones en el periodo inicial, inspección, ajuste y lubricación y limpieza iniciales para evitar el deterioro y las averías son a menudo tan difíciles de reparar que los ingenieros de supervisión se desmoralizan completamente. Como resultado, pueden pasarse por alto la inspección, lubricación y limpieza, lo que necesariamente prolonga las paradas del equipo incluso para las averías menores. Estos problemas de arranque y las mejoras realizadas consiguientemente en el equipo a menudo representan una consecuencia inevitable de finalidades no muy estrictas en las fases de diseño y construcción.

Este fenómeno no tiene porque resultar del incremento en la escala, velocidad y automatización en la producción provocadas por el deseo de ajustarse en los avances a la tecnología; a menudo puede evitarse introduciendo en el equipo las apropiadas condiciones operativas.

La calidad del consiguiente mantenimiento en la producción se determina en gran parte según que la tecnología para asegurar la fiabilidad y mantenibilidad del equipo se haya desarrollado por el staff de ingeniería, diseño y mantenimiento internos a partir de su experiencia directa y esfuerzos concertados o bien sea simplemente una compra en el exterior.

La gestión temprana del equipo se realiza principalmente por el personal de mantenimiento e ingeniería de producción como parte de un enfoque comprensivo de prevención del mantenimiento (MP) y de diseño libre de mantenimiento.

Estas actividades están orientadas a:

- ✓ Lograr los niveles mas elevados posibles dentro de los limites establecidos en la fase de planificación de inversiones en equipo.

- ✓ Reducir el periodo entre el diseño y la operación estable.

- ✓ Progresar eficientemente a través de este periodo, con mínimo trabajo y sin desequilibrios en la carga de tareas.
- ✓ Asegurar que el equipo diseñado está en los niveles mas elevados de fiabilidad, mantenibilidad, operabilidad económica y seguridad.

Trabajando junto con los ingenieros de diseño durante la fase de consolidación para eliminar problemas en la fuente y promoviendo actividades de equipos de proyectos individuales, el staff de ingeniería y mantenimiento puede absorber y aplicar conocimiento sobre el diseño para Mantenimiento Preventivo.

“Commissioning” es la fase de producción posterior a la instalación de los equipos y la realización de las operaciones de prueba; es un tiempo para refinar el equipo para un rápido progreso hasta la operación estable.

Es esencial durante esta fase evitar que las fallas vayan más allá puesto que el “commissioning” es la última oportunidad para detectar y corregir fallos que no se habían previsto. Los fallos frecuentes durante esta fase pueden indicar que se han ignorado las oportunidades tempranas de mejora.

La meta del TPM es maximizar la efectividad del equipo, en otras palabras, perseguir el costo económico del ciclo de vida (LCC). Ciertamente, los costos de

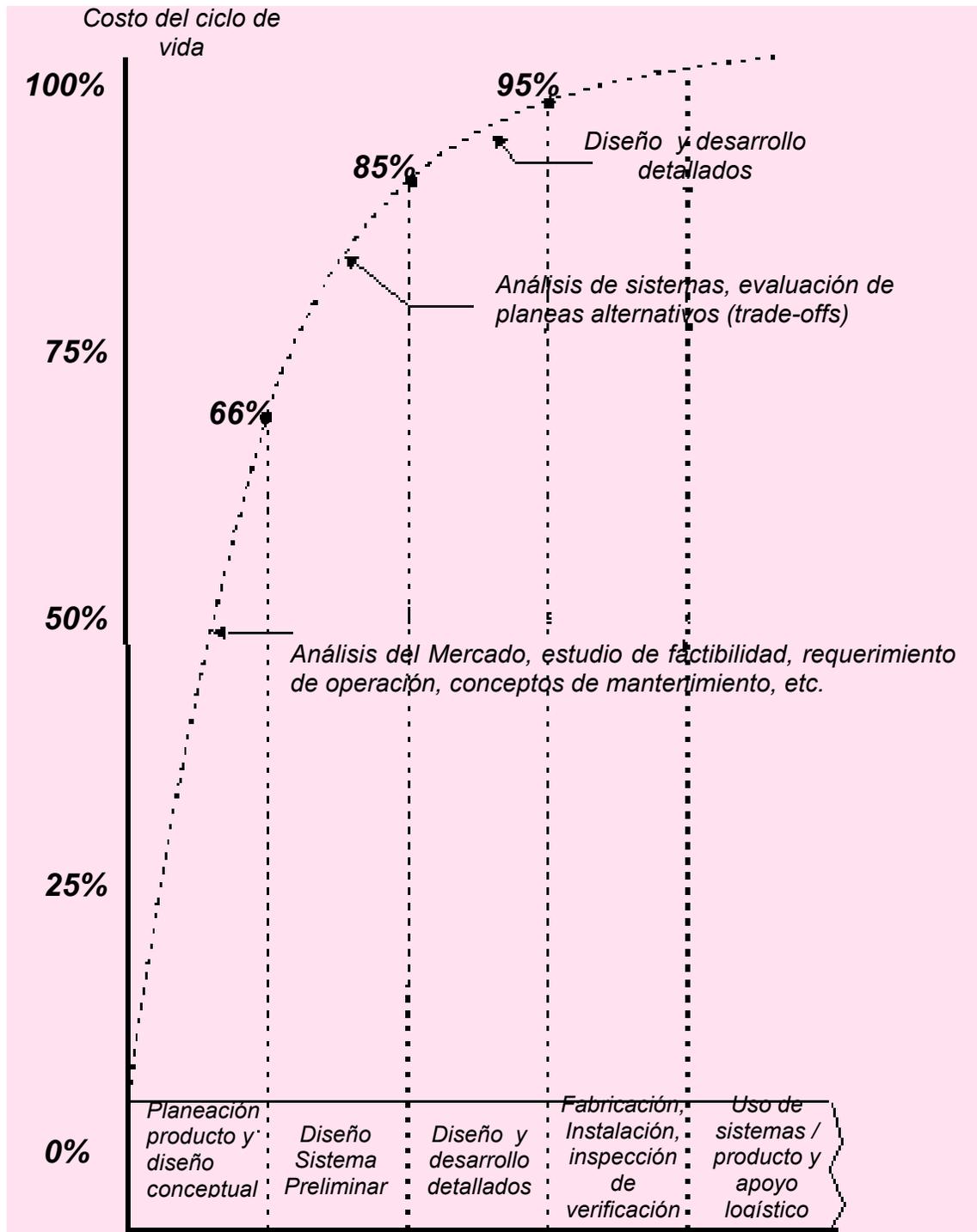
mantenimiento y energía durante la operación están determinados por el diseño original del equipo. (Ver figura 52)

Los esfuerzos para reducir el LCC después de la fase de diseño afectarán solamente al 5% de la cifra global. Las siguientes actividades de mejora pueden tener un impacto positivo en el costo del ciclo de vida:

- Evaluación económica en la fase de inversión del equipo.
- Consideración del MP o diseño de libre mantenimiento y LCC económico.
- Uso efectivo de los datos MP acumulados.
- Actividades de control durante la fase de operación inicial (Commissioning).
- Plenos esfuerzos para maximizar la fiabilidad y la mantenibilidad.

Por tanto, es esencial que los ingenieros del equipo estudien situaciones en las que se haya maximizado la fiabilidad y la mantenibilidad. Esta evaluación debe entonces evaluarse y desarrollarse en estándares tecnológicos de diseño.

FIGURA 52. FACTORES DE NEGOCIOS QUE INFLUENCIAN EL COSTO DEL CICLO DE VIDA*



* Tomado del texto Introducción al TPM. Nakajima Seiichi.

PASO 12. IMPLANTACIÓN PLENA DEL TPM Y CONTEMPLAR METAS MAS ELEVADAS

El paso final en el programa de desarrollo del TPM es perfeccionar la implementación del TPM y fijar metas futuras aún más elevadas. Durante este periodo de estabilización cada uno trabaja continuamente para mejorar los resultados TPM, de forma que puede esperarse que dure algún tiempo.

En este punto, las compañías Japonesas se evalúan para el premio PM. Sin embargo, incluso después de que una compañía recibe el premio PM, la actividad de mejora debe continuar. De acuerdo con un alto directivo de una compañía ganadora del premio, “Esta recompensa no señala que hemos terminado con el TPM, solamente significa que hemos arrancado con un buen pie, esto nos permitirá ensayar aún con más fuerza”.

2.2.6 Beneficios del TPM

| | | |
|--|--|---|
| <p>Organizativos</p> <p>Mejora de calidad del ambiente de trabajo.</p> <p>Mejor control de las operaciones</p> <p>Incremento de la moral del empleado.</p> <p>Crear una cultura de responsabilidad, disciplina y respeto por las normas</p> <p>Aprendizaje muy permanente.</p> <p>Creación de un ambiente donde el participar, colaborar y crear sea una realidad.</p> <p>Dimensionamiento adecuado de la plantilla de todos los empleados. Redes de comunicaciones eficaces.</p> | <p>Seguridad</p> <p>Mejoramiento de las condiciones ambientales.</p> <p>Crear una cultura de prevención de eventos negativos para la salud.</p> <p>Incremento de la capacidad para poder identificar los problemas a la vista potenciales y de buscar las acciones correctivas.</p> <p>Entender el porqué de ciertas normas, en lugar de cómo hacerlo.</p> <p>La prevención y la eliminación de causas potenciales de ocurrencia de accidentes.</p> <p>Eliminar las fuentes de contaminación.</p> | <p>Productividad</p> <p>Eliminar pérdidas que afectan la productividad de las plantas.</p> <p>Mejora de la fiabilidad y disponibilidad de los equipos</p> <p>Reducción de costes de mantenimiento</p> <p>Mejora la calidad del producto final.</p> <p>Menores costos de financiación de los recambios.</p> <p>Mejoramiento de la tecnología existente en la empresa.</p> <p>Aumento significativo de la capacidad para responder a los movimientos del mercado.</p> <p>Crear capacidad competitiva desde la fábrica.</p> |
|--|--|---|

2.2.7 Resumen:

El **TPM** nació en Nippondenso Co., Ltda., una importante empresa proveedora del sector del automóvil. Esta compañía introdujo esta visión de mantenimiento en 1961. La compañía logró grandes resultados de su modelo de mantenimiento a partir de 1969 cuando introdujo sistemas automatizados y de transferencia rápida, los cuales requería alta fiabilidad. El nombre inicial fue "Total member participación PM" abreviado (TPM). Posteriormente el JIPE se transformaría en el Japan Institute of Plant Maintenance (JIPM) organización líder y creadora de los conceptos TPM.

El JIPM ha evolucionado, hoy se reconoce que el TPM ha logrado cubrir todos los aspectos de un negocio. Se conoce como el modelo TPM de tercera generación, donde más que mantener el equipo, se orienta a mejorar la productividad total de una organización. TPM no es aplicar 5S e informatizar la gestión de mantenimiento como algunos creen. El modelo JIPM moderno pretende que una organización sea dirigida dentro del concepto de mantener un uso adecuado de todos los recursos de una organización.

3. HERRAMIENTAS RETROSPECTIVAS (DESPUES)

3.1 ANÁLISIS DE FALLAS BASADOS EN CAUSAS RAÍZ (RCA O RCFA)

DEFINICION DE RCA: El RCA es un riguroso método de solución de problemas, para cualquier tipo de falla, que utiliza la lógica sistemática y un árbol de causa raíz (fallas). Usando la deducción y la verificación de los hechos conducen a las causas originales.

Es una herramienta de la ingeniería de confiabilidad utilizada para determinar hasta tres niveles de causas raíz para cualquier evento específico de falla. Es una técnica de análisis que permite aprender de las fallas y eliminar las causas, en lugar de corregir los síntomas.

CUANDO SE EMPLEA EL RCA:

- ✓ Fallas crónicas (repetitivas): Problema de Mantenimiento y operaciones.

- ✓ Fallas esporádicas una vez: Parada de emergencia, incendio, explosiones, muertes, lesiones importantes, o fallas graves poco frecuentes en los equipos.

- ✓ Oportunidades para identificar las deficiencias en los programas de entrenamiento y procedimientos operativos.

◆ **EN QUE ÁREAS SE EMPLEA EL RCA?**

- ✓ Aspectos de mantenimiento tales como los esfuerzos de reducción de costos en el mantenimiento rutinario o una reducción en la duración y los costos de producción en las instalaciones.
- ✓ Aspectos operativos tales como el descongestionamiento, interrupciones en las operaciones, reducción de uso de energía, reducción de gastos operativos, mejoramiento de calidad y deficiencias en HSE.

◆ **JUSTIFICACION DEL USO DEL RCA?**

El RCA es extremadamente útil y se ha comprobado que funciona en la gran mayoría de gamas de fallas:

- ✓ Recupera más de \$100 por cada \$1 invertido en entrenamiento y en horas hombre comprometidas en una investigación.

- ✓ Identificar y corregir todas las causas raíz de unos problemas iniciales y similares.

◆ **RESULTADOS DE UTILIZAR EL RCA?**

- ✓ Ayuda a reconocer patrones de fallas
- ✓ Reduce la frustración del personal de mantenimiento y operaciones.
- ✓ Mejora las condiciones de seguridad Industrial y ambiental y evita tiempos improductivos innecesarios.

3.1.1 EQUIPO RCA: El RCA es dirigido por un Facilitador, quien ha recibido entrenamiento específico en la metodología RCA. El resto del equipo lo conforman un Grupo Multifunción al que varía entre un problema y otro.

3.1.2 MIEMBROS DEL EQUIPO RCA: El equipo RCA, por lo regular, podrá incluir:

- ✓ Un operador familiarizado con el proceso operativo
- ✓ Moderador o Facilitador (para casos críticos)

- ✓ Un técnico (si se trata de equipos mecánicos eléctricos o de instrumentación)
- ✓ Un supervisor de primera línea.
- ✓ Un ingeniero (químico, eléctrico, mecánico, o de otra especialidad)
- ✓ En ocasiones incluye especialistas tales como metalúrgicos, inspectores, especialista de equipos rotativos o proveedores.
- ✓ Por lo menos una persona que ignora los eventos de fallas y sirve como crítico constructivo o abogado del diablo.
- ✓ La conformación del equipo variará según la falla que se investiga.

3.1.3 CLASIFICACIÓN DE FALLAS: Las fallas se encuentran clasificadas de la siguiente forma:

Fallas Esporádicas: Las fallas esporádicas son una desviación por fuera de un rango aceptable de operación normal. Estos eventos son poco frecuentes y no relacionados entre sí. Es decir, una falla repentina, dramática e inesperada que algunas veces lleva a todo el proceso a detenerse y, con frecuencia es altamente visible dentro de la Unidad de Negocios o de la compañía. Por lo general tiene un costo muy alto. Por lo general se adelanta una investigación formal o informal de la causa. Esto incluye elementos tales como: fugas importantes en el proceso, explosiones, incendios, incidentes ambientales graves, muertes o lesiones graves, y paradas de emergencia en las instalaciones.

Fallas Crónicas: Las fallas crónicas son una desviación dentro de un rango aceptable de operación normal. Estos son eventos frecuentes. Una falla crónica es la falla típica repetitiva que puede afectar las operaciones en el corto plazo o las actividades de mantenimiento pero, no resulta, dramática, no es necesariamente difícil de arreglar (pero puede ser difícil de resolver la causa raíz).

Ejemplo de esto son las fallas que se presentan en los rodamientos, los sellos, las correas, los engranajes, los apagados del sistema de control, problemas con la unidad, etc.

En el nivel de "operación aceptable", se cumple la operación a pesar de estas fallas. Tiene un impacto relativamente bajo. Cuando se totalizan en el transcurso de un año, llegan a un alto porcentaje del presupuesto general de mantenimiento y a la pérdida de ingresos debido a la baja utilización.

Cuando se han resuelto las fallas crónicas (la causa raíz es identificada y eliminada), el nivel de "operación aceptable" comenzará a elevarse. Se reduce el tiempo improductivo y los costos de reparación. La producción total de la instalación aumentará y puede mejorar considerablemente la rentabilidad general.

Fallas crónicas y esporádicas: En una instalación en operación, por lo regular se dedica más tiempo a resolver fallas esporádicas que fallas crónicas. Esto se debe a que:

- Por lo regular, se coloca la falla en un rango aceptable de operación.
- Existe un sentido de reconocimiento en el trabajo.
- Hay retroalimentación inmediata después que se resuelve la falla.

3.1.4 OFFSHORE RELIABILITY DATA: Es un proyecto organizado por 8 compañías petroleras con operaciones en todo el mundo. OREDA recolecta toda la información de datos de confiabilidad de todos los equipos de la industria de gas y petróleo, estos son almacenados en una base de datos para su análisis e información general.

3.1.5 MTBF. MTTR. MTTF

👉 **MTBF: Mean Time Between Failure:**

Es el intervalo del tiempo promedio entre la ocurrencia de una falla y la próxima sobre un equipo dado

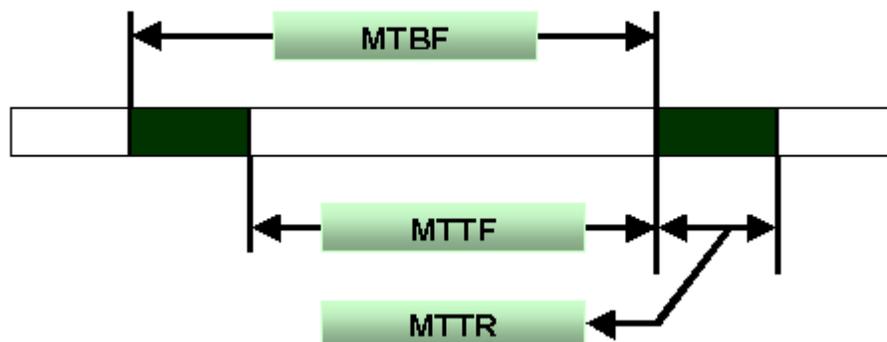
👉 **MTTR: Mean Time To Repair:**

Es el tiempo medio requerido para completar la reparación sobre un equipo dado.

☞ MTTF: Mean Time To Failure:

Es el intervalo de tiempo entre completar la reparación y el inicio de una próxima sobre un equipo dado.

FIGURA 53.MTBF, MTRH, MTTF



3.1.6 PASOS DEL ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ DE LAS FALLAS (RCA):¹³

1. Responder a un incidente y conservar la evidencia.

¹³ www.rcmingeneria.com

2. Organizar el grupo RCFA.
3. Analizar la falla y verificar las causas raíces.
4. Comunicar los resultados.
5. Implementación de seguimiento.
6. Creación del check list.

PASO No.1: RESPONDER A UN INCIDENTE Y CONSERVAR LA EVIDENCIA

Responder:

- ✓ Atender a los resultados del evento de falla.
- ✓ Prioridad, la atención personal lesionado y el poner instalaciones en una condición segura.

Conservar la evidencia;

- ✓ Recoger la evidencia durante y después de una falla.

- ✓ En fallas esporádicas, despejar el área hasta que se haya recogido toda la evidencia, sin iniciar reparaciones hasta que se haya terminado la investigación.

La recolección de las pruebas de fallas crónicas se puede realizar simultáneamente con la realización de las reparaciones, pero se debe organizar apropiadamente.

Es necesario conservar cada una de las siguientes evidencias:

1. Partes
2. Posición
3. Personas
4. Papeles
5. Paradigmas

Para fallas esporádicas:

- ✓ Acordonar el área según lo necesario, de manera que la evidencia no se manipule, no se mueva, "no se pierda " etc.

- ✓ Recoger toda la información conocida.

Para fallas crónicas:

- ✓ La evidencia se debe recoger cuidadosamente
- ✓ Iniciar las reparaciones.
- ✓ Un miembro del equipo investigador debe ser testigo del momento en que se descubre la evidencia siempre que sea posible.

Para fallas crónicas y esporádicas:

➤ **Información de campo:**

- ✓ Fotografiar o filmar en video, siempre que sea posible.
- ✓ Hacer diagramas mostrando lo que se encontró y donde, con orientación y distancias desde un punto fijo de referencia.
- ✓ La ubicación de las válvulas, interruptores, indicadores, personas, equipo, se deben anotar

- ✓ Las condiciones del tiempo y ambientales: iluminación, niveles de ruido y clima.
- ✓ Los aspectos de "orden" también se deben anotar.
- **Información a través de Entrevistas:**
- ✓ Las entrevistas se deben realizar individualmente
- ✓ Entrevistar poco después de que haya ocurrido un evento
- ✓ Entrevistar antes de que los testigos conversen entre ellos.
- ✓ Las entrevistas pueden incluir a los operadores de campo, mecánicos, supervisores, bomberos, etc.
- ✓ Recuerde, la idea no es la de asignar culpas, sino la de determinar lo hechos para el posterior análisis de la causa raíz.

Las entrevistas NO se deben efectuar a título de "cacería de brujas"

➤ **Información de registros de operaciones y mantenimiento:**

- ✓ Tendencias de las condiciones del proceso en el computador (temperaturas, presiones, flujos, niveles)

- ✓ Tendencias de vibración.

- ✓ Las impresiones de las alarmas, los libros de registro, cuadros.

- ✓ Los procedimientos operativos (incluyendo arranque y parada), las instrucciones operativas estándar, las hojas de instrucción diaria, las notas de trabajo.

- ✓ Los planos del sitio, el P&ID o los diagramas de flujo del proceso, los dibujos y procedimientos de montaje del equipo.

- ✓ Los registros de mantenimiento y entrenamiento.

- ✓ Los resultados de prueba de laboratorio, los registros de inspección, etc.

Resumen de recolección de evidencias¹⁴

1. Partes: Rodamientos, Sellos, instrumentos. Motores, bombas, muestras, herramientas, en general todo lo afectado por la falla.
2. Posiciones: Mapa de la posición de los componentes, de los instrumentos, personal en la hora de la ocurrencia, información ambiental, posición física, etc.
3. Personal: Entrevistas al personal de mantenimiento, operaciones, administración, manejo, vendedores, HSE, otros con procesos similares, etc.
4. Papel: Reportes de cuarto de control, metalúrgica, procedimientos, políticas, mantenimiento, planos, especificaciones, entrenamientos, etc.
5. Paradigmas: “No tenemos tiempo para un RCA” “Hemos tratado de resolver esto desde hace 20 años” “Es un equipo viejo y por supuesto falla”. Esto es imposible de resolver” etc.

3.1.7 ORGANIZACIÓN DEL EQUIPO. El Facilitador: Líder del equipo entrenado en la metodología RCA. El Facilitador explicará detalladamente el proceso RCA al equipo, debe comprometerse tiempo completo con el proceso RCA.

¹⁴ www.mundoelectrico.com

La duración de un análisis (horas, días o semanas) normalmente es determinado por el compromiso de tiempo del Facilitador quien además coordinará la redacción del informe final.

Equipo Multidisciplinario de RCA: La conformación del equipo variará dependiendo de la falla que se esté analizando. Un equipo puede variar desde tres a ocho personas, y contar con recursos externos adicionales.

Los miembros del equipo pueden incluir: un operador, técnico, supervisor, ingeniero, metalúrgico, inspector, diversos especialistas, proveedores, etc. Al menos una persona del equipo debe ignorar los eventos de la falla y actuar como crítico constructivo o abogado del diablo, con respecto a una de las teorías y posibilidades que surjan de la tormenta de ideas.

- Se debe promover el pensamiento no encasillado.
- El equipo debe determinar su misión y lo que desea lograr.

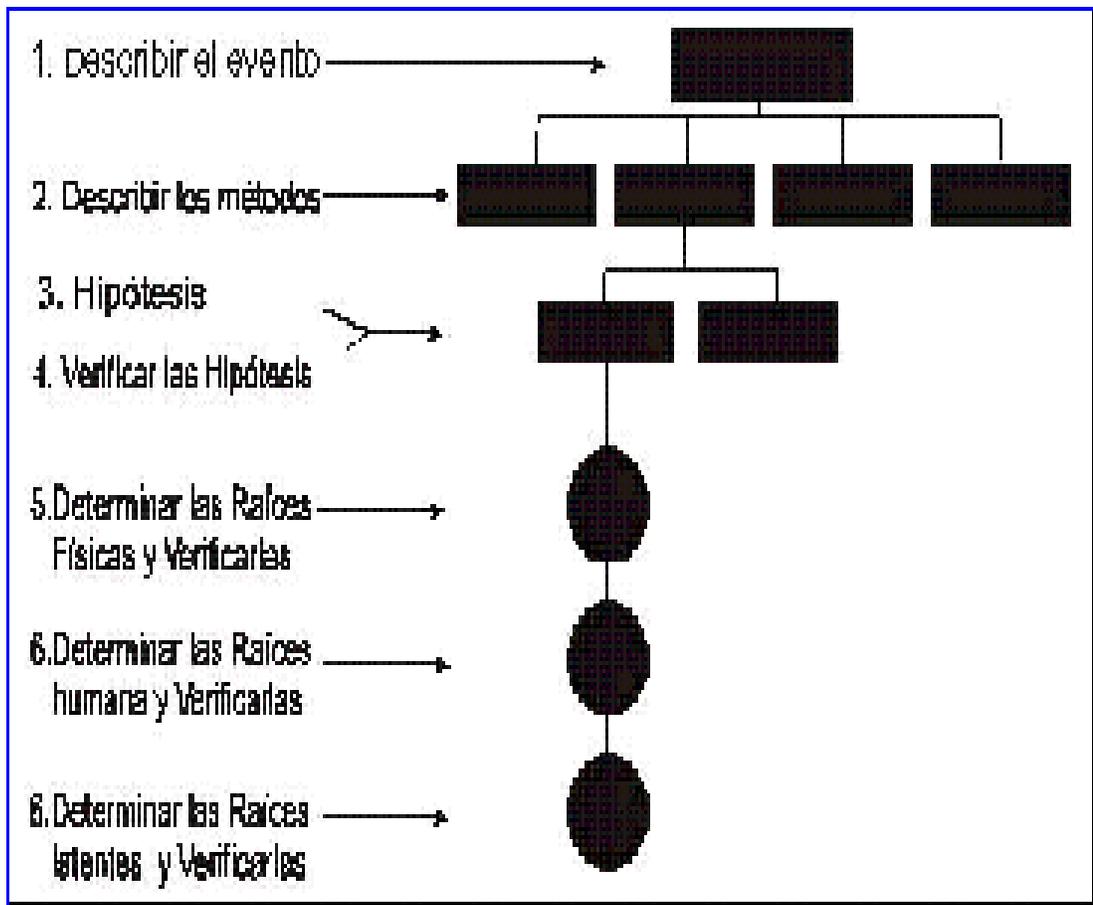
La Sala de Guerra: Cualquier investigación merece una "Sala de Guerra". Se trata de un salón para uso exclusivo del equipo RCA donde podrá recopilar/ evaluar las evidencias, dotado de mesa de conferencia, tableros de marcadores borrables, computador y espacio en la pared para colocar los cuadros de causa raíz lógica.

Este salón dedicado elimina la frustración de constantemente tener que estar entrando y sacando las cosas para otras reuniones o de otros conflictos, además de que elimina la posibilidad de que se pierdan las pruebas.

El equipo se estará reuniendo con frecuencia, asignando responsabilidades para investigación o verificación adicional y regresando para otras reuniones hasta la conclusión de la investigación y de los informes.

3.1.8 ANÁLISIS DE LA FALLA Y VERIFICACIÓN DE LAS CAUSAS RAÍCES: A
 continuación se ilustra mediante la grafica 3 los pasos que se deben desarrollar
 en la investigación de la causa raíz

FIGURA 54. PASOS INVESTIGACION DE LA CAUSA RAIZ



3.1.9 LOS TRES NIVELES DE LA CAUSALIDAD: En este nivel se separan los sistemas de mantenimiento y de proceso.

- ✓ ***Raíces Físicas:*** Causas de los componentes

- ✓ ***Raíces humanas:*** Inapropiada intervención humana

- ✓ ***Raíces Latentes:*** Deficiencia en los sistemas Gerenciales de la Información.

FIGURA 55. EVENTO DE FALLA

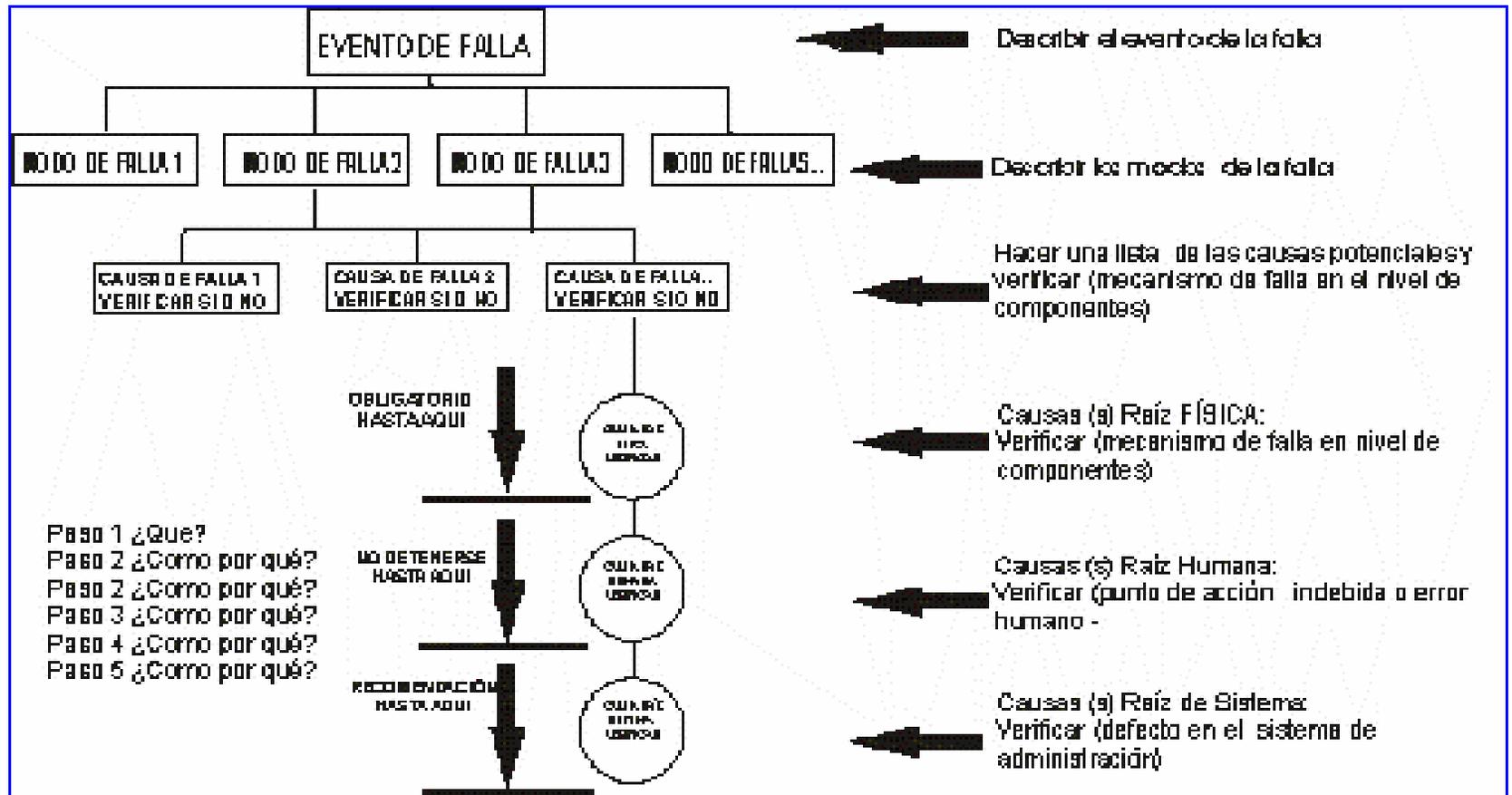
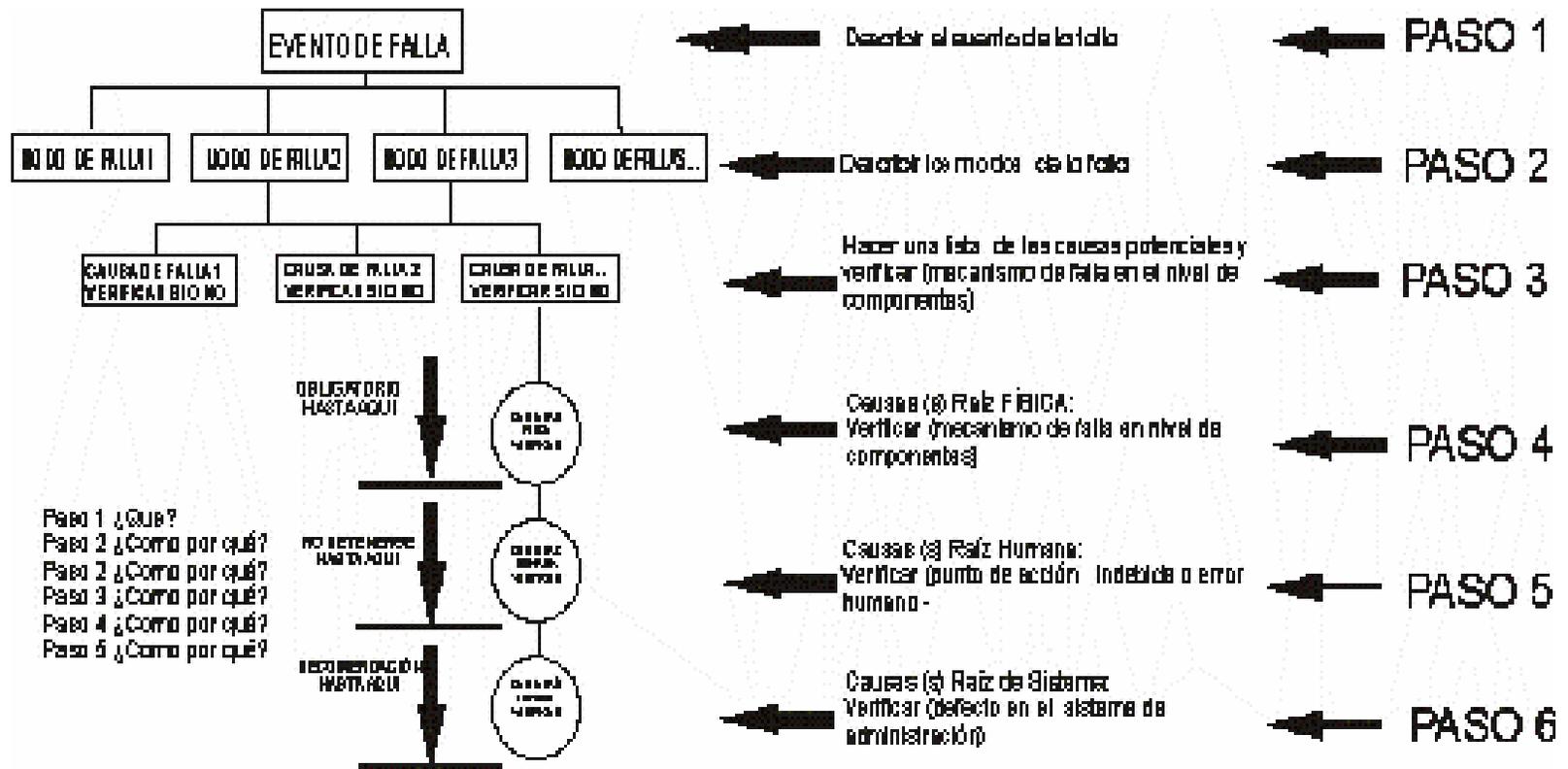


FIGURA 56. ANALISIS DE FALLA



El Análisis de la Falla y Verificación de las Causas Raíces consta de 6 pasos básicos. Los primeros 4 pasos: se realiza la solución inmediata de problemas en los que únicamente se observan los elementos físicos que resultan verdaderos.

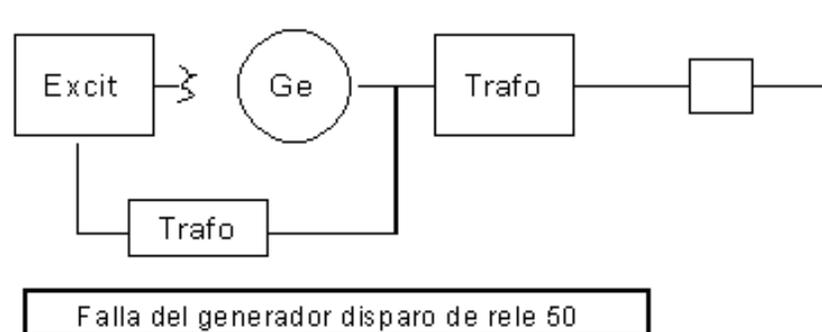
En el 5 paso la solución de problemas depende en gran parte de la forma en que la persona opera y mantiene. El paso 6, son los problemas por deficiencias en las políticas, estándares, normas, procedimientos gerenciales o gubernamentales.

Paso 1: Describir el Evento de la Falla

El Facilitador debe aclararle a un equipo de RCA el alcance del RCA (limites) e identificar los beneficios de seguridad industrial/económicos de resolver el problema. Ejemplo: Falla de un generador de 20 Mws, disparo del relé de protección 50 (instantáneo).

Ejemplo:

FIGURA 57. EJEMPLO FALLA DEL GENERADOR



PASO 2:

Describir los Modos de Falla

Los modos de falla ayudan a definir más a fondo nuestra falla describiendo los modos o síntomas que se observaron como resultado de la falla. Los modos de la falla son los que usted ve. Solamente nos interesan los modos de falla que hayan ocurrido o pudiesen haber ocurrido y ser la causa del problema, no aquellos que no tienen nada que ver con éste. Analícese más a fondo el cómo y el por qué de las causas que se presentaron (Ver Figura 58 y 59). Mediante una tormenta de ideas, el equipo determina los aspectos fundamentales que pueden presentarse para que un generador falle.

FIGURA 58. DESCRIBIR MODOS DE FALLA DEL GENERADOR

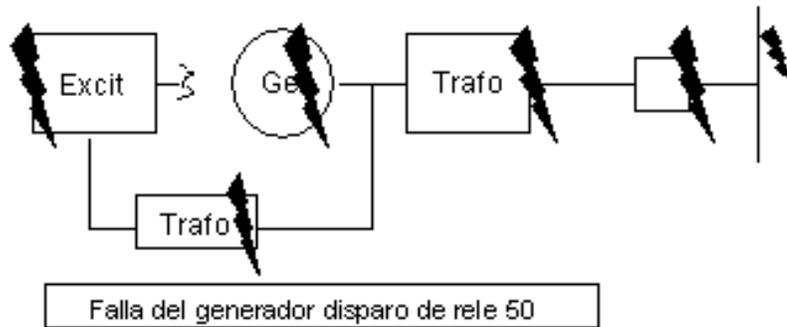
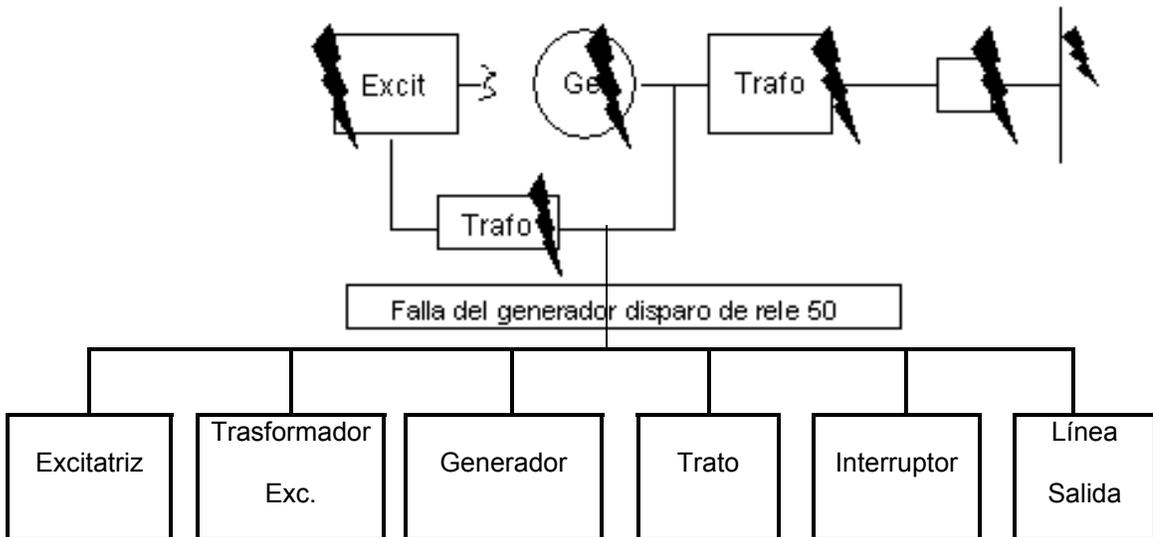
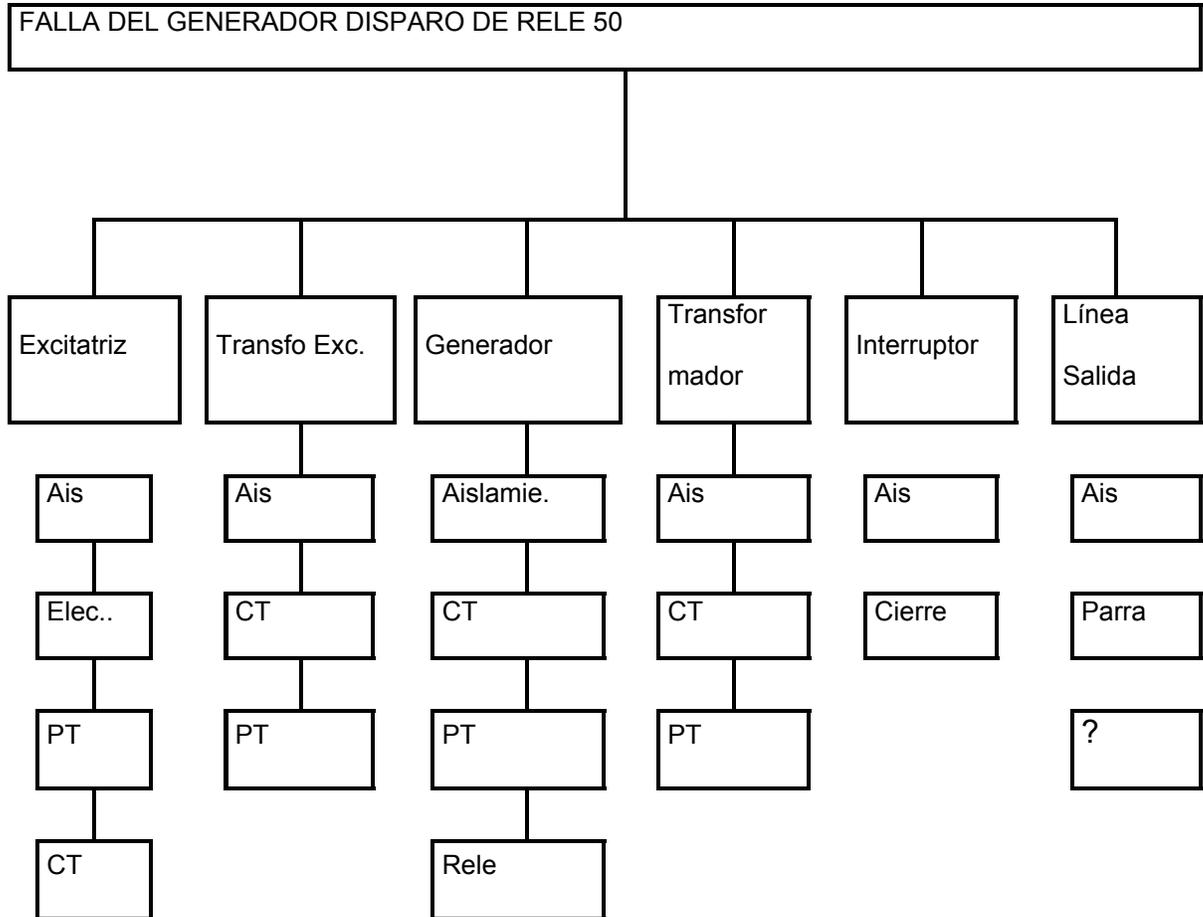


FIGURA 59. CAUSAS DE MODOS DE FALLA DEL GENERADOR



PASO 3: Tormenta Ideas sobre Causas de la Falla: A continuación se ilustra mediante la gráfica 60, la tormenta de ideas realizada para la falla del generador.

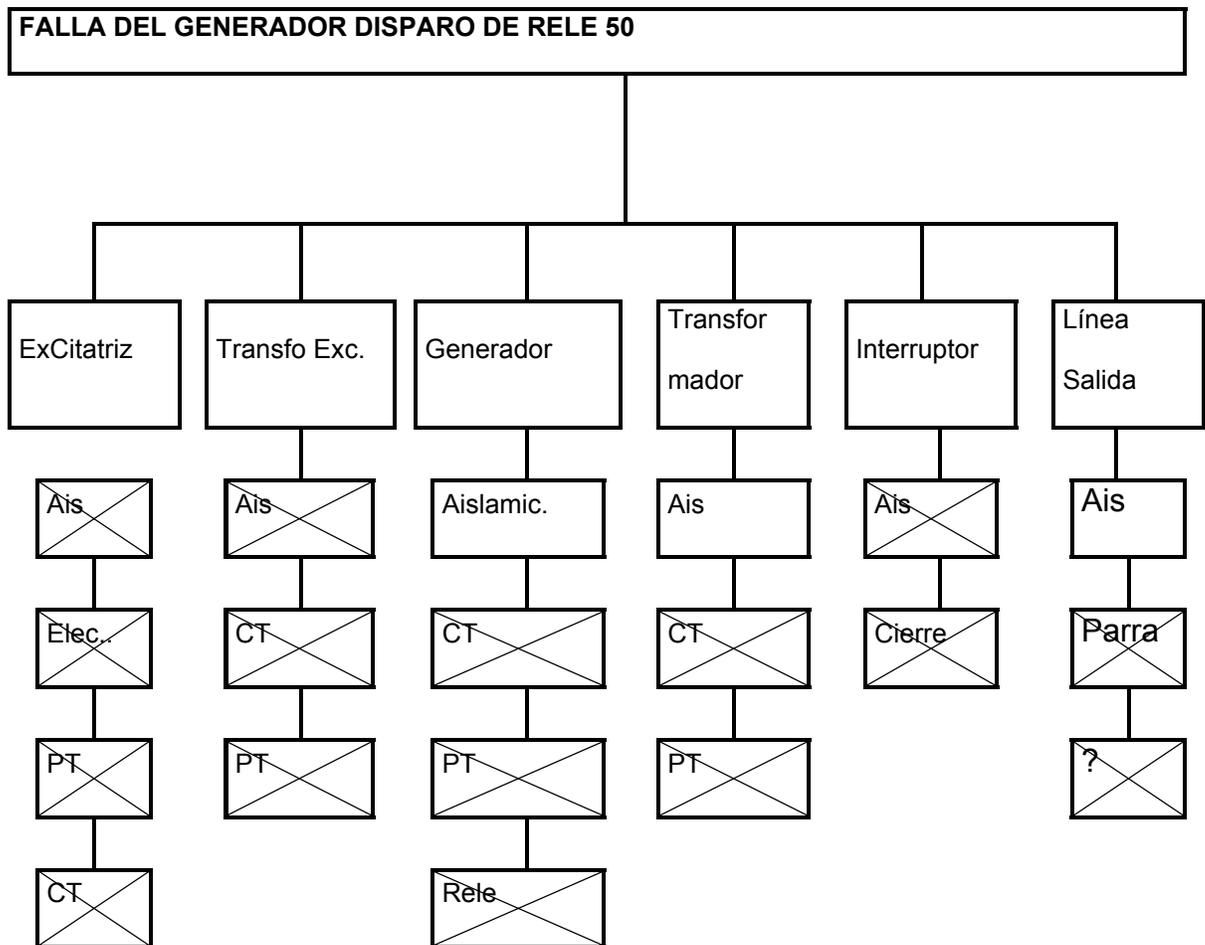
FIGURA 60. TORMENTA DE IDEAS FALLA DEL GENERADOR



Las preguntas para realizar éste diagrama son deben ser consistentes, algunas de ellas son: ¿Cómo pudo ocurrir la falla?, ¿Por qué ocurrió?, entre otras. El éxito de la tormenta de ideas está en buscar e identificar muy bien la falla. Se han identificado 4 agentes posibles de falla: fuerza, tiempo, temperatura y reacción al medio ambiente. Teniendo en cuenta éstas, se podrá obtener un mejor resultado de la tormenta de ideas.

Paso 3A: Verificar Causas de la Falla: A continuación la Figura 61 nos ilustra la verificación.

FIGURA 61. VERIFICACIÓN DE CAUSAS DE FALLA DEL GENERADOR



Después de terminar la tormenta de ideas y la evidencia que se ya se haya recopilado en el campo se compara con causa potencial o se reúne evidencia

adicional según la necesidad y se van tachando punto a medida que se compruebe que son falsos.

Notas de Verificación

Buscar evidencia con hechos que soporten/verifiquen o desapruében cada causa potencial. De lo contrario, incluir "sin evidencia" o "no se puede probar" y a asignarle una probabilidad de que ésta sea la causa.

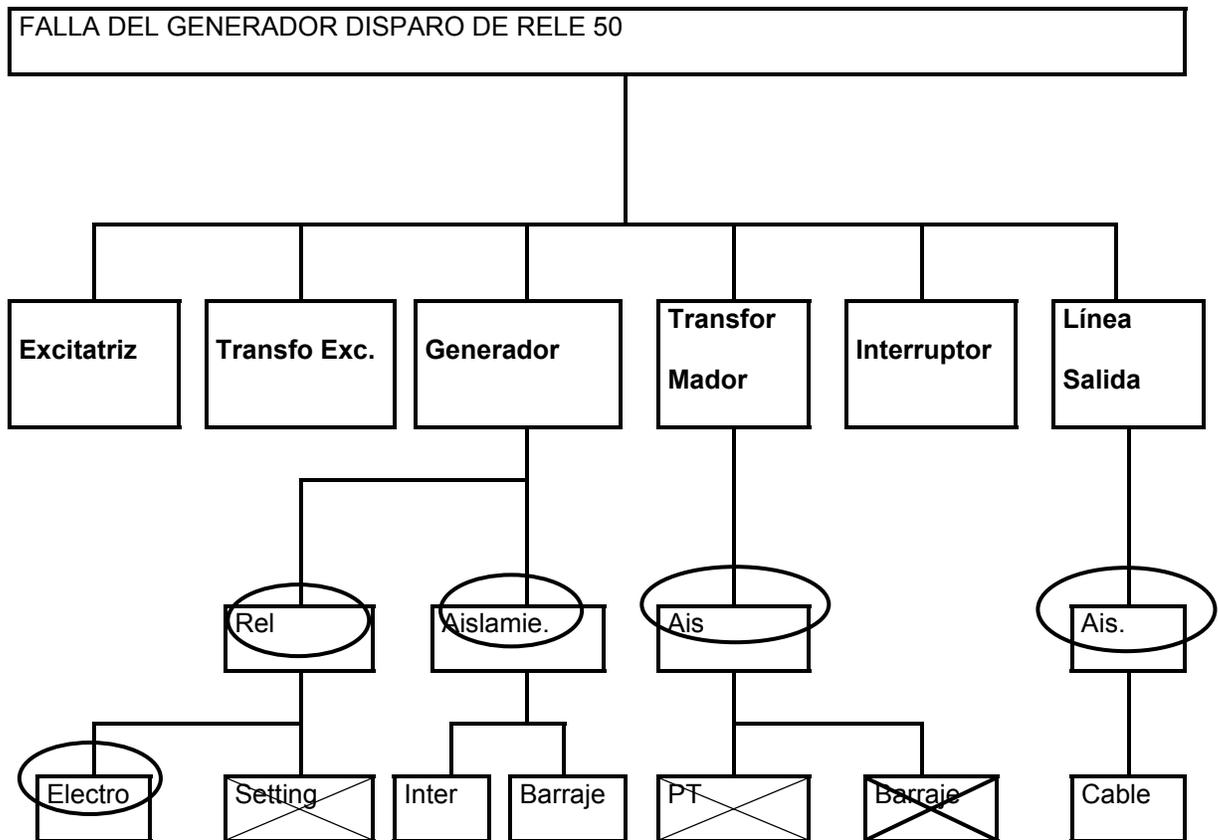
Los métodos de verificación pueden incluir; Observación Visual - Fotografía, cámaras de vídeo, luces estroboscópicas, Observación humana, Evaluación No-Destructiva, como: Técnicas de inspección con ultrasonido, rayos X, infrarrojos, ferrografía (análisis de aceite), metalografía in-situ (remoción y análisis de metal), microscopía electrónica de scanner, análisis de esfuerzo, vibración muestreo en laboratorio de fluido o gas, etc.

Análisis de Datos -Tendencias, análisis de vibración, modelación, análisis de elementos finitos, análisis del espectro etc.

Algunos de los miembros del equipo pueden tener a su disposición estas especialidades. A otros se les puede asignar que coordinen con los proveedores o especialistas. El Facilitador puede asumir algunas de estas funciones.

Paso 4: Determinar la Causa Raíz Física y Verificarla: La figura 62 nos lo ilustra.

FIGURA 62. DETERMINACIÓN CAUSA RAÍZ FÍSICA.



Cuando el equipo ha realizado el último grupo de causas potenciales y ha verificado la evidencia a nivel de componente, han llegado a la Causa Raíz Física de la falla.

Dependiendo de lo crítica que sea la falla se puede continuar con los Pasos 5 y 6.

En el paso 5 no se debe detener (La causa raíz humana), pues afecta la disciplina del empleado y afecta futuros RCFA.

En el paso 6 (Causa Raíz del Sistema): Continuar con el proceso a través de la(s) causa(s) raíz latente(s), puesto que la determinación de dichas causas puede eliminar una serie de fallas similares que se consideraban no relacionadas.

Paso 5: Determinar la Causa Raíz Humana y Verificar:

La Causa Raíz Humana es el error humano:

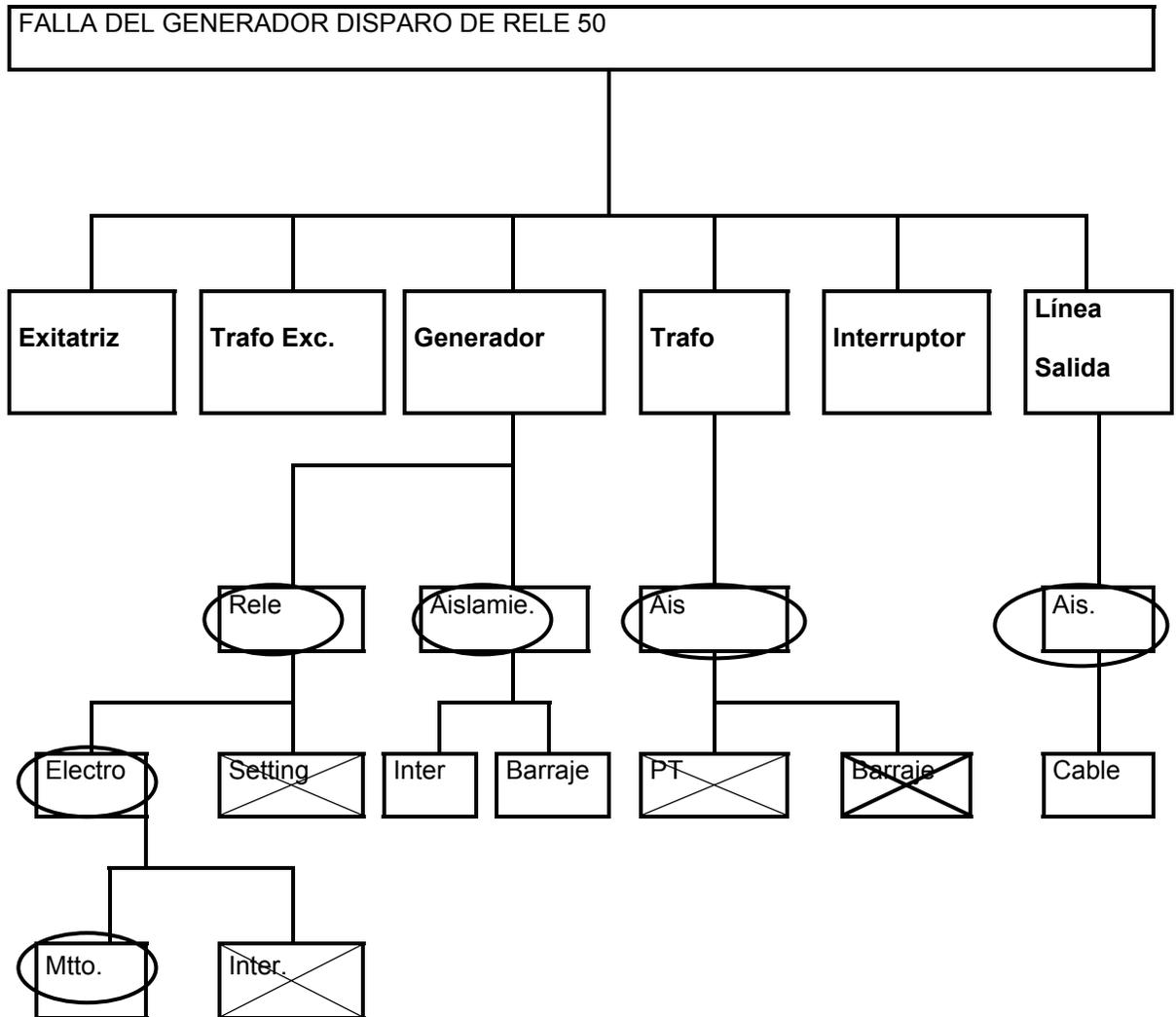
- Falla en observar guías o procedimientos.
- Tomar atajos en las tareas.
- Deficiencias en las comunicaciones, ejemplo, durante las entregas de turno.
- Estrés.

Se debe aclarar que determinar la causa raíz humana no se trata de una “cacería de brujas” o de culpar a nadie sino corregir las deficiencias y prevenir que vuelva a ocurrir. El buscar a una persona que haya podido “causar” este incidente en particular, no es el objetivo de ésta parte de la investigación.

En el ejemplo que hemos estado analizando, el equipo encontró al operario de la reparación anterior a través de los registros del sistema computarizado de manejo de mantenimiento. Mediante una entrevista se verificaron los hechos tal como se muestra a continuación en la figura 63.

Se enfatizó durante la entrevista que no era la intención asignar culpas o medidas disciplinarias, sino corregir y prevenir. Por ello, es importante que se pregunte cómo y por qué pudo haber ocurrido esto.

FIGURA 63. DETERMINACIÓN CAUSA RAÍZ HUMANA



PASO 6: Determinar la causa Raíz Latente y verificar: Detrás de la mayoría de los errores humanos existe un sistema defectuoso o un aspecto cultural de las instalaciones, como falta de:

- Programas de Capacitación.
- Entrenamiento
- El mantenimiento o los procedimientos
- Reglas, políticas y guías de seguridad industrial/medio ambiente

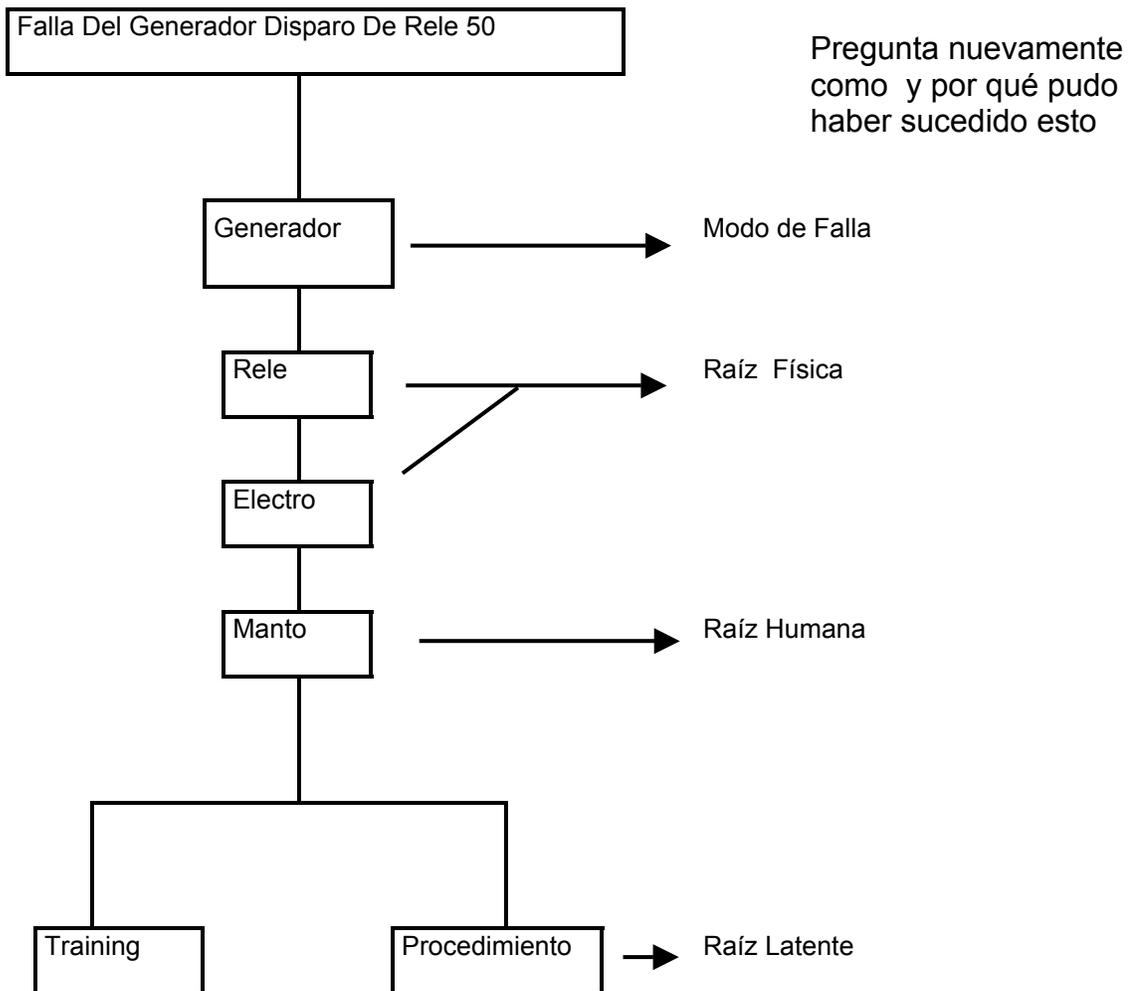
Si se tolera una cultura en la que se ignoran los procedimientos, aunque haya una política establecida, esto también es un problema del sistema.

Ahora se analizan de las causas específicas a las generales. Este es el punto en el cual un mayor análisis puede ser algo político debido a que los sistemas administrativos son algo menos perfectos. En este paso, el razonamiento inductivo comienza y termina con el razonamiento deductivo.

El detectar y modificar los problemas en el sistema de manejo no solamente evitan que vuelva a ocurrir una sola falla, sino que posiblemente evitará una serie de otras fallas.

Paso 6: Determinar la Causa Raíz Latente y Verificar: En la Figura 64 se ilustra.

FIGURA 64. DETERMINACIÓN CAUSA RAIZ LATENTE



En las instalaciones del ejemplo no se contaba con procedimientos de mantenimiento, ni de un entrenamiento apropiado.

Una falla en esta área podría haber sido mucho más severa, con riesgos de seguridad ambientales y económicos mucho más altos.

El propósito de este ejemplo es mostrar que el equipo puede tropezar con varios problemas de consideración, en los sistemas administrativos, de los cuales la falla que se está analizando puede ser solamente la punta de Iceberg.

3.1.10 Comunicación de los Resultados: Comunicar los resultados ha constituido el paso esencial al documentar los hallazgos en las investigaciones de RCA y las recomendaciones asociadas con ello. Estos hallazgos se deben analizar con el personal apropiado y pueden requerir de reuniones con la gerencia.

Las recomendaciones deben hacerse con un informe formal, que por lo general ayuda a obtener compromiso de la gerencia y a resolver las fallas, concentrándose en las causas raíz determinadas en la investigación.

El costo de implementar los resultados se debe sopesar frente al costo de la falla.

Los informes altamente técnicos deben incluir un resumen ejecutivo y un informe detallado con:

- La definición de la falla utilizada en el análisis.
- Una breve explicación de los principales factores que contribuyeron (modos y causas) y que condujeron a las causas raíz físicas humanas y del sistema.
- Las recomendaciones para cada una de las causas raíz físicas, humanas y del sistema que eliminarán o reducirán las consecuencias de la falla.
- El costo por año de la falla y el costo de implementación.
- Este informe debe estar firmado por el equipo de RCA y el facilitador.
- La definición de la falla utilizada en el análisis.
- Un diagrama del árbol de fallas completo de RCA.
- Una explicación completa de los modos y causas que se consideraron y como la evidencia respaldó o desaprobó los modos y las causas. También debe incluir información adicional sobre cada una de las causas raíz.
- Fotografías, diagramas o dibujos para demostrar claramente "qué falló. Esto puede incluir ampliaciones de fotos microscópicas de una falla metalúrgica, fotos polaroid, diagramas de proceso e instrumentación, etc.
- Recomendaciones o elementos de acción para cada una de las causas raíz físicas, humanas y del sistema (y según sea necesario, de cualquier causa intermedia).
- Un análisis de costos detallado.
- Un plan de implementación detallado, incluyendo quién está asignado a qué tareas, y las fechas objetivo o marcos de tiempo para su completamiento.

Se puede realizar un análisis de resultados y recomendaciones con la gerencia de las instalaciones en el cual también se puede incluir a personal de ingeniería, seguridad industrial u otros, para permitir así el compromiso de la gerencia con la implementación.

La reunión se debe celebrar en una hora o menos, con un período final de preguntas y repuestas. Se deben emplear fotografías. Diagramas, etc., Según la necesidad, a fin de presentar una imagen clara de las causas raíz del problema así como de las recomendaciones (en orden de prioridad según el costo/valor).

También se deben preparar para esta reunión la asignación de tareas y las fechas estimadas para su implementación.

3.1.11 CREACIÓN DE LISTA DE CHEQUEO: Diagnóstico basado en el RCA

- Procedimiento paso a paso del análisis de la falla

- Hoja de seguimiento fácil para el diagnóstico.

- Herramienta de trabajo para generalizar una falta y multiplicar el conocimiento entre los técnicos para atender fallas.

3.1.12 IMPLEMENTACIÓN DEL SEGUIMIENTO: Las recomendaciones se deben implementar de manera que resulte efectivo el mejoramiento continuo; Esto implica proacción en lugar de reacción ante la próxima falta.

El seguimiento de los resultados es por lo general el aspecto más ignorado en el proceso RCA y es uno de los más importantes. Los sistemas de seguimiento se deben colocar en sitio visible e incluir puntos tales como;

- Lista de recomendaciones que hayan sido aprobadas.
- Listas de personas asignadas a cada punto de acción.
- Mostrar las fechas estimadas de complementación y su estado actual.
- Publicar los éxitos y mostrar los ahorros netos.
- Buscar un campeón (preferiblemente un miembro influyente de la gerencia) quien asegure que se retiren los obstáculos del camino con miras al éxito de un programa RCA.

3.1.13 FAILURE TRACKING SISTEM (SISTEMA DE SEGUIMIENTO DE ANÁLISIS):

Su objetivo es tener control de las acciones establecidas en los diferentes análisis de falla realizados por medio de un seguimiento y comentarios de su implementación y/o ejecución.

El FTS, **Failure Tracking System** o Sistema de Seguimiento de Análisis de fallas nos ayuda a realizar el seguimiento de las diferentes acciones y recomendaciones de cada análisis de falla, así como el costo de la implementación de dichas recomendaciones y nos ayuda a llevar un registro histórico.

Al finalizar un análisis de en acciones correctivas y/o preventivas deben ser cargadas en el programa de FTS.

Además, semanalmente se debe hacer un seguimiento a las tareas y acciones establecidas en los diferentes análisis de falla.

3.1.14 CONCLUSIONES

El éxito del método del análisis costo-Efectividad de un RCA es buscar e identificar muy bien la falla. Se han identificado 4 agentes posibles de fallas:

1. Fuerza.
2. Reacción al Medio Ambiente.
3. Tiempo
4. Temperatura.

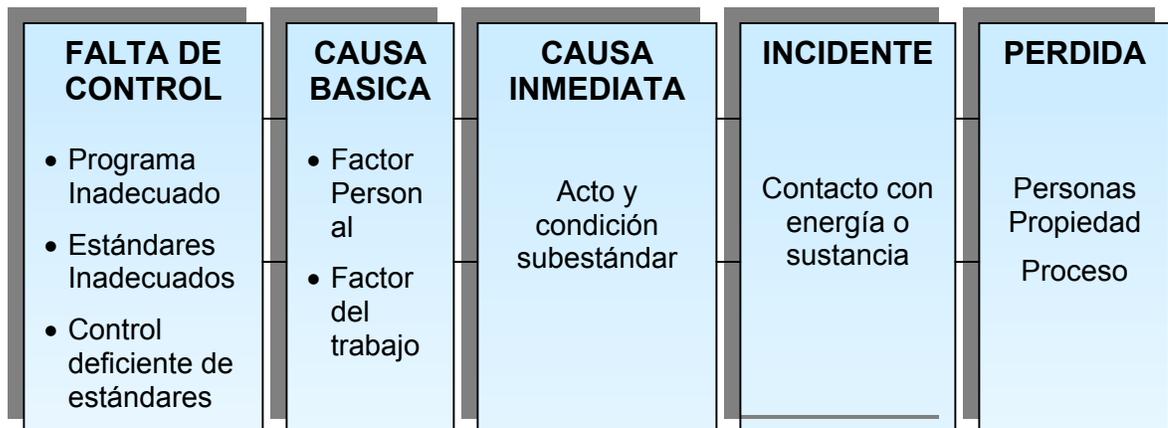
Es importante reconocer que un componente puede fallar debido a un sola falla o a una combinación los 4 agentes que pueden tener las siguientes divisiones según las causas:

1. Falla por diseño.
2. Defecto en los materiales.
3. Fabricación y/o error del proceso.
4. Ensamble o defecto de instalación.
5. Fuera de diseño o condiciones de servicio sin planeación.
6. Deficiencias en el mantenimiento.
7. Operaciones Inapropiadas

3.2 MODELOS DE CAUSALIDADES DE PERDIDAS

Durante los últimos años, se han incorporado numerosos modelos de casualidad de acciones y pérdidas. Un gran porcentaje de estos modelos son complejos y difíciles de comprender y de recordar. El modelo de casualidad de pérdida, que se observa en la figura 65, además de ser relativamente simple, contiene los puntos de claves necesarios, que le permite al usuario comprender y recordar los pocos hechos críticos de importancia para el control de la gran mayoría de los accidentes y de los problemas de administración y de pérdida. Se encuentran actualizados y es consciente con lo que los líderes de control de pérdida alrededor del mundo están expresando acerca de pérdida y accidentes. El tener presente los pocos puntos críticos que se ilustran en el modelo, le permitirá al usuario recordar muchos de los detalles que se presentan a través de este libro.

FIGURA 65. EL MODELO DE CAUSALIDAD DE PERDIDAS DE ILCI



3.2.1 Pérdida: El resultado de un accidente es “pérdida”. Tal como lo hemos expresado en nuestra definición de accidente, las pérdidas más obvias son el daño a las personas, a la propiedad o al proceso. Las “interrupciones del trabajo” y la “reducción de las utilidades”, se consideran como pérdidas implícitas de importancia. Por lo tanto, nos encontramos con pérdidas que involucran a personas, propiedades, procesos y, en última instancia las utilidades.

Una vez que se ha producido la secuencia, el tipo y el grado de la pérdida es, en cierto modo, una cuestión de suerte. El efecto puede fluctuar desde un acontecimiento insignificante a uno catastrófico, de una simple magulladura o abolladura, hasta numerosas muertes o la pérdida de una planta. El tipo y el grado de la pérdida dependen, en parte, de circunstancias fortuitas y, en parte de las medidas que se tomen para minimizar la pérdida. Las acciones para minimizar la pérdida en esta etapa de la secuencia, incluye los cuidados oportunos y adecuados de primeros auxilios y atención médica, un rápido y efectivo control de fuego, la oportuna reparación del equipo e instalaciones dañadas, la aplicación eficiente de los planes de acción frente a las emergencias y de una efectiva rehabilitación de las personas de reintegrarse al trabajo.

No existe de hecho mayor trascendencia o más dramático que los aspectos humanos derivados de la pérdida accidental: lesióne, dolor, pena, angustia, pérdidas de miembros o funciones del cuerpo, enfermedades ocupacionales,

incapacidad, muerte. La manera más efectiva que se dispone para minimizarlos es haciendo uso tanto de los aspectos humanos, como de los económicos, para motivar el control de los accidentes que dan origen a las pérdidas.

Ya sea que la gente resulte herida o no, los accidentes cuestan dinero...¡y mucho! Y los costos de lesiones o enfermedades son solo una parte relativamente pequeña de los costos totales.

El ejecutivo consciente y preocupado por los costos, no toma esta información a la ligera. Si bien es cierto que los costos relacionados con las lesiones, ubicados en la cima del iceberg, pueden ser significativos deteriorados de las utilidades, su importancia se ve empeñada al compararlos con los costos que se grafican bajo la superficie y que se ven aumentados, por lo menos, de seis a cincuenta y tres veces más. Cualquier organización que calcula el costo de sus pérdidas debidas a los accidentes, solo en términos de lesiones y enfermedades ocupacionales, se encontrará contemplando tan solo 1/5 a 1/50 de los costos posibles de identificar.

En la figura 66 se relata la importancia y el potencial que se posee para mejorar las utilidades a través del control de pérdidas. Agregue a esto, el recurso más importante, que lo constituye el factor humano y usted contará con los dos aspectos más fundamentales del mundo: la protección de las utilidades, los procesos, de la propiedad y de su GENTE. Esta es la razón del porque es tan

necesario comprender y hacer uso de la secuencia de causa y efecto de los accidentes.

FIGURA 66. GARANTÍAS DE LA ADMINISTRACIÓN

1

Todo trabajador se haya sometido a una revisión inicial completa de todos los reglamentos relacionados con su trabajo y que los haya llegado a conocer y comprender bien. También deberá asegurar que se practique en forma anual una revisión completa de todos los estándares con cada trabajador, y que se adoptarán todas las medidas necesarias para garantizar el cumplimiento de todos estos estándares.

2

Cualquier acto o condición insegura reportada por algún trabajador, se registre de inmediato en el sistema de información de peligros y con prontitud se adopten las medidas pertinentes. Efectuará y anotará los resultados de una inspección formal de toda el área física de la planta que este bajo su responsabilidad, a lo menos, una vez cada dos meses y desarrollará un sistema para asegurarse que todas las partes críticas que se encuentran en esta área, sean inspeccionadas de acuerdo a las necesidades y requerimientos correspondientes.

3

Todo trabajador reciba instrucciones de trabajo adecuadas y bien planificadas con cada trabajo nuevo o diferente que se le asigne y que, con regularidad, se le ofrezcan consejos de seguridad en forma diaria, durante los contactos rutinarios.

4

El trabajador nuevo reciba un entrenamiento de su trabajo, en todos los aspectos referidos a la seguridad y eficiencia, antes que inicie su trabajo... y que se le practiquen seguimiento durante su periodo de prueba, para asegurarse que domina los procedimientos y que cumple con todos los estándares que se exigen.

5

El trabajador bajo su dirección, asista a reunión semanal de seguridad, que es planeada y dirigida por el funcionario respectivo.

6

Todos los trabajadores comprendan y practiquen los principios de orden, limpieza y que el “orden” de su área de responsabilidad, refleje, en todo momento, esta meta deseada.

7

A todos los trabajadores se les proporcionen los equipos adecuados de protección personal y que se les motive a usarlos en todo momento, de acuerdo a lo estipulado en los reglamentos.

8

Todo accidente que dé como resultado lesión personal o daño a la propiedad, sea prontamente investigado y que los resultados sean reportados en el formato respectivo de informe del supervisor, antes que finalice el turno en el cual ocurrió el accidente.

9

Todo trabajador a su cargo, reciba en forma personal, el reconocimiento por su trabajo, cuando demuestre un comportamiento seguro y deseado... y que este refleje, el entusiasmo personal del supervisor y su interés constante y profundo, por la seguridad y bienestar de sus trabajadores.

10

Su ejemplo personal de comportamiento seguro, se constituya en el mejor modelo de conducta a seguir para todos.

3.2.2 Incidente / Contacto: Este es el suceso anterior a la “pérdida” el contacto que podría causar o que causa la lesión o daño. Cuando se permite que existan las causas potenciales de accidentes, queda siempre abierto el camino para el contacto con una fuente de energía por encima de la capacidad límite del cuerpo o estructura. A modo de ejemplo, un objeto que cae o en movimiento, implica una energía cinética que se transfiere al cuerpo o estructura que golpea o toca. Si la cantidad de energía transferida es excesiva, logra causar daños personales o daño de la propiedad. Esto no solo se produce debido a la energía cinética, sino también debido a: la energía eléctrica, la acústica, la térmica, la radioactiva y la energía química.

A continuación se ofrecen algunos de los tipos mas comunes de transferencia de energía, de acuerdo a un listado proporcionado por el American Standard Accident classification Code (Código americano de clasificación estándar de los accidentes ANSIZ16.2-Rev.1962, 1969).

- Golpear contra (corriendo hacia o tropezando con)
- Golpeando por (objeto en movimiento)
- Caída a distinto nivel (ya sea que el cuerpo caiga o que caiga el objeto y golpee el cuerpo)
- Caída al mismo nivel (resbalar y caer, volcarse)

- Atrapado por (puntos filosos o cortantes).
- Atrapado en (agarrado, colgado)
- Atrapado entre (aplastado o amputado)
- Contacto con (electricidad, calor, frío, radiación, substancia cáustica, substancia tóxica, ruido).
- Sobretension / sobreesfuerzo/ sobrecargo.

Tal como se discutirá con más detalle, el considerar el accidente en términos de un contacto e intercambio de energía, ayuda a enfocar el pensamiento hacia los medios de control. Es posible tomar medidas de control que alteren o absorban la energía, con le propósito de minimizar el perjuicio o le daño que se pueda producir en el momento y punto de contacto. Los equipos de protección social y los resguardos de protección, corresponden a ejemplos comunes. Un casco por ejemplo, no evita el contacto con un objeto que cae pero puede absorber y/o desviar parte de la energía y así prevenir o minimizar el daño. Otras medidas de control en la etapa de contacto, incluyen el reemplazo de una substancia por un producto menos dañino o un solvente menos volátil; la reducción de la cantidad de energía liberada, como por ejemplo, el hacer correr el agua de la ducha a una temperatura por bajo del nivel que produce quemaduras o el instalar reguladores automáticos en los motores para limitar su velocidad; el modificar una superficie peligrosa redondeando los bordes agudos o acolchando los puntos de contacto; y,

reforzando el objeto (ya sea columna, la superficie de carga de los camiones, el piso) o el cuerpo (los músculos) son formas que logran un limite de capacidad critica mucho mayor.

Cuando se permite que existan condiciones subestándares (tales como: maquinas o herramientas desprotegidas) o cuando se permiten los actos subestándares (como en la limpieza con gasolina), existen siempre la posibilidad de contactos e intercambios de energía que dañan a las personas,, ala propiedad y/o al proceso.

3.2.3 Causas Inmediatas: Las causas inmediatas de los accidentes, son las circunstancias que se presentan justamente ANTES del contacto. Por lo general, son observables o se hacen sentir. Con frecuencia se les denomina “Actos Inseguros” (o comportamientos que podrían dar paso a la ocurrencia de un accidente) y “condiciones inseguras” (o circunstancias que podrían dar paso a la ocurrencia de un accidente).

Los ejecutivos modernos tienden a pensar de una manera más amplia y de un modo más profesional, empleando los términos de “actos subestándares” y “condiciones subestándares” (desviaciones a partir de un estándar o procedimiento aceptado). Esta línea de pensamiento tiene ventajas claras:

1. Relaciona las prácticas y las condiciones con un estándar, lo que permite una base para la medición, la evaluación y las correcciones.

2. Disminuye, en cierto modo, el estigma acusador del concepto “acto inseguro”.
3. Aumenta el campo de interés, que se amplía de un control de los “accidentes”, a un control de las pérdidas, incluyendo la seguridad, la calidad, la producción y el control de costos.

Algunas personas apoyan la sustitución de la palabra error para identificar la responsabilidad que le cabe a la administración. Existe una amplia investigación e información para eliminar el concepto de error en la investigación del control de calidad, que gana cada día mayor uso en las administraciones de las pérdidas. Pero, el termino “error”, por lo general, se malinterpreta como “culpabilidad”. Todos saben que el sentido de culpabilidad lleva a adoptar un comportamiento defensivo y de esta manera los problemas de seguridad se terminan por encubrir en vez de ser resueltos. También, un creciente número de lideres en seguridad, confirman los resultados de las investigaciones en control de calidad donde el 80% de los errores que comete la gente (actos inseguros / subestándares), son el resultado de factores sobre los cuales sólo la administración puede ejercer un control. Este importante hallazgo, otorga una dirección completamente nueva de control al concepto, que se ha mantenido por largo tiempo respecto a que del 85% al 96% de los accidentes son el resultado de actos inseguros o fallas de las personas. Esta nueva manera de pensar, estimula al ejecutivo progresista a reflexionar en la forma como el sistema administrativo puede influir sobre el comportamiento

humano, en vez de destacar los actos inseguros de la gente. Es así como el concepto subestándar aparece como más aceptable, más útil y más profesional.

Los actos y condiciones subestándares por lo general se manifiestan de una o más de las siguientes formas:

➤ **ACTOS SUBESTÁNDARES**

1. Operar equipos sin autorización.
2. No señalar o advertir.
3. Falla en asegurar adecuadamente.
4. Operar a velocidad inadecuada.
5. Poner fuera de servicio los dispositivos de seguridad.
6. Eliminar los dispositivos de seguridad.
7. Usar equipo defectuoso.
8. Usar los equipos de manera incorrecta.
9. Emplear en forma inadecuada o no usar el equipo de protección personal.
10. Instalar carga de manera incorrecta.
11. Almacenar de manera incorrecta.
12. Levantar objetos en forma incorrecta.
13. Adoptar una posición inadecuada para hacer la tarea.

14. Realizar los mantenimientos de los equipos mientras se encuentran operando.
15. Hacer bromas pesadas.
16. Trabajar bajo la influencia del alcohol y/u otras drogas.

➤ **CONDICIONES SUBESTÁNDARES**

1. Protecciones y resguardos inadecuados.
2. Equipos de protección inadecuados o insuficientes.
3. Herramientas, equipos o materiales defectuosos.
4. Espacio limitado para desenvolverse.
5. Sistemas de advertencia insuficientes.
6. Peligro de explosión ó incendio.
7. Orden y limpieza deficientes en el lugar de trabajo.
8. Condiciones ambientales peligrosas: gases, polvos, humos, emanaciones metálicas, vapores.
9. Exposiciones a ruido.
10. Exposiciones a radiaciones.
11. Exposiciones a temperaturas altas o bajas.
12. Iluminación excesiva o deficiente.
13. Ventilación insuficiente.

Las aplicaciones exhaustivas del sistema de MORT (Management Oversight and Risk Tree), para el análisis de causalidad de las pérdidas, han demostrado repetidamente, que existe una condición física subestándar por casi cada acto subestándar, como causa de los accidentes. Un gran número de estas condiciones conllevan un diseño ergonómico deficiente de maquinas, de equipos y del medio ambiente laboral. Los líderes en seguridad admiten que muchas de estas condiciones no podrían ser fácilmente reconocidas por el supervisor investigador. Aquellos que se encarguen de revisar los informes de investigación, así como los ingenieros que diseñan las maquinas y los lugares de trabajo, deberían estar concientes de estos hechos.

Es fundamental el considerar estos actos y condiciones, sólo como causa inmediatas o “síntomas” y dedicarse a hacer un trabajo completo de diagnostico de las enfermedades que se manifiestan a través de estos síntomas. Si se pretende únicamente tratar los síntomas, estos se repetirán una y otra vez, es importante encontrar la respuesta a las siguientes preguntas:

...¿Por qué se produjo este acto subestándar?...

...¿Por qué apareció esa condición subestándar?...

...¿Qué falla en nuestro sistema de supervisión y/o administración permitió ese acto ó condición subestándar?...

Si se investiga con diligencia, las respuestas van a señalar el camino que se debe seguir para realizar un control más efectivo. Si se desea resolver los problemas de funcionamiento en control de pérdidas, es necesario dedicarse a las causas básicas u orígenes del problema.

3.2.4 Causas Básicas: Las causas básicas corresponden a las enfermedades o causas reales que se manifiestan detrás de los síntomas; a las razones por las cuales ocurren los actos y condiciones subestándares; a aquellos factores que, una vez identificados, permiten un control administrativo significativo. A menudo, se les denomina causas orígenes, causa reales, causas indirectas, causas subyacentes o causas contribuyentes. Esto se debe a que las causas inmediatas (los actos, los síntomas y las condiciones subestándares, aparecen generalmente, como bastante evidentes, pero para llegar a las causas básicas y ser capaces de controlarlas, se requiere un poco más de investigación.

Las causas básicas ayudan a explicar el porque la gente comete actos subestándares. Lógicamente, una persona no va a poder efectuar un procedimiento adecuado, sino se le ha enseñado nunca antes este procedimiento. Del mismo modo, el operador de un equipo que requiere de un manejo preciso y especializado, no podrá operarlo con eficiencia y con seguridad, si no ha tenido la oportunidad de desarrollar esa habilidad a través de una práctica guiada. Lo mismo es aplicable para mantener vigentes las destrezas y habilidades del

trabajador por medio de una práctica frecuente. ¿Qué equipo profesional podría alguna vez ganar una competencia sin haberse sometido a prácticas constantes? También es igualmente lógico que se produzca una baja en la calidad del trabajo y que éste resulte en una pérdida considerable, si se pone a una persona con vista defectuosa en un trabajo en donde, el poseer una excelente visión es crítico para un desempeño eficiente. De manera similar, es muy poco probable el que a una persona a quien nunca se le ha explicado la importancia de su trabajo, se sienta motivada a sentir orgullo por su desempeño.

Las causas básicas también contribuyen a explicar el porque existen condiciones subestándares. Si no existen estándares adecuados y si la administración no los hace cumplir, se van a adquirir equipos y materiales que no son adecuados y que representan un riesgo. Si no existen estándares adecuados que se tengan que respetar para las actividades de diseño y construcción, se van a diseñar planos de edificaciones inseguras y lugares inapropiados para los procesos de trabajo. Los equipos se desgastarán y darán como resultado un producto subestándar, se producirán desechos y se originaran fallas que podrán ocasionar mas de un accidente, si no se selecciona el equipo apropiado y se le somete a un empleo correcto y mantenimiento periódico.

Así como se hace necesario contemplar dos categorías importantes de causas inmediatas (actos y condiciones subestándares) también es igualmente importante el considerar a las causas básicas en dos categorías importantes:

➤ **FACTORES PERSONALES**

1. Capacidad inadecuada
 - Física / Fisiológica.
 - Mental / Sicológica.
2. Falta de conocimiento.
3. Falta de habilidad
4. Motivación inadecuada.
5. Tensión (stress)
 - Física / Fisiológica.
 - Mental / Sicológica.

➤ **FACTORES DEL TRABAJO (MEDIO AMBIENTE LABORAL)**

1. Liderazgo y supervisión insuficiente.
2. Ingeniería inadecuada.
3. Adquisiciones incorrectas.
4. Mantenimiento inadecuado.

5. Herramientas, equipos y materiales inadecuados.
6. Estándares de trabajos deficientes.
7. Uso y desgaste.
8. Abuso ó mal uso.

En la figura 67 se observan mas detalladamente las causas básicas. Estas corresponden a orígenes y condiciones subestándares. Sin embargo no son el comienzo de la causa ni el efecto de la secuencia. Lo que da inicio a la secuencia que finaliza en perdida es, “la falta de control”.

3.2.5 Falta de control: El control es una de las cuatro funciones esenciales de la administración: Planificación, Organización, Dirección y Control. Estas funciones corresponden a la labor que debe desempeñar cualquier administrador, sin importar su jerarquía o su profesión. Ya sea que se trate de la función de: administración, estudio de mercado, producción, calidad, ingeniería, adquisiciones o seguridad, el supervisor, director o ejecutivo deberá planear, organizar, dirigir y controlar para ser capaz de desempeñarse con efectividad. La persona que administra profesionalmente, conoce el programa de seguridad / control de pérdidas; conoce los estándares; guía a su grupo para cumplir con los estándares, mide su propio desempeño y el de los demás; evalúa los resultados y las necesidades; felicita y corrige, en forma constructiva, el desempeño. Esto es control administrativo. Sin él, se inicia la secuencia de los accidentes y se desatan

los factores causales progresivos que originarán la pérdida. Sin un control administrativo adecuado se da origen a la secuencia de causa efecto y, a menos que se le pueda corregir a tiempo, va a conducir a pérdidas.

Existen tres razones comunes que originan una falta de control. Existencia de programas inadecuados, estándares inadecuados del programa y cumplimiento inadecuado de los estándares.

3.3 MULTIPLICIDAD DE FUENTES, DE CAUSAS Y DE CONTROLES

Los líderes en administración han escrito miles de artículos a través de los años, acerca de la naturaleza compleja de los errores y de los problemas que ocasionan pérdidas, en el mundo de los negocios, una combinación de factores o causas que se producen bajo circunstancias precisas para provocar estos acontecimientos no deseados. Muy rara vez, si es que llega a suceder, un problema administrativo es producto de una sola causa, incluyendo aquellos relacionados con la seguridad, la producción o la calidad.

No importa cuan complejo se pueda presentar el problema; avances prodigiosos (como los del proyecto aeroespacial) han demostrado sin lugar a dudas, que es posible prevenir o controlar las causas de las pérdidas por accidentes. A pesar de que los enormes recursos de que se dispuso para el programa aeroespacial

podrían no encontrarse al alcance de todos, existen evidencias bien documentadas que prueban que el hombre de negocios promedio puede llegar a alcanzar un nivel alto de éxito. Por ejemplo, un estudio reciente vaticinó, en forma matemática, que el índice nacional de lesiones incapacitantes se podría reducir en un 75%, si el hombre de empresa promedio, aplicara las actividades del programa de seguridad, usadas por los líderes de la industria en general. La información disponible ha conducido a los expertos en administración a adoptar las siguientes conclusiones:

1. Los incidentes que deterioran nuestros negocios, son causados, no son producto del azar.
2. Las causas de las pérdidas se pueden identificar y controlar.

Con el propósito de entender mejor las circunstancias que originan las causas de los acontecimientos no deseados, será útil el considerar los cuatro elementos o subsistemas más importantes que, dentro de las operaciones generales del negocio, se constituyen en fuentes. Estos cuatro elementos incluyen: la gente, los equipos, los materiales y el medio ambiente.

Estos cuatro elementos deben interactuar adecuadamente entre ellos ó se producirán problemas que pueden ocasionar pérdidas. Examinemos brevemente cada uno de estos subsistemas:

➤ **Gente:** Este elemento incluye a la administración, a los trabajadores, a los contratistas, a los clientes, a los visitantes, a los proveedores, al público, es decir, al elemento humano en general. La experiencia demuestra que el elemento humano se ve involucrado, en un gran porcentaje en las causas de los accidentes e incidentes. Sin embargo, el concepto “gente” no se refiere “únicamente a los trabajadores que se ven envueltos en los incidentes”.

A la luz del conocimiento moderno y de la experiencia, se analizará exhaustivamente el concepto antiguo en cuanto a que el 85% o más, de los accidentes, son causados por culpa de los errores que cometen los trabajadores. Por ejemplo, el factor “gente” incluye...

- ✓ A los ejecutivos que establecen las políticas de la compañía, los procedimientos las prácticas, los estándares y los aspectos relacionados con el clima laboral de la compañía”.
- ✓ A los ingenieros y diseñadores que crean el medio ambiente laboral en el que se deben desempeñar los trabajadores.
- ✓ A aquellos que manejan los sistemas de mantenimiento, para mantener las herramientas, las maquinas y los equipos en condiciones operativas, óptimas y seguras.
- ✓ A los ejecutivos encargados de la selección, la contratación y ubicación de la gente precisa para el trabajo preciso.

- ✓ A los supervisores encargados de la orientación, la información, la instrucción, la motivación, la dirección, la preparación y el liderazgo de los trabajadores.

Tal como se señaló antes, hay evidencias crecientes de que, al menos, un 80% de los errores que comete la gente, se relacionan con aspectos en los cuales solo la administración puede tener ingerencia. Uno de los medios de control más efectivo lo constituye el manejo del elemento “gente” y las “interacciones” de este factor con los otros elementos del sistema.

- **Equipo:** Este elemento incluye todas las herramientas y maquinas con las que trabaja la gente, en forma directa o que se encuentran a su alrededor: máquinas fijas, vehículos, aparatos para el manejo de materiales, herramientas manuales, equipos de protección, utensilios personales, etc. Estos elementos con los cuales la gente trabaja, constituyen una fuente tremenda de lesión potencial o de muerte. Como tales, durante mucho tiempo se han convertido en un blanco importante para las leyes relacionadas con los resguardos y las protecciones mecánicas y el entrenamiento de los operadores. Recientemente, esta preocupación se ha extendido para incluir con un énfasis mayor, a la ergonomía o a la ingeniería de los factores humanos. Esto significa un diseño del trabajo y del lugar de trabajo para que se adapten a las capacidades de los seres humanos a su tamaño, su alcance, a su rango de movimientos, a sus

capacidades de percepción, a sus patrones de respuesta, a sus límites de tensión, etc. En el pasado los no haber sido capaces de reconocer estas condiciones físicas como subestándares llevo a que, por lo general, se clasificasen las causas de los accidentes como actos inseguros. El objetivo de mayor importancia lo constituye el diseño del equipo y del medio ambiente para lograr que las “funciones de la gente” se tornen más naturales y sean cómodas y, para evitar la confusión, la fatiga, la frustración, la sobrecarga, los errores y los accidentes. Nuevamente esto señala lo necesario que es para los ejecutivos, el considerar los cuatro subsistemas del sistema de organización total y, especialmente, las interacciones entre estos subsistemas.

- **Materiales:** Este elemento incluye las materias primas, los productos químicos y otras sustancias que usa la gente, y con las cuales trabaja y procesa. Ellos corresponden a otra fuente importante de perdida derivada de los accidentes.

En muchas compañías, las lesiones debidas al manejo de material, corresponden de un 20 al 30% de todas las lesiones. Del mismo modo, gran parte del daño a la propiedad se debe a los materiales que se derraman, que corroen, que incendian o que explotan.

En los últimos años este subsistema ha logrado atraer un mayor enteres de parte de la administración lo que se ha visto estimulado por una preocupación

creciente de la sociedad por la salud ocupacional. Es muy extraño encontrar un ejecutivo moderno que desconozca las prácticas de la Información de seguridad y Salud de los Materiales, como asimismo de los procedimientos de manejo seguros de materiales que impliquen riesgos. Ningún ejecutivo se encontraría realizando un trabajo verdaderamente satisfactorio para controlar las pérdidas por accidente, amén a que se dedicase a administrar con efectividad un manejo seguro y apropiado de todos los materiales.

- **Medio Ambiente:** Este elemento incluye todos los aspectos del entorno: los edificios y recintos que rodean a la gente, los equipos y materiales, las superficies sobre las cuales se encuentran las cosas y sobre las que se movilizan; los fluidos y el aire que rodean a otros elementos; los riesgos químicos tales como: los rocíos, los vapores, los gases, los humos metálicos, y los polvos; los fenómenos climáticos y atmosféricos; los riesgos biológicos, tales como: mohos, hongos, las bacterias, y los virus; las condiciones físicas como: La luz, el ruido, el calor, el frío, la presión, la humedad y las radiaciones.

Este subsistema de la organización empresarial, representa el origen de las causas de un número siempre creciente de enfermedades y de condiciones relacionadas con la salud. No solo es participe de los problemas relacionados con a salud ocupacional y los accidentes, sino también de otro tipo de pérdidas

tales como: el ausentismo, los productos y servicios de mala calidad y pérdida de la productividad. Por supuesto, se le debe prestar cada vez mayor atención al ambiente público o externo, que puede verse afectado muy negativamente por la contaminación de la aire, del agua y de la tierra, y por factores provenientes del establecimiento ocupacional.

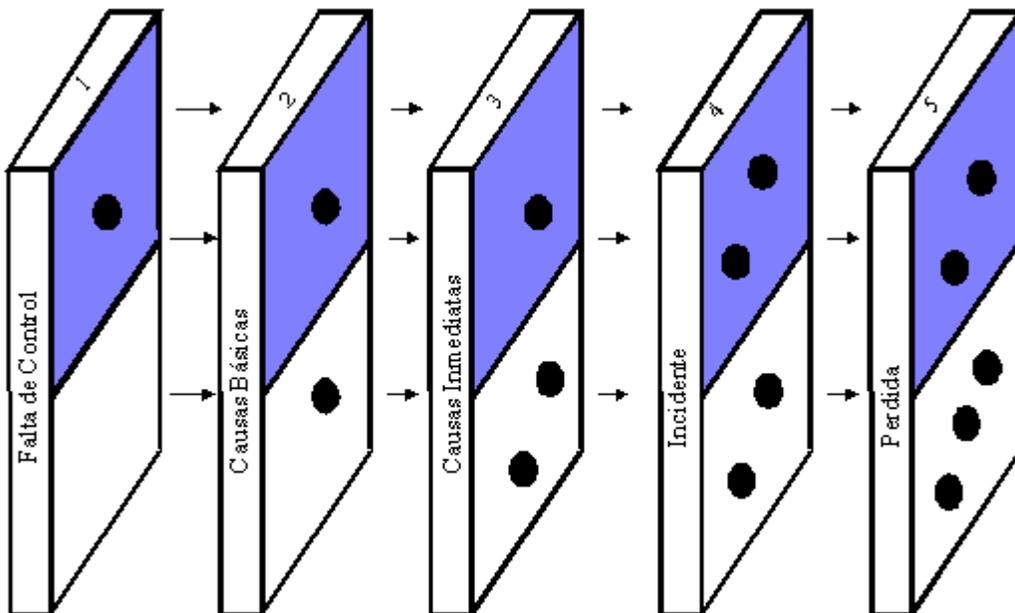
Estos cuatro elementos principales o subsistemas pertenecientes al sistema total de la organización, ya sea, individualmente o en sus interacciones, constituyen las fuentes principales de causas que contribuyen a los accidentes y a otros acontecimientos causantes de pérdidas. Se deberían considerar cuidadosamente esto cuatro elemento cuando se investigan sus incidentes y , especialmente, cuando se desarrollan y ponen en practica las medidas preventivas y correctivas. El ejecutivo eficiente debería ser capaz de controlar todo el sistema.

3.4 CASUALIDAD EXPRESADA POR MEDIO DEL DOMINO

La casualidad expresada por el domino ha sido muy utilizada para comunicar los principios de la prevención de accidente y el control de pérdidas. La secuencia original del domino H.W Heinrich fue clásica para expresar el pensamiento y la enseñanza de la seguridad, por mas de treinta años, en diferentes países. Puesto que el domino se ha usado por tanto tiempo como una ilustración clásica en la

casualidad de los accidentes, su aplicación (figura 3) se ha actualizado para simbolizar la relación directa que existe entre la administración y las causas y los efectos de las pérdidas producto de los accidentes. Además se incorporaron flechas para indicar las interacciones multilineales de la secuencia causa-y-efecto.

FIGURA 67. CAUSALIDAD EXPRESADA POR MEDIO DEL DOMINO



3.4.1 Las tres etapas de control: El modelo no solo refleja las causas múltiples, sino también las múltiples oportunidades de control. Estas oportunidades se pueden agrupar en tres categorías o etapas importantes de control: 1) de pre-contacto, 2) de contacto, 3) de Post-contacto.

- **Control de Pre-contacto:** esta es la etapa que incluye todo lo que hacemos para desarrollar y poner en práctica un programa para evitar riesgos, prevenir que ocurran las pérdidas y planificar acciones para minimizar la pérdida si llega a ocurrir y cuando se produzca el contacto.

El control de pre-contacto es la etapa más fructífera. Es aquel donde se desarrolla un programa óptimo, se establecen estándares óptimos, se establece una retroalimentación efectiva del desempeño y se administra el cumplimiento de los estándares de funcionamiento. La meta aquí es el aspecto PREVENCIÓN para la función de control. El control en la etapa de pre-contacto es la meta de prácticamente todo este texto de estudio.

- **Control de Contacto:** los accidentes implican un contacto con una fuente de energía o sustancia por encima de la capacidad límite del cuerpo o estructura. Muchas medidas de control surten efecto justo en el punto y momento mismo del contacto, reduciendo la cantidad de energía de intercambio o el contacto destructivo. Por ejemplo:
 - El reemplazo de formas alternas de energía o el uso de sustancias menos dañinas.
 - Motores eléctricos en vez de correas y poleas.

- Sustancias con un punto de inflamación más alto o materiales no inflamables.
 - Materiales sólidos, vapores y materiales menos tóxicos.
 - Instrumentos para levantar y manejar materiales, en reemplazo del trabajo manual “lesiona-espaldas”.
-
- Reducción de la cantidad de energía usada o liberada.
 - Prohibición de correr dentro del lugar de trabajo.
 - Equipo de voltaje bajo o de presión baja.
 - Reducción de la temperatura en los sistemas de agua caliente.
 - Uso de materiales que no requieren de una temperatura de procesamiento.
 - Barreras camineras de reducción de velocidad de circulación, al interior de la planta.
 - Reguladores automáticos de velocidad en los vehículos.
 - Control de la vibración y de otros fenómenos productores de ruido.
 - Pantallas, protectores y pinturas para reducir el exceso de calor, de luz y fulgor excesivo.

- Instalación de resguardos o barreras entre la fuente de energía y la gente o la propiedad.
 - Instrumentos o equipos de protección personal.
 - Cremas y lociones para la piel.
 - Murallas cortafuego.
 - Compartimiento a prueba de explosión.
 - Recintos cerrados o aislamientos para las maquinas ruidosas para el calor y el frío, para electricidad y para la radiación.
 - Filtros para extraer del aire los elementos tóxicos.

- Modificación de la superficie de contacto
 - Acolchado de los puntos de contacto.
 - Incorporación de protectores anti-golpes para los pilares de las construcciones en áreas de manejo de materiales.
 - Suavizar redondeando esquinas y bordes de los bancos, de los mesones, de los muebles y los equipos de trabajo.
 - Suavizar superficies ásperas o bordes agudos de los equipos y materiales.
 - Remoción de escombros, reparación de hoyos e irregularidades y de otras exposiciones a daño en las superficies del transito de vehículos.

- Refuerzo del cuerpo o estructura.
 - Control de peso y acondicionamiento físico.
 - Vacunas inmunizantes.
 - Tratamiento con droga para mejorar la coagulación sanguínea de los hemofílicos, etc.
 - Refuerzo de techos, pisos, columnas, muelles, plataformas, equipos de manejo de materiales, superficies de almacenamiento de carga, etc.
 - Refuerzo de la estructura de vehículos para aumentar su resistencia a los impactos.
 - Protectores reforzados para aquellas partes filosas y cortantes de las herramientas manuales eléctricas.

La etapa de contacto es donde ocurre el incidente y que puede o no resultar en pérdida, dependiendo de la cantidad de energía o sustancias que intervienen. Los controles efectivos mantienen el intercambio en un mínimo, dando como resultado pérdidas menores, en vez de pérdidas mayores y originando “escapadas providenciales”, en lugar de pérdidas accidentales. Estas medidas no evitan los contactos o los incidentes, pero si contribuyen significativamente al control de las pérdidas.

➤ **Control de post-contacto:** Después del accidente ó “contacto” la extensión de las pérdidas se pueden controlar de muchas maneras. Por ejemplo:

- Puesta en práctica de los planes de acción de emergencia.
- Primeros auxilios oportunos y cuidado medico adecuado a las personas.
- Operaciones de rescate.
- Control de incendio y explosión.
- Retiro de circulación del equipo, materiales e instalaciones dañadas, hasta no ser reparadas.
- Rápida ventilación del lugar de trabajo para eliminar aire contaminado.
- Reparación rápida de los materiales, equipos e instalaciones dañadas.
- Limpieza efectiva de los derrames.
- Control de los reclamos de indemnización.
- Control de las demandas judiciales por responsabilidad legal.
- Medidas de recuperación y de control del derroche, para rescatar todo lo de valor posible de los ítems dañados.
- Rehabilitación rápida y efectiva de los trabajadores lesionados para reincorporarse a la vida productiva.

Los controles post-contacto no previenen los accidentes, pero si minimizan las pérdidas. Ellos pueden significar la diferencia entre lesión y la muerte; entre los

daños reparables y las pérdidas totales; Entre un simple reclamo y una demanda judicial; entre una interrupción de la gestión empresarial y el cierre total del negocio.

FIGURA 68. FACTORES DEL TRABAJO

• **Supervisión y Liderazgo deficiente**

- Relaciones jerárquicas poco claras y conflictivas.
- Delegación insuficiente o inadecuada.
- Definir políticas, prácticas inadecuadas.
- Formulación de objetivos, metas y estándares que ocasionen conflictos.
- Programación insuficiente del trabajo.
- Entrenamiento insuficiente.
- Entrega insuficiente de elementos de consulta y de publicaciones guías.
- Evaluación deficiente de las exposiciones a pérdidas.
- Ubicación inadecuada del trabajador, de acuerdo a sus cualidades.
- Medición y Evaluación deficientes del desempeño.
- Retroalimentación deficiente en relación al desempeño.

• **Ingeniería Inadecuada**

- Evaluación insuficiente de las exposiciones a pérdidas.
- Preocupación deficiente en cuanto a los factores humano / ergonómicos.
- Estándares, especificaciones o criterios de diseño inadecuado.
- Control e inspecciones inadecuados de las construcciones.
- Evaluación deficiente de la condición conveniente para operar.
- Evaluación deficiente para el comienzo de una operación.
- Evaluación insuficiente respecto a los cambios que se produzcan.

• **Deficiencia en las Adquisiciones**

- Especificaciones deficientes en cuanto los requerimientos.
- Investigación insuficiente respecto a los materiales y equipos.
- Especificaciones deficientes respecto a los vendedores.
- Modalidad o ruta de embarque inadecuada.
- Inspecciones de recepción y aceptación deficientes.
- Comunicación inadecuada de las informaciones sobre aspectos de seguridad y salud.
- Manejo inadecuado de los materiales.
- Transporte inadecuado de los materiales.
- Identificación inadecuada de los ítems que implican riesgos.
- Sistemas deficientes de recuperación ó eliminación de desechos.

• **Herramientas y Equipos Inadecuados**

- Evaluación deficiente de las necesidades y los riesgos.
- Preocupación deficiente en cuanto a los factores humano / ergonómicos.
- Estándares inadecuados.
- Disponibilidad inadecuada.
- Ajustes / reparación deficientes.
- Sistema deficiente de reparación y recuperación de materiales.
- Eliminación y reemplazo inapropiados de piezas defectuosas.

• **Estándares deficientes de trabajo**

- Desarrollo inadecuado de normas para:
 - ...evaluación de las exposiciones.
 - ...coordinación de quien diseña el proceso.
 - ...compromiso del trabajador.
 - ...estándares / reglas inconsistentes.
- Comunicación inadecuada de normas:
 - ...publicación / distribución.
 - ...adaptación a las lenguas respectivas.
 - ...entrenamiento.
 - ...reforzamiento mediante afiches, código de color y ayuda al trabajador.
- Mantenimiento inadecuado de las normas:
 - ...seguimiento del flujo de trabajo.
 - ...actualización / control de uso de normas.

• **Uso y Desgaste**

- Planificación inadecuada del uso.
- Prolongación excesiva de la vida útil del elemento. Mantenimiento deficiente.
- Inspección y/o control deficientes.
- Sobrecarga de uso excesivo.
- Empleo inadecuado a otros propósitos.

• **Abuso o maltrato**

- Permitidos por la supervisión intencional/ no intencional.
- No permitidos por la supervisión intencional / no intencional.

• **Mantenimiento Deficiente**

- Aspectos preventivos inadecuados para:
 - ...evaluación de necesidades.
 - ...lubricación y servicio.
 - ...ajuste / ensamblaje.
 - ...limpieza o pulimiento.
- Aspectos correctivos inadecuados para:
 - ...comunicación de necesidades.
 - ...programación del trabajo.
 - ...revisión de las piezas.
 - ...reemplazo de partes defectuosas.

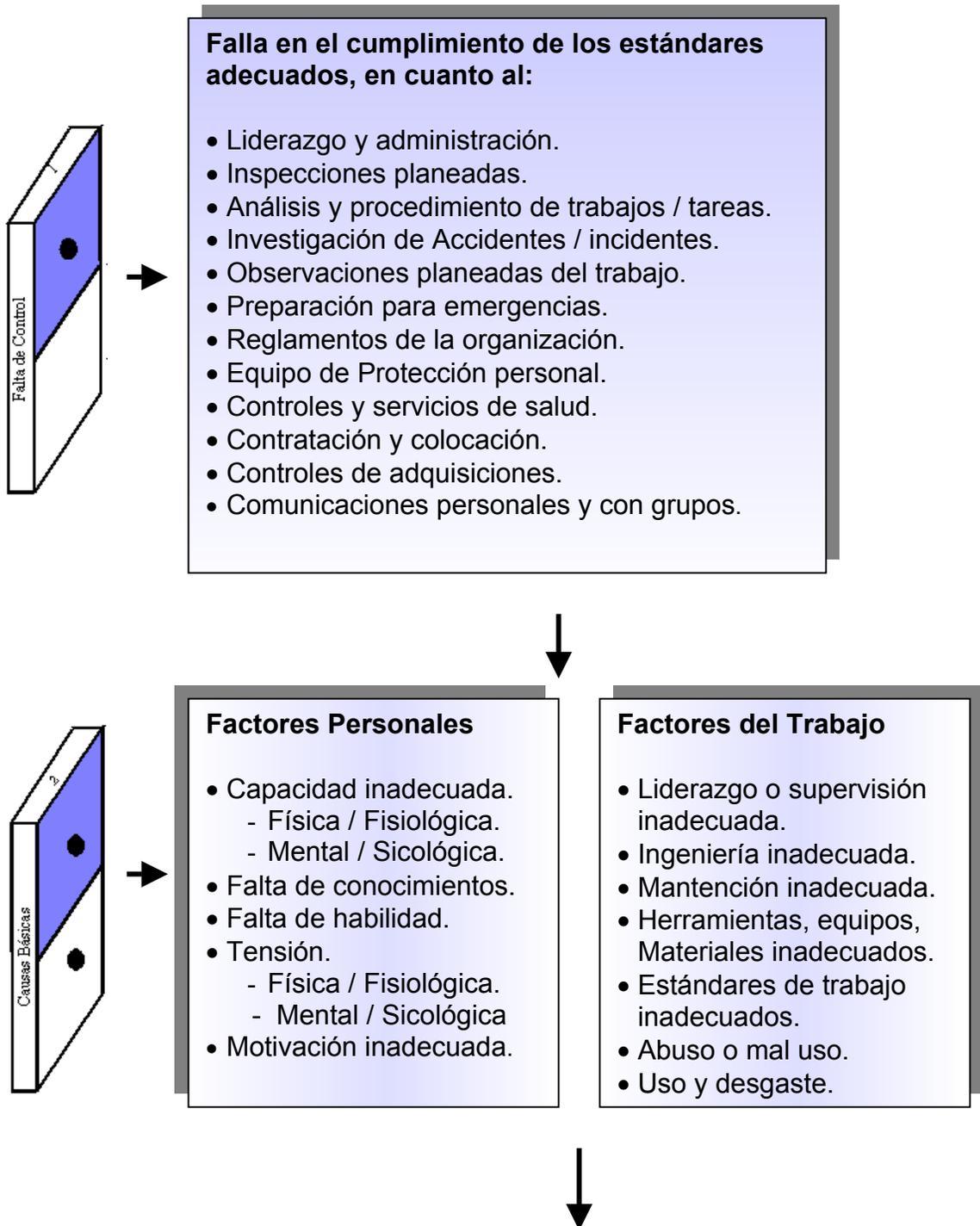
FACTORES PERSONALES

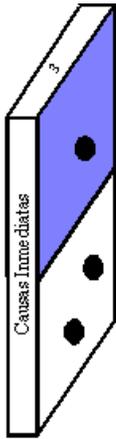
| | |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Capacidad Física / fisiológica Inadecuada <ul style="list-style-type: none"> - Altura, peso, talla, fuerza, alcance, etc. Inadecuados. - Capacidad de movimiento corporal limitada. - Capacidad limitada para mantener ciertas proporciones corporales. - Sensibilidad a ciertas sustancias. - Sensibilidad a determinados extremos sensoriales (temperatura, sonido, etc.) - Visión y audición defectuosa. - Otras deficiencias sensoriales. (tacto, gusto, olfato, equilibrio). - Incapacidad respiratoria. - incapacidad física permanente. - Incapacidades temporales. • Capacidad Mental / Sicológica Inadecuada <ul style="list-style-type: none"> - Temores y fobias. - Problemas emocionales. - Enfermedad mental. - Nivel de Inteligencia. - Incapacidad de comprensión. - Falta de juicio. - Escasa coordinación. - Bajo tiempo de reacción. - Aptitud mecánica deficiente. - Baja aptitud de aprendizaje. - Problemas de memoria. • Tensión Física o Fisiológica | <ul style="list-style-type: none"> • Tensión Mental o Sicológica <ul style="list-style-type: none"> - Sobrecarga emocional. - Fatiga debido a la carga o a las limitaciones de tiempo de la tarea mental. - Obligaciones que exigen juicios o toma de decisiones extremas. - Rutina, monotonía, exigencias para un cargo sin trascendencia. - Exigencia de concentración profunda. - Actividades insignificantes / degradantes. - Ordenes confusas. - Solicitudes conflictivas. - Preocupación debido a problemas. - Frustraciones. Enfermedad mental • Falta de conocimiento <ul style="list-style-type: none"> - Falta de experiencia. - Orientación deficiente. - Entrenamiento inicial inadecuado. - Reentrenamiento insuficiente. - Ordenes malinterpretadas. • Falta de Habilidad <ul style="list-style-type: none"> - Instrucción inicial insuficiente. - Práctica insuficiente. - Operación esporádica. - Falta de preparación. • Motivación Deficiente <ul style="list-style-type: none"> - El desempeño subestándar es mas gratificante. Falta de desafíos. - El desempeño estándar causa desagrado - Falta de incentivos. - Demasiadas frustraciones. - No existe intención de ahorro de tiempo y esfuerzo. |
|---|--|

| | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> - Lesión o enfermedad. - Fatiga debido a la carga o duración de la tarea. - Fatiga por falta de descanso. - Fatiga debido a sobrecarga sensorial. - Exposición a riesgos contra la salud. - Exposición a temperaturas altas. - Insuficiencia de oxígeno. - Variaciones en presión atmosférica. - Restricción de movimiento. - Insuficiencia de azúcar en la sangre. - Ingestión de drogas. | <ul style="list-style-type: none"> - No existe interés para evitar la incomodidad. - Sin interés por sobresalir. - Presión indebida de los compañeros. - Ejemplo deficiente de la supervisión. - Retroalimentación deficiente en base al desempeño. - Falta de refuerzo positivo para el comportamiento correcto. - Falta de incentivos de producción. |
|--|---|

5 RESUMEN

FIGURA 69. MODELO DE CAUSALIDAD DE PÉRDIDA



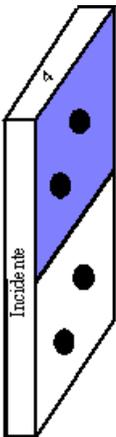


Actos Subestándares

- Operar los equipos sin autorización.
- Desobedecer las advertencias.
- Olvidarse de colocar los seguros.
- Conducir a velocidades inadecuadas.
- Poner fuera de servicio los mecanismos de seguridad.
- Emplear equipo defectuoso.
- Almacenar y levantar de manera incorrecta.
- Hacer bromas.
- Trabajar bajo influencia del alcohol u otras drogas.

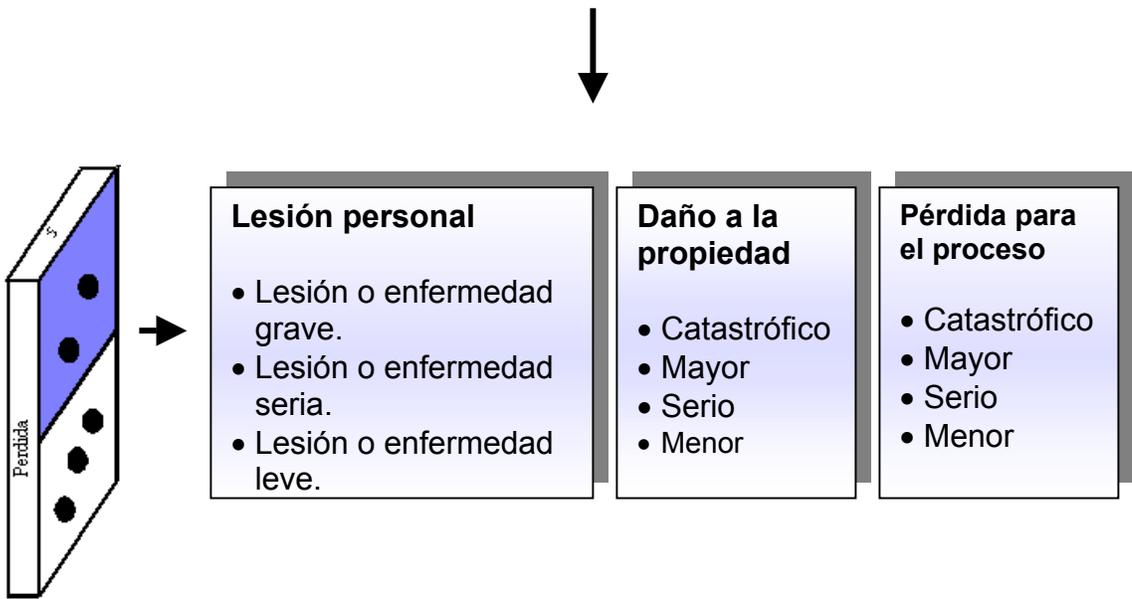
Condiciones Subestándares

- Protecciones y resguardos inadecuados.
- Exposición al ruido, radiaciones, altas o bajas temperaturas.
- Ventilación insuficiente.
- Iluminación deficiente / excesiva.
- Orden y limpieza deficientes.
- Herramientas, equipos o materiales defectuosos.
- Espacio limitado para desenvolverse.
- Sistema de advertencia deficiente.
- Riesgo de incendio y explosión.



1.1 Contactos

- Golpeado contra (tropezando o chocando con).
- Golpeado por (un objeto en movimiento).
- Caída a un nivel inferior.
- Caída a un mismo nivel (resbalón y caída, volcarse)
- Atrapado (puntos de compresión y de aprieto).
- Cogido en (agarrado, colgado).
- Cogido entre (aplastado o amputado).
- Contacto con (electricidad, calor, frío, radiación, ruido, productos tóxicos).
- Sobretensión, sobreesfuerzo, sobrecarga.



OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL:

- Cálculos del impacto de la Confiabilidad de los equipos en el Sistema de producción de una Empresa.

OBJETIVOS ESPECIFICOS:

- Medir la confiabilidad de un equipo o sistema.
- Evaluar cual de las fallas que poseen mayor ocurrencia, genera un mayor riesgo.
- Realizar un Análisis a las Fallas de mayor ocurrencia.
- Realizar un Estudio de Análisis de Causa Raíz a las fallas presentadas.

INTRODUCCIÓN

La confiabilidad en todos los puntos de la empresa es importante porque ayuda a generar productos con mejor calidad y más garantía, además mejora considerablemente la imagen de la empresa. Nos proporciona métodos y herramientas para medir que tan confiable es el sistema de producción de la empresa, sus equipos, materiales y el recurso humano con el que trabaja.

Actualmente las empresas para mantenerse en el mercado, deben conocer su capacidad para satisfacer las necesidades de sus clientes, y la confiabilidad de su sistema productivo. La ingeniería de la fiabilidad es una de las herramientas más poderosas para cumplir con este objetivo, porque nos enseña el porque de la importancia de la fiabilidad en todas las partes de la organización. Una de las consecuencias de los avances tecnológicos ha sido una mayor complejidad de los sistemas modernos, en estos momentos las metas de las empresas son: alto desempeño, alta confiabilidad, bajo costo y fácil mantenimiento, los cuales le permiten ser competitivo en el mercado. Esto ha originado la necesidad de análisis detallados sobre aspectos de confiabilidad, seguridad y mantenimiento de esos sistemas en las fases de diseño y operación.

Lo que buscamos con estos casos de aplicación de la herramienta es realizar un análisis de confiabilidad comprendiendo el sistema como tal dentro de un contexto operacional y que se aprenda a conocer y a diferenciar los modos de fallas y la importancia de cada uno de ellos. Para esto nos serán de gran utilidad todas las técnicas estudiadas a lo largo de este libro, porque lo que mostraremos es un análisis del estado actual de las empresas en el estudio y predicción del comportamiento futuro de los equipos, sistemas y/o procesos, mediante el análisis del historial de fallas, con la finalidad de identificar las acciones correctivas y proactivas que puedan efectivamente evitar las fallas, optimizar costos y minimizar su impacto en la organización. Igualmente se darán para cada aplicación las respectivas conclusiones y recomendaciones sobre las acciones correctivas y proactivas a tomar en cuenta para cada caso en particular.

CASO DE APLICACIÓN No. 1

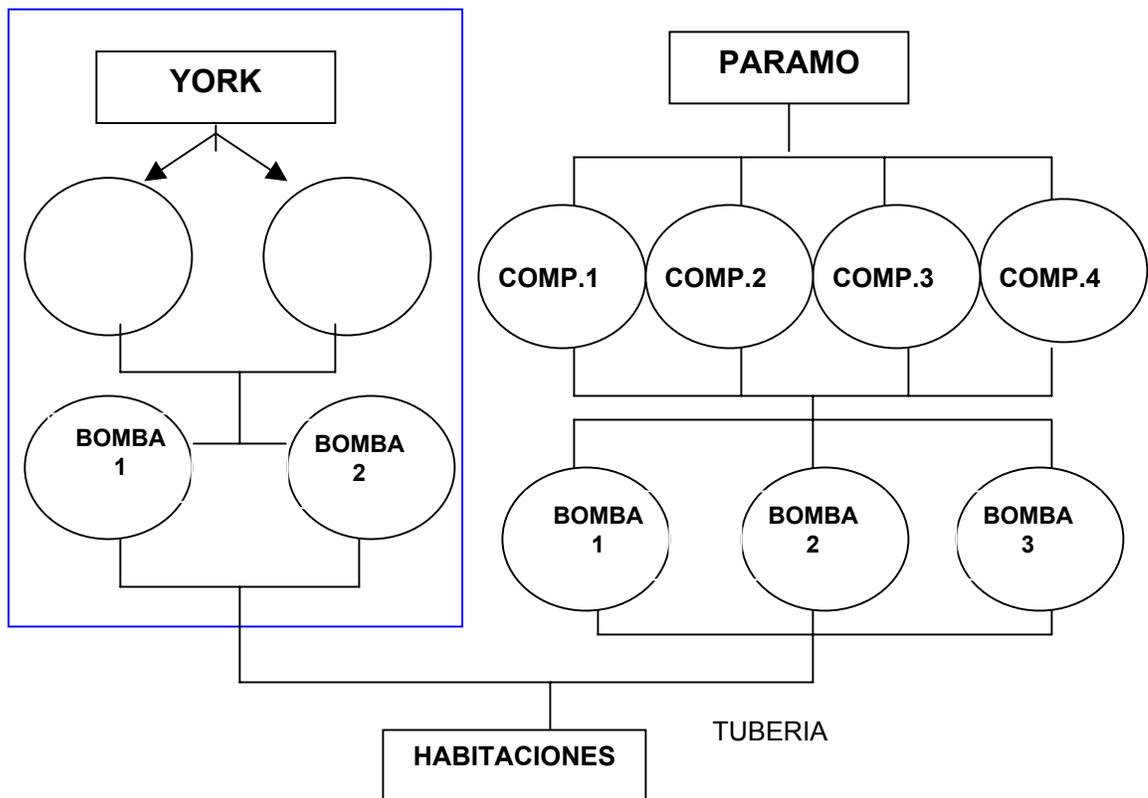
El sistema a estudiar como primer ejemplo es el sistema de enfriamiento del *Hotel Puerta a Paris*.

1. OBJETO DE ESTUDIO:

El sistema de aire acondicionado del hotel gafitas esta compuesto por dos subsistemas de suministro de aire: York y Páramo. En este caso el objeto de estudio es el cálculo del impacto de la confiabilidad del subsistema de aire York, en las utilidades del hotel. Además debemos tener en cuenta que el compresor del subsistema Páramo de menor capacidad está dañado. (Ver diagrama de estructura del proceso figura 1.

1.1 ESTRUCTURA DEL PROCESO

FIGURA 1. DIAGRAMA DE ESTRUCTURA DEL PROCESO



2. HISTORIA DEL EQUIPO

TABLA 1. HISTORIA DEL SUBSISTEMA DE AIRE YORK.

| <i>FECHA</i> | <i>HORA</i> | <i>FALLA</i> | | <i>DURACIÓN DE LA FALLA</i> |
|--------------|-------------|--------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| Dic 13/01 | 08:00 | Ruido Anormal | Desgaste de Biela | 1 mes |
| Jun 12/02 | 11:00 | Ruido Anormal | Resortes Descarga Partida | 8 días |
| Nov 14/02 | 10:00 | Quema Devanado | Resortes Partidos | |
| Feb 28/03 | 09:00 | Motor Torre Enfriamiento | Quema de Motor | 2 días |
| Ago 26/03 | 18:00 | Paradas Intermitentes | Bomba f/s | 2 días |
| Oct 04/03 | 17:00 | Quema Devanado | Falla de Aislamiento | 13 días |

3. CALCULOS

3.1 DISTRIBUCION DE PROBABILIDAD DE WEIBULL PARA LAS FALLAS DEL AIRE ACONDICIONADO YORK

TABLA 2. PROBABILIDAD DE DISTRIBUCIÓN WEIBULL PARA EL SUBSISTEMA DE AIRE YORK

| <i>Fallas</i> | <i>Orden</i> | <i>F(t)</i> | | <i>y</i> | | <i>xy</i> |
|---------------|--------------|-------------|--------|----------|---------|-----------|
| 1432 | 1 | 0,109 | 7,267 | -2,156 | 52,807 | -15,664 |
| 1622 | 2 | 0,266 | 7,391 | -1,175 | 54,633 | -8,687 |
| 1776 | 3 | 0,422 | 7,482 | -0,602 | 55,982 | -4,501 |
| 1882 | 4 | 0,578 | 7,540 | -0,147 | 56,853 | -1,111 |
| 2063 | 5 | 0,734 | 7,632 | 0,282 | 58,246 | 2,152 |
| 2102 | 6 | 0,891 | 7,651 | 0,794 | 58,532 | 6,077 |
| | | | 44,963 | -3,003 | 337,053 | -21,734 |

3.2 PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE FALLAS PARA EL SIGUIENTE AÑO

a = - 54.04

b = 7.15

n = 1905.4

TABLA 3. PROBABILIDADES DE OCURRENCIA PARA EL AÑO PRÓXIMO.

| MESES | DÍAS | PROBABILIDAD DE FALLA |
|----------------|------|-----------------------|
| Diciembre 4/03 | 2163 | 0,084077708 |
| enero 4/04 | 2194 | 0,064492875 |
| Febrero 4/04 | 2225 | 0,048293417 |
| Marzo | 2253 | 0,036373463 |
| Abril | 2284 | 0,025885734 |
| Mayo | 2314 | 0,018107865 |
| Junio | 2345 | 0,012132765 |
| Julio | 2375 | 0,007973503 |
| Agosto | 2406 | 0,00498631 |
| Septiembre | 2436 | 0,003051344 |
| Octubre | 2467 | 0,00176381 |
| Noviembre | 2497 | 0,000995165 |
| Diciembre 4/04 | 2528 | 0,000526037 |

3.3 FACTOR DE EFECTIVIDAD DEL AIRE ACONDICIONADO YORK

3.3.1 Factor de Disponibilidad: Para realizar el calculo de éste factor se deben tener en cuenta las duraciones de la falla que causaron parada del equipo. El tiempo de parada corresponde a las fallas del motor en torra de enfriamiento y las quemadas de devanado.

$$\text{Disponibilidad} = \frac{\text{Tiempo de Carga} - \text{Tiempo de parada}}{\text{Tiempo de Carga}} = \frac{2149 \text{ días} - 15 \text{ días}}{2149 \text{ días}}$$

$$\text{Factor de Disponibilidad} = 0.9930 = 99.3\%$$

3.3.2 Factor de Eficiencia: La capacidad de diseño del equipo es de 120 Toneladas y la capacidad instalada es de 104.4 ton, por lo tanto, se tiene una pérdida de capacidad de 15.6 toneladas.

$$\text{Eficiencia} = \frac{120 \text{ ton} - 15.6 \text{ ton}}{120 \text{ ton}} = 0.87 = 87\%$$

3.3.3 Factor de Calidad: La calidad del servicio de aire acondicionado se mide a través de la satisfacción del cliente, este factor es cualitativo e intangible, por lo tanto un criterio que utilizamos para evaluar la calidad de aire que llega a las

habitaciones es la eficiencia, dependiendo de esta llega cierta cantidad de agua a los serpentines, cuando esta cantidad de agua no es suficiente no es capaz de enfriar las habitaciones y por ende existe insatisfacción en el cliente, por esto dependiendo de la eficiencia del equipo es la calidad del servicio que se presta.

3.3.4 Factor de Servicio:

Efectividad = Factor de calidad X Factor de Eficiencia X Factor de Disponibilidad

$$\text{Efectividad} = (0.87) \times (0.87) \times (0.993) = 0.7516 = 75.16\%$$

4. METODOLOGIA DE ANALISIS DE FALLA O DEL DOMINÓ

4.1. Falla de la Torre de Enfriamiento

- **Incidente:** - Quema del motor.

- **Consecuencia:** -El ciclo de enfriamiento fue incompleto por ende el Equipo se tuvo que apagar.

- **Causa Inmediata:** - Falla de rodamiento
 - Equipo (rodamiento) en condiciones de falla

- Entrenamiento insuficiente del personal.

- **Causas Básicas:** -Supervisión deficiente.
 - Asignación de responsabilidades a personas poco capacitadas.
 - Instrucciones y entrenamientos insuficientes
 - Mantenimiento deficiente
 - Desarrollo inadecuado de normas para inventario y evaluación de las exposiciones a falla.

- **Falla de administración:** No se indujo al personal a llevar un control y un monitoreo sobre el funcionamiento del equipo, es decir una hoja de la vida de dichos equipos que tienen a su cargo.

4.2 Falla en el Compresor de mayor Capacidad

- **Incidente:** Ruptura de los resortes y contacto de estos con el devanado causando un corto puesto que estos contienen aislante.

- **Consecuencia:** Parada del equipo por 13 días e insatisfacción del cliente por mala prestación del servicio.

- **Causas Inmediatas:** - Se sobrepasó el límite de tolerancia de vibración de los resortes.
 - Utilización del equipo en condiciones no aptas, puesto que ya se encontraba con problemas.
 - Entrenamiento inicial inadecuado al personal encargado del equipo.

- **Causas Básicas:** -Falta de supervisión
 - Entrega insuficiente de documentos y guías de consulta a los operarios.
 - Preocupación deficiente referente a los factores Técnicos y humanos.
 - Operar equipos por personas no calificadas o debidamente preparadas.
 - Inspección y/o control deficiente.

- **Falta Administrativa:** No se ha proporcionado al personal una capacitación adecuada para manejar un equipo que requiere un conocimiento técnico avanzado.

4.3 Falla en el Compresor de menor Capacidad

- **Incidente:** -Desgaste de bielas y balineras

- **Consecuencia:** -Dejó de funcionar el compresor.
-Abuso del otro compresor de mayor capacidad.

- **Causa inmediata:** -Falta de mantenimiento en las bielas y balineras,
-Puesto que no se verifica la necesidad de reposiciones de estas a tiempo.
-No supervisión de la necesidad de lubricantes y del buen funcionamiento de las piezas.

- **Causas Básicas:** - Falta de supervisión
-Preocupación deficiente referente a los factores Técnicos y humanos.
-Operar equipos por personas no calificadas o debidamente preparadas.
-No hay sentido de pertenencia por parte de los Operarios hacia el equipo.

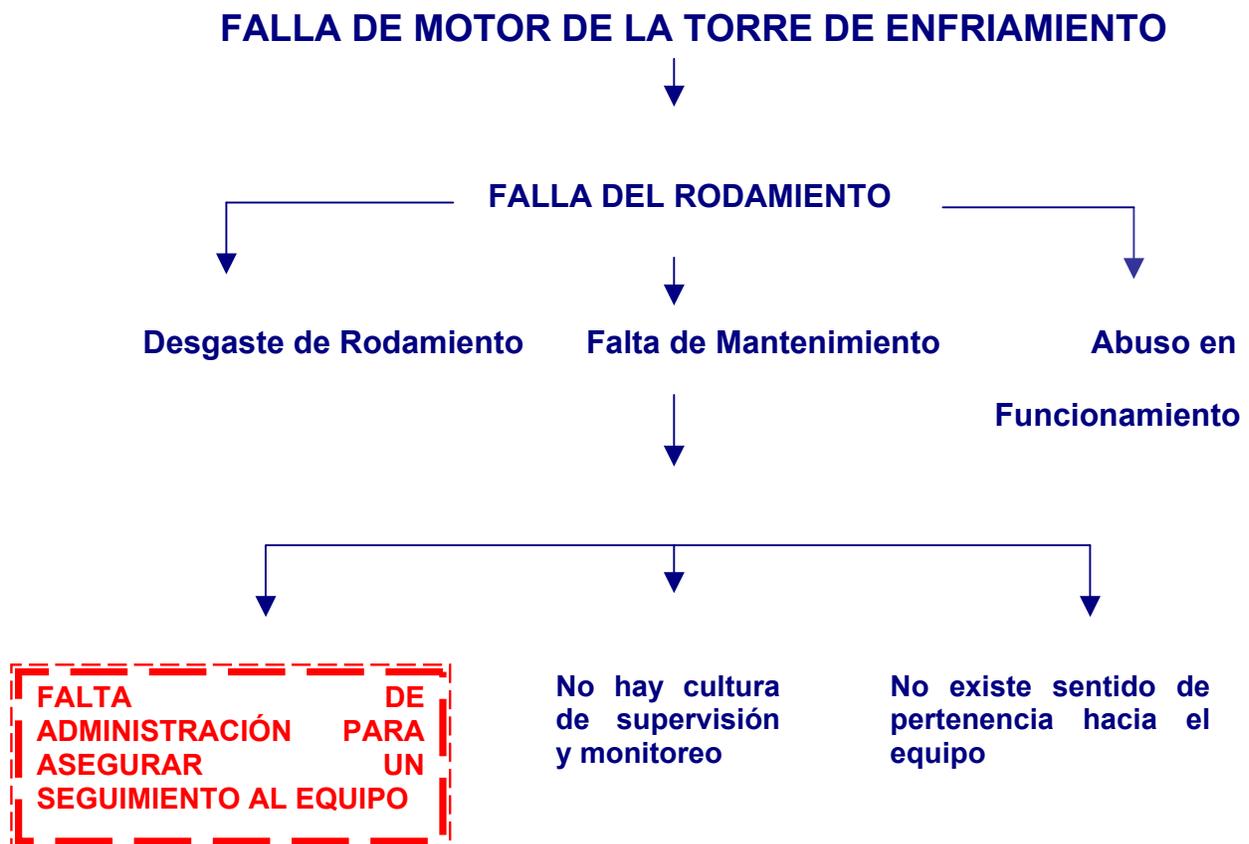
- **Falta de administración:** No disponen recursos que vayan destinados a la reposición de piezas y partes del equipo.

5. ÁRBOL LÓGICO DE FALLAS (RCA)

5.1 Evento: Falla del motor de la torre de enfriamiento.

MODO: Se ocasionó una falla en el rodamiento, lo que dio como resultado que existieran fallas en el motor de la torre de enfriamiento.

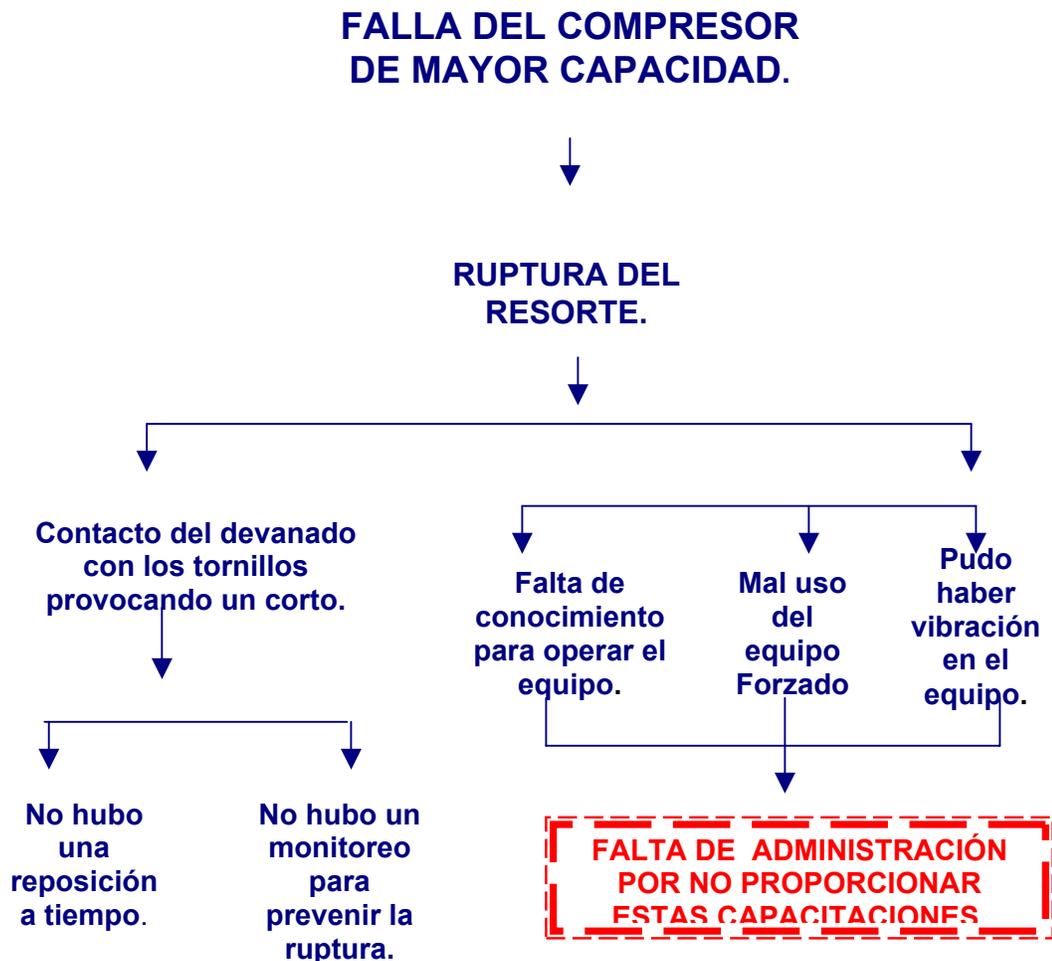
FIGURA 2. FALLA DE MOTOR DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO.



5.2 Evento: Falla del Compresor de mayor Capacidad.

MODO: Se presentaron rupturas en el resorte y esto hizo que se ocasionara un mal contacto de las bobinas con los tornillos provocando un corto y la Falla en el Compresor de Mayor Capacidad.

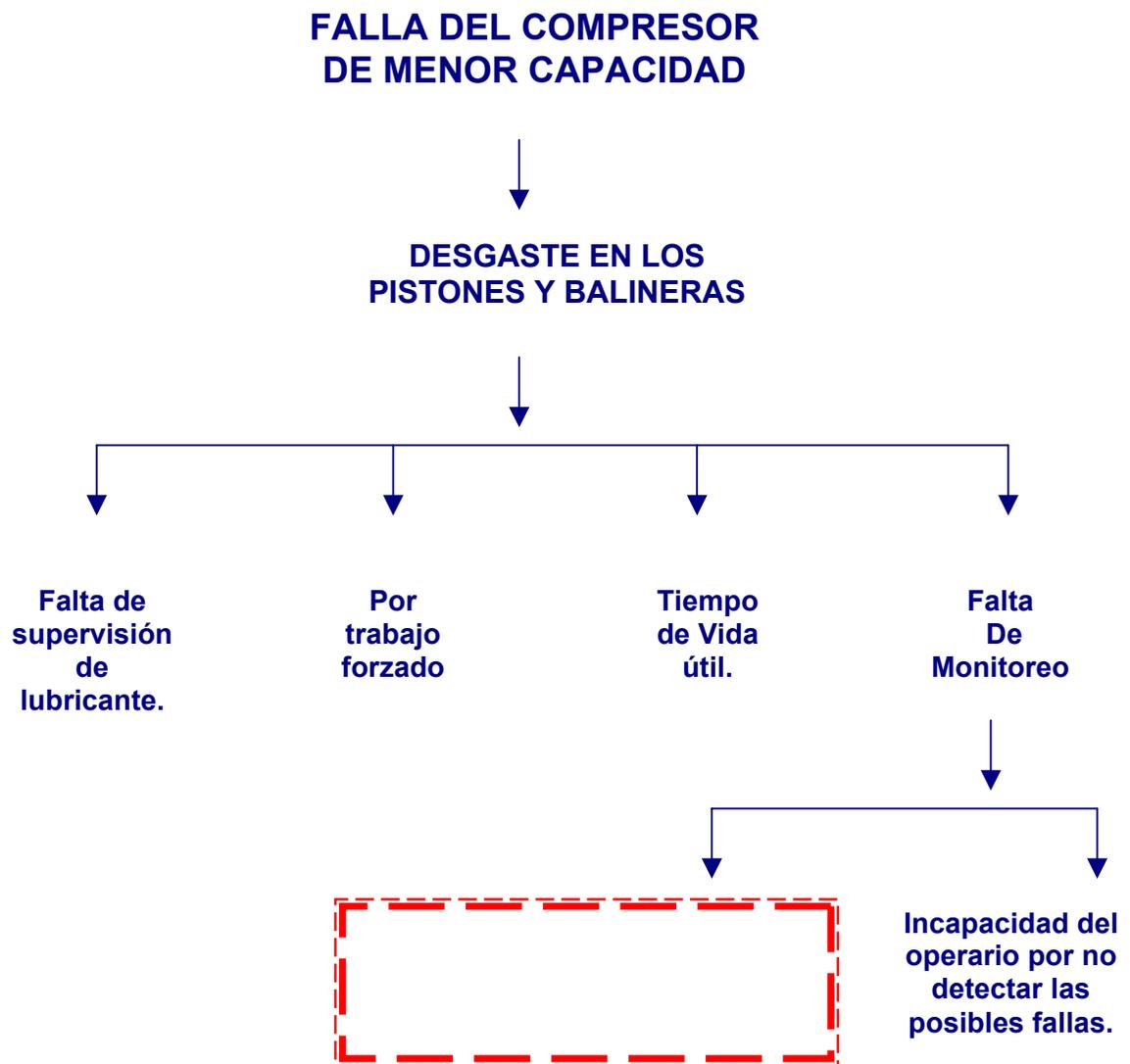
FIGURA 3. FALLA DEL COMPRESOR DE MAYOR CAPACIDAD.



5.3 Evento: Falla del Compresor de menor Capacidad.

MODO: El Compresor de menor Capacidad, presentó fallas debido a que los pistones y bielas presentaron desgaste.

FIGURA 4. FALLA DEL COMPRESOR DE MENOR CAPACIDAD.



6. NORMAS PARA EL MANTENIMIENTO DE LOS EQUIPOS DE REFRIGERACIÓN

Tiene suma importancia atender al funcionamiento del equipo sin que ocurran interrupciones, y al mismo tiempo contribuir al bienestar de los empleados. Por otra parte, las paradas por fallas originan pérdidas y elevan los costos en la empresa.

Ahora bien, el problema de cómo y cuando aplicar las medidas de protección para el funcionamiento normal del equipo merece un estudio detenido por ser un asunto complejo. Se requiere un sistema que permita emplear los medios corrientes y exactos de control, distribuyendo el trabajo y los materiales necesarios, y llevando un registro de todas las reparaciones que se realicen y el costo que acarreen las mismas.

En numerosas plantas el departamento de ingeniería depende solamente de los operadores de las máquinas para las atenciones de mantenimiento; pero en realidad los operadores no han recibido, por lo general adiestramiento suficiente para esas funciones. Cuando el primer factor de funcionamiento en una planta es el funcionamiento continuo y eficiente, las cosas son distintas pues lo primero que se hace es adiestrar al personal, procurando que se instruya acerca del mantenimiento aconsejado por el fabricante del equipo. En esta información se

incluyen todos los datos pertinentes sobre el diseño, construcción y características físicas de los respectivos aires. Con este adiestramiento se busca obtener el funcionamiento continuo del aire con conocimiento de causa, y no al azar como sucede en la mayoría de las empresas donde se siguen procedimientos rutinarios. Para que un hombre sea útil en este programa, debe ser persona de mente abierta y deseosa de obtener el mayor conocimiento de nuevas técnicas que han demostrado en la práctica ser eficaces para la solución de determinados problemas.

Debe ser una persona completamente familiarizada con las condiciones en que funciona el equipo, buscando minuciosamente todos los signos de mal funcionamiento y aplicando inmediatamente las medidas correctivas necesarias.

Un programa confiable de mantenimiento reclama lo siguiente:

1. Inspección y pruebas para determinar los desperfectos.
2. Inspección de anotaciones y comprobación de listas.
3. Existencia de repuestos esenciales para emergencias.
4. Personal debidamente adiestrado y bien provisto de herramientas.

Realizando un buen mantenimiento preventivo, lo que en realidad se busca es descubrir los pequeños desperfectos y corregirlos antes de que se presenten

roturas importantes. Para conseguir estos resultados, la persona encargada del mantenimiento debe comprobar el funcionamiento y condiciones del sistema en general. El encargado del equipo debe iniciar su trabajo por la unidad condensadora, que es el corazón del sistema. Los defectos que puedan existir se reflejan en el compresor, y a menos que se empleen rápidamente medidas correctivas este sufrirá costosas averías, con las consiguientes pérdidas de tiempo y aumentos en los gastos de la empresa, en este caso el Hotel. Al realizarse la inspección, debe observarse anotaciones sobre lo siguiente:

1. Presiones de descarga y succión.
2. Temperaturas registradas en la descarga y succión.
3. Sobrecalentamiento total por la succión en el compresor.
4. Nivel de aceite en el carter.
5. Condición del aceite en el carter (sucio o espumoso).
6. Presión efectiva del aceite en todos los compresores con lubricación de alimentación forzada.
7. Temperaturas superficiales del compresor en general, tales como: temperatura del carter, temperatura de la cubierta de cierre y temperatura del cilindro.

El encargado del mantenimiento debe adiestrarse en el reconocimiento de cualquier desviación de lo normal, para determinar con rapidez el desarreglo y tomar las medidas correctivas del caso. Estas medidas deben establecerse de

acuerdo con el sentido común, siendo prácticas y adaptándose a las recomendaciones del fabricante con relación a la parte del sistema que corresponda.

Después continuará la inspección concentrándose en el motor de la unidad de condensación. Estos motores generalmente reciben poca atención, olvidándose de los desarreglos en los mismos y que acarrear un consumo excesivo de corriente, destruyéndose con el tiempo el aislamiento de las bobinas hasta llegar a producirse la quemadura del motor. La inspección del motor debe hacerse atendiendo a las condiciones siguientes:

1. Temperatura de la chumacera.
2. Llamada de corriente en las terminales del motor.
3. Lubricación apropiada.

Junto con el motor deben inspeccionarse cuidadosamente todos los componentes eléctricos del sistema de control, atendiendo a lo siguiente:

1. Ajuste adecuado de los controles.
2. Funcionamiento adecuado de los controles.
3. Comprobación de los alambres y sistemas de tierra.

Esta inspección es muy importante, ya que el control es el sistema nervioso, y sus impulsos producen los resultados finales que se desean. A continuación se hace la inspección de los controles unitarios de seguridad.

Estos controles fueron diseñados e instalados en la unidad de condensación por razones de seguridad. No son controles de funcionamiento, por lo que es muy importante su comprobación, haciéndolos funcionar y produciendo manualmente las condiciones anormales contra las cuales debe protegerse el equipo. Si el ajuste se ha corrido, debido a vejez de los resortes o por causa de las vibraciones, será necesario hacer nuevamente el ajuste siguiendo las recomendaciones del fabricante.

Estos controles de seguridad incluyen el de alta presión, el de baja presión, el interruptor para desarreglo en la lubricación forzada de los compresores y los termostatos del calentador del carter. El ajuste de estos controles debe mantenerse de acuerdo con las instrucciones publicadas por el fabricante.

Lo que sigue en el proceso de inspección, y que suele ser fuente de desarreglos, son los componentes absorbedores y rechazadores de calor. Son los serpentines enfriadores de las unidades manipuladoras de aire, de la congelación de agua o salmuera, cubiertas y tubos de condensadores y condensadores evaporadores.

Es muy importante que la superficie de los serpentines se mantenga limpia y libre de toda suciedad, hilazas, etc. Las superficies enfriadoras sucias de los serpentines dan lugar a fluctuaciones de la presión de succión, que se traducen en supercalentamiento excesivo de succión y oscilación de la válvula de expansión con salida periódica de líquido o aceite.

Las superficies de los serpentines de enfriamiento sucios producen presiones de descarga excesivamente altas, así como elevada temperatura, lo que da por resultado lo siguiente:

1. Carbonización del aceite lubricante y formación de sedimento.
2. Rayado de los vástagos y asiento de las válvulas.
3. Rayado de los pasadores y asiento de las válvulas.
4. Desgaste excesivo de los cilindros, anillos y émbolos, debido a la disminución del espesor de la capa de aceite.
5. Rotura del carter.

Junto con la parte del equipo de transferencia de calor en el lado bajo, también deben comprobarse los controles de flujo del refrigerante. Después de todo esto, vale la pena recordar también, que prevenir es mejor que curar.

7. ANÁLISIS DE COSTOS

7.1 SITUACIÓN ACTUAL

Perdida por baja eficiencia del equipo: El equipo esta trabajando a un 87% de eficiencia, lo cual quiere decir que se esta perdiendo un 13% de capacidad que corresponde a 15.6 ton. El costo de cada tonelada de aire por día es de \$ 40.000, considerando este costo las pérdidas serian de:

$15.6 \text{ ton} \times \$50.000 /\text{ton} \times 30 \text{ días} = \$23'400.000 \text{ mensuales.}$

$\$23'400.000 \times 12 = \$280'800.000$

Mantenimiento Reactivo: Es el mantenimiento que ha utilizado la empresa en el momento que el aire ya se ha dañado. Oscila entre 1'500.000 y 20'000.000 dependiendo de la magnitud del daño y sin incluir los repuestos.

Abanicos: Se incurre en este costo cuando se paro completamente el equipo de aire. El costo promedio de un abanico Patton es de \$100.000 por 30 abanicos que se compran seria de \$3'000.000.

Insatisfacción del cliente y pérdida de imagen del Hotel: Este es un costo intangible pero se ve representado a largo plazo en las finanzas de la empresa ya

que la insatisfacción del cliente actual va a originar que este no se vuelva a hospedar en el hotel y además muy seguramente va a ser transmitida a otros clientes potenciales.

7.2 SITUACIÓN PROPUESTA

Mantenimiento Preventivo: Es el mantenimiento programado que debe realizársele al aire según las recomendaciones del fabricante. Para el tipo de aire York el costo es de \$900.000 + IVA.

Capacitación de los operarios del aire: Esta capacitación puede ser solicitada al SENA como retribución al impuesto que paga el hotel en las cajas de compensación, por lo tanto, esta capacitación no tendría ningún costo para la empresa. Dentro de estos cursos se encuentran mantenimiento preventivo, aire acondicionado y refrigeración.

Costo de repuestos de emergencia: Este es el costo de poseer algunas partes de acuerdo a la vida útil de ellas, deben ser partes críticas que sean muy difíciles de conseguir en corto tiempo y partes con probabilidad de dañarse con mucha frecuencia.

8. CONCLUSIONES

Después de haber realizado el estudio de las fallas en el aire acondicionado York y la causa de no confiabilidad, podemos resaltar la gran importancia que tiene la administración en la confiabilidad y el buen funcionamiento de los equipos. Vale la pena también destacar el mantenimiento preventivo como un componente importante de la confiabilidad puesto sirve como herramienta para evitar fallas en el equipo, pérdidas en el sistema y sobre costos.

En el Hotel Puerta a Paris solo se realiza el mantenimiento correctivo el cual se hace luego de que la falla ocurre ocasionando costos innecesarios. Al obviar la importancia del mantenimiento predictivo, se pasan por alto muchas necesidades de reposición de piezas y de lubricación de partes lo que genera un esfuerzo mayor al equipo, en este caso se abusa del compresor de mayor capacidad puesto que el compresor de menor capacidad esta dañado desde hace 1 año precisamente debido al descuido y despreocupación de la administración, la cual primero debió prever el desgaste de pistones y bielas, teniendo un almacén de reposiciones. Segundo; en caso de no tener reposiciones, destinar un dinero para este tipo de anomalías que suelen ocurrir, en vez de esperar tanto tiempo para arreglar el problema. Esta demora crea ineficiencia en el sistema y por ende insatisfacción al cliente el cual está recibiendo un mal servicio.

Es necesario por tanto tener en cuenta todas las normas de mantenimiento que se han mencionado en este estudio; hacer inspección y pruebas para determinar los desperfectos, Inspección de anotaciones y comprobación de listas, existencia de repuestos esenciales para emergencias además de poseer un personal debidamente adiestrado y bien provisto de herramientas. Si se tiene cuidado y se piensa siempre en la prevención, son muchos los beneficios que se obtienen y los sobrecostos que pueden evitarse.

CASO DE APLICACIÓN No. 2

El sistema a estudiar como segundo ejemplo es la torre de limpieza de malta de la empresa INRAOSK S.A., el cual consta de varios equipos:

- Tres Elevadores de Cangilones
- Dos Desgerminadoras
- Dos Limpiadoras
- Tres Redlers
- Dos Tolvas Buffer
- Tres Tornillos Sinfín
- Una Bascula
- Un Captador de Polvo

1. OBJETO DE ESTUDIO:

El equipo escogido para calcular el impacto de la fiabilidad es el elevador de cangilones # 10, ya que fue este equipo el que presentó mayor número de fallas en el sistema. Aunque la limpiadora A, presenta un número de fallas elevado, se eligió el elevador # 10 porque si la limpiadora A falla, el proceso no se interrumpe por que se puede trabajar por bypass mediante la línea b (que va a la limpiadora

b) hasta que la limpiadora A sea reparada. Mientras que cuando se presentan fallas en el elevador # 10, la producción de la torre de limpieza de malta es interrumpida, lo que genera tiempos improductivos y pérdidas elevadas de dinero, porque no es posible terminar el proceso productivo hasta que sea reparado el elevador.

1.1 Componentes del Elevador de Cangilones:

➤ Unidad Base

- Polea tensora
- Eje
- Chumaceras
- Sistema de tensión
- Carrera de Tensión

➤ Unidad Motriz

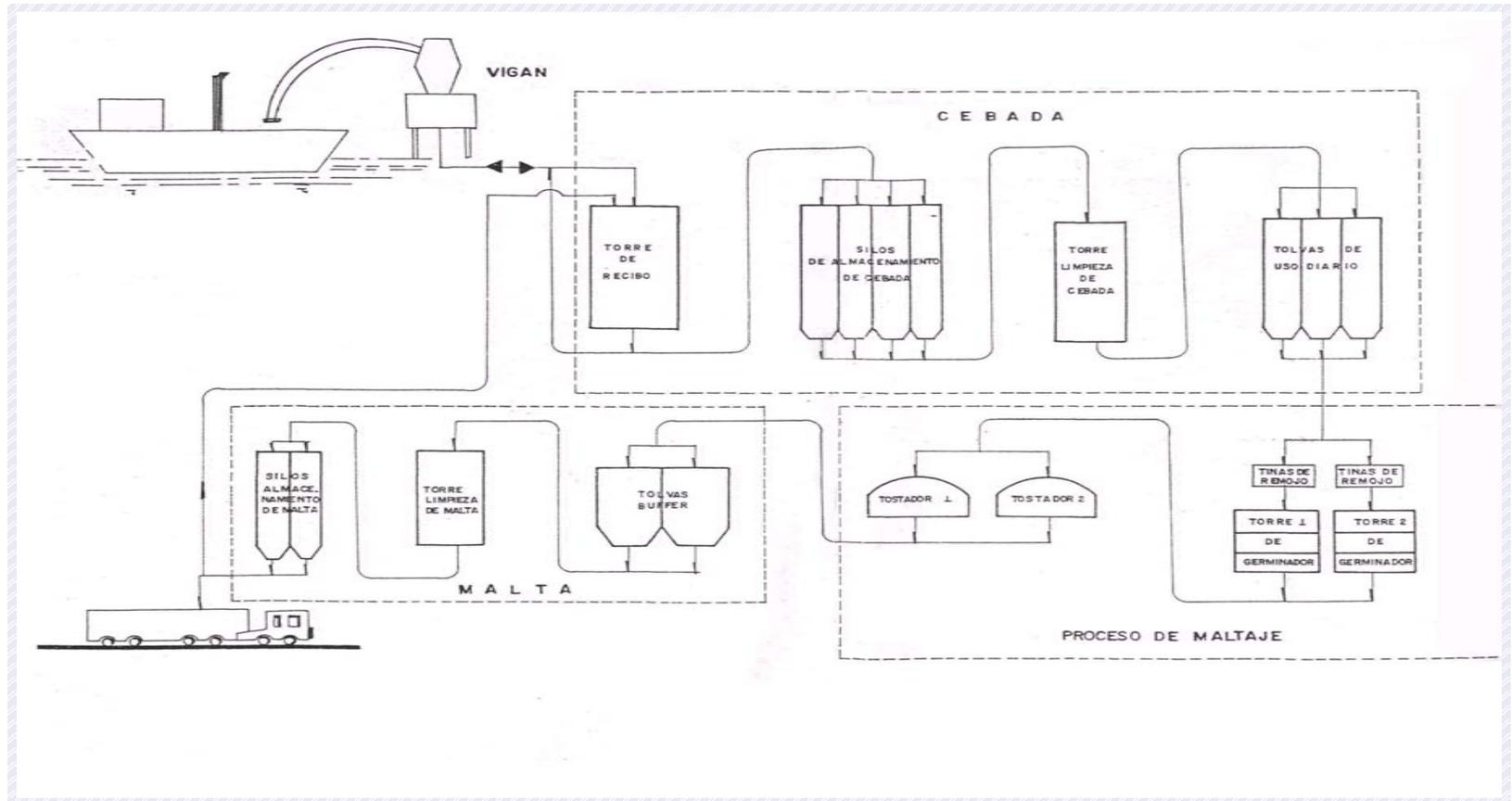
- Polea Motriz
- Eje
- Chumaceras

- **Cangilón**
- **Banda**
- **Conjunto Motriz**
 - Reductor
 - Freno antiretorno
 - Motor
 - Acople Motor-Reductor
 - Base Motriz

- **Combinador**

- **Tornillera.**

1.2 ESTRUCTURA DEL PROCESO INRAOSK



2. HISTORIA DEL EQUIPO

TABLA 4. FALLAS DEL ELEVADOR DE CANGILONES # 10

| FALLAS DEL ELEVADOR 10 | |
|-------------------------------|--|
| FECHA | FALLAS AÑO 2003 |
| Ene-07 | Se dispara el motor por falla trabajando |
| Ene-07 | Se dispara el motor por falla trabajando |
| Ene-10 | El motor presenta falla trabajando se resetea dos veces y se arranca normalmente el proceso. |
| Ene-15 | Se dispara TLM, se encuentra un cangilón en el atrapa cangilón |
| Ene-21 | Falla de giro, atascamiento de la pata del elevador en dos ocasiones, se encuentran cangilones en ambas ocasiones |
| Feb-03 | Falla de giro, elevador atascado |
| Feb-12 | se encuentra que el tornillo del borne del contactor está cruzado |
| Feb-13 | Fallo de giro en el motor, se encuentra un pedazo de lámina y costras ubicadas en el imán lo cual obstruía el normal paso del grano. |
| Feb-16 | Falla de giro en el motor, elevador atascado y un cangilón suelto |
| Feb-17 | Se atasca el elevador |
| Feb-24 | Se atasca el elevador, se encuentra un cangilón atravesado. |
| Mar-05 | Falla de giro en el motor, atascado por laminas y sacos en los imanes de desgerminadoras |
| Abr-05 | Problema de señales por lo que falla se presenta en desgerminadora A |
| Abr-06 | Atascamiento en elevador 10 al arrancar equipos |
| Abr-13 | Falla de giro se dispara elevador, atascada pata elevador y ducto que descarga a desgerminadoras |
| Abr-28 | Falla de giro elevador 10, se encuentra cangilón y elevador atascado |
| Jun-07 | Falla de giro, base del elevador con granos |
| Jun-07 | Nuevamente falla de giro, se revisa y no se encuentra nada |
| Jun-11 | Falla de giro, llama a personal para desatascar y recuperar grano de malta |

| | |
|--------|--|
| Jun-11 | Atascado, se encuentra cangilón y un pedazo de escoba y personal recupera grano en pata del elevador |
| Jun-13 | Falla de giro |
| Jun-13 | Falla de giro, se encuentran 2 cangilones en el ducto que alimentan las desgerminadoras |
| Jun-17 | Falla de giro |
| Jul-26 | Se dispara por falla de giro en el motor del Elevador, se revisa y se encuentra atascado |
| Jul-29 | Se presenta falla de giro en el Elevador, se revisa y se encuentra atascado. |
| Ago-01 | Presenta falla de giro el Elevador, se revisa y se encuentra cangilón en cada uno de los ductos que alimentan de grano las Desgerminadoras "A" y "B". |
| Ago-01 | Se encuentran pedazos de cangilones atravesados en la banda. |
| Ago-01 | Presenta falla de giro el motor del Elevador, se revisa y se encuentra atascado. |
| Ago-05 | Se dispara el Elevador presentando falla de giro, se revisa y se encuentran pedazos de cangilones, guaipe, piedras y sacos en el ducto que descarga hacia la desgerminadora A. |
| Ago-07 | Se presenta falla en el motor del Elevador, se revisa encontrando atascado el elevador. |
| Ago-08 | Presenta falla de giro el motor del Elevador, se revisa y se encuentra atascado. |
| Ago-09 | Falla de giro en Elevador, se encuentran 3 cangilones en el ducto de descargue hacia los desgerminadores. |
| Ago-12 | En la parte superior del Elevador, hay una pequeña fuga de grano. |
| Ago-12 | Se presenta falla de giro en el motor del Elevador, se encuentra elevador atascado. |
| Ago-13 | Se dispara el motor del Elevador presentando falla de giro. Se revisa y se encuentra atascado. |
| Ago-14 | Se atasca elevador. Presenta falla de giro en el motor. |
| Ago-21 | Falla de giro en el motor del Elevador, se revisa y se encuentra un cangilón en los ductos que alimentan a las desgerminadoras. |

| | |
|--------|--|
| Ago-24 | Se dispara por falla de giro el motor del Elevador. |
| Ago-25 | Se dispara por falla de giro el motor del Elevador. Se revisa y se encuentra 3 cangilones. |
| Ago-26 | Se dispara por falla de giro, el motor del Elevador. |
| Sep-09 | Se dispara por falla de giro el motor del Elevador, se revisa y se encuentra unos cangilones enganchados en la parte interna del cabezote. |
| Sep-15 | Se atasca el Elevador, se revisa la trampa encontrando 2 cangilones y un pedazo de platina obstruyendo los ductos. |
| Sep-16 | Presenta falla de giro el motor del elevador. |
| Sep-26 | Se presenta atascamiento en el Elevador, encontrando un cangilón y sacos. |
| Oct-03 | Se dispara el motor del elevador por falla de giro. |

3. CÁLCULOS

Estos datos que a continuación se presentan corresponden a los datos de producción de la empresa:

1. Horas trabajadas por día: 8 horas * 60 minutos = 480 minutos
2. Tiempo de parada planificado por día: $8 \frac{\text{Horas}}{\text{Semana}} * \frac{1\text{Semana}}{7\text{Días}} * \frac{60\text{Minuto}}{1\text{Hora}} = 68$ minutos.
3. Tiempo proyectado de Carga: 480-68 = 412 minutos.
4. Pérdidas de parada por día: (Cambios de turno y otros: 40 minutos, Fallas: (48.750/ 278) =175 minutos) = 40+175 =215 minutos.
5. Tiempo de operación por día: 412-215 = 197 minutos
6. Producción por día: 131 Ton
7. Tiempo estándar de ciclo: 1.5 min./ton
8. Tiempo actual de ciclo: 1.875 min./ton
9. Porcentaje de defectuosos: 0.5%

3.1 Factor de Disponibilidad: La disponibilidad del elevador está dada por la probabilidad que pueda realizar la función que se requiere, en las condiciones dadas y en un tiempo determinado sin ocasionar paradas de producción. Es decir,

las horas que debe trabajar normalmente menos los tiempos totales de parada que se ocasionaron.

$$\frac{\textit{TiempodeCarga} - \textit{TiempodeParadaTotal}}{\textit{TiempodeCarga}} = \frac{480 - 283}{480}$$

DISPONIBILIDAD = 41%

Podemos anotar que posee una disponibilidad muy baja, es decir en el año en estudio el elevador estuvo más tiempo improductivo que trabajando, lo que con certeza ocasionó grandes pérdidas de dinero para la empresa, porque es en éste equipo donde se termina le proceso productivo de la compañía.

3.2 Factor de Eficiencia: La eficiencia de un sistema está dada por la capacidad que ésta tiene para realizar una función específica en un tiempo dado. Es decir, que tan eficiente es el elevador para cumplir con la labor asignada en el tiempo que fue determinado.

$$\frac{\textit{TiempoTeoricodeCiclo} * \textit{Producción}diaria}{\textit{TiempodeOperación}} = \frac{1.5 * 131}{197}$$

EFICIENCIA = 99.7%

Se puede observar que se posee una eficiencia alta, lo que nos permite decir que el elevador si es capaz de realizar esa función y con excelentes resultados. Cabe anotar que aunque se posea una eficiencia alta, no siempre se tiene una efectividad muy buena.

3.3 Factor de Calidad: Es medido por la calidad de los productos que se obtienen, teniendo en cuenta el porcentaje de defectuosos y cual es la capacidad de estos de afectar la calidad del producto, esto se mide evaluando la satisfacción del cliente.

La cantidad procesada se obtiene del producto del tiempo de operación diaria y el tiempo de ciclo. Por tanto,

$$Cantidad\ Procesada = TpoOperardía \times tiempo\ de\ ciclo$$

$$Cantidad\ Procesada = 197 \times 1.5 = 295.5$$

Entonces,

$$\frac{Cantidad\ Procesada - Cantidad\ Defectuosa}{Cantidad\ Procesada} = \frac{295.5 - 1.47}{295.5}$$

FACTOR DE CALIDAD = 99.5%

Como podemos observar el porcentaje de defectuosos es muy bajo, por lo que tenemos un factor de calidad con un alto porcentaje, lo que indica que el producto que sacamos al mercado es de calidad. Podemos decir, que nuestros clientes quedan satisfechos con el producto porque la cantidad de producto que le puede salir con defectos es mínima, además la evaluación hecha por ellos así lo demuestra.

3.4 Efectividad: Es equivalente al producto que se obtiene de la eficiencia, el factor de eficiencia y el factor de calidad.

$$\text{EFECTIVIDAD} = \text{DISPONIBILIDAD} * \text{F. EFICIENCIA} * \text{F. CALIDAD}$$

$$\text{EFECTIVIDAD} = 40.67\%$$

La efectividad del elevador es baja, esto nos permite concluir que aunque los factores de eficiencia y calidad sean altos no son suficientes para tener una alta efectividad, porque el valor relevante es la disponibilidad, que nos permite saber el porcentaje de probabilidad que el equipo realice la función en un tiempo determinado y lo haga bien; y la disponibilidad del Elevador es baja lo que nos ha generado el bajo porcentaje de efectividad que posee.

3.5 PÉRDIDAS DE DINERO EN LA TORRE DE LIMPIEZA DE MALTA

- Pérdidas por tiempo improductivo:

$$\text{Tiempo improductivo día} = 215 \frac{\text{min}}{\text{día}} \times \frac{1 \text{ hora}}{60 \text{ min}} = 3.58 \frac{\text{horas}}{\text{día}}$$

$$\text{Valor hora del tiempo improductivo} = 2666666,66$$

Pérdidas por tiempo improductivo/ año:

$$3.58 \text{ horas/ día} \times \$2666666,66 \times 30 \text{ días} \times 12 \text{ meses} = \mathbf{\$3436799991}$$

- Pérdidas por mantenimiento en paradas de producción:

$$\text{Tiempo improductivo día} = 215 \frac{\text{min}}{\text{día}} \times \frac{1 \text{ hora}}{60 \text{ min}} = 3.58 \frac{\text{horas}}{\text{día}}$$

$$\text{Costos del mantenimiento por hora: } 2131$$

Pérdidas por mantenimiento en paradas de producción/ año:

$$3.58 \text{ horas / día} \times \$2131/ \text{ hora} \times 30 \text{ días} \times 12 \text{ meses} = \mathbf{\$2746433}$$

PÉRDIDAS EN PESOS EN EL PERIODO DE ESTUDIO:

\$3439.546.424

3.6 DISTRIBUCIÓN WEIBULL

➤ Con Regresión en Y

TABLA 5. DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD WEIBULL DEL ELEVADOR DE CANGILONES

| T (i) Horas | i | F (i) | 1/(1-F(i)) | X | Y | XY | X^2 |
|---------------|----|---------|------------|--------|---------|----------|---------|
| 22 | 1 | 0,0036 | | 3,0910 | | -17,4024 | 9,5545 |
| 24 | | 0,0087 | 1,0088 | | -4,7401 | | 10,1000 |
| 40 | 3 | 0,0138 | 1,0140 | 3,6889 | -4,2748 | -15,7694 | 13,6078 |
| 47 | 4 | 0,0189 | 1,0193 | 3,8501 | | -15,2357 | 15,6592 |
| 120 | 5 | 0,0241 | 1,0246 | | -3,7153 | -17,7871 | 22,9201 |
| 132 | 6 | 0,0292 | 1,0300 | 4,8828 | -3,5198 | -17,1866 | 12,3891 |
| 144 | | 0,0343 | 1,0355 | 4,9698 | | -16,6764 | 11,2597 |
| 168 | 8 | | 1,0410 | | -3,2138 | -16,4674 | 26,2550 |
| 191 | 9 | 0,0445 | 1,0466 | 5,2523 | -3,0890 | -16,2245 | 27,5864 |
| 192 | 10 | 0,0496 | 1,0522 | 5,2575 | -2,9776 | -15,6546 | 27,6413 |
| 175 | | 0,0548 | 1,0579 | | -2,8768 | -14,8579 | 8,2759 |
| | 12 | 0,0599 | | 5,4553 | | -15,1917 | 7,7548 |
| 237 | | 0,0650 | | 5,4681 | | -14,7639 | 29,8997 |
| 288 | 14 | 0,0701 | 1,0754 | | -2,6215 | -14,8456 | 6,8724 |
| 290 | 15 | 0,0752 | | 5,6699 | -2,5484 | -14,4488 | 32,1475 |
| 379 | 16 | 0,0803 | 1,0874 | 5,9375 | -2,4798 | -14,7239 | 35,2543 |
| 383 | 17 | | 1,0935 | | -2,4153 | | 35,3791 |
| 432 | 18 | 0,0906 | 1,0996 | 6,0684 | -2,3544 | -14,2874 | 36,8258 |
| 540 | 19 | 0,0957 | 1,1058 | 6,2916 | | -14,4495 | 5,2746 |
| | 20 | 0,1008 | 1,1121 | 6,3135 | -2,2418 | | 39,8609 |
| 576 | 21 | 0,1059 | | | -2,1894 | -13,9164 | 40,4001 |
| | 22 | | 1,1249 | 6,3969 | -2,1395 | | 40,9207 |
| 876 | 23 | | 1,1314 | | -2,0916 | -14,1712 | 45,9056 |
| | 24 | 0,1213 | 1,1380 | 6,7822 | | -13,8738 | 45,9981 |
| 887 | 25 | 0,1264 | 1,1447 | 6,7878 | -2,0014 | -13,5854 | 46,0748 |
| 888 | 26 | 0,1315 | 1,1514 | 6,7890 | -1,9589 | -13,2988 | 46,0901 |
| 912 | 27 | 0,1366 | 1,1583 | 6,8156 | -1,9178 | -13,0712 | 46,4529 |
| 1083 | 28 | 0,1418 | 1,1652 | 6,9875 | -1,8782 | -13,1236 | 48,8250 |
| 1106 | 29 | 0,1469 | 1,1722 | 7,0085 | -1,8398 | -12,8941 | 49,1191 |
| 1116 | 30 | 0,1520 | 1,1792 | 7,0175 | -1,8026 | -12,6498 | 49,2454 |
| 1118 | 31 | 0,1571 | 1,1864 | 7,0193 | -1,7665 | -12,3999 | 49,2705 |
| 1140 | 32 | 0,1622 | 1,1936 | 7,0388 | -1,7315 | -12,1879 | 49,5445 |
| 1152 | 33 | 0,1673 | 1,2010 | 7,0493 | -1,6975 | -11,9661 | 49,6920 |
| 1158 | 34 | 0,1725 | 1,2084 | 7,0544 | -1,6644 | -11,7414 | 49,7653 |

| | | | | | | | | |
|------|----|--------|--------|--------|---------|----------|---------|--------|
| 1168 | 35 | 0,1776 | 1,2159 | 7,0630 | -1,6321 | -11,5279 | 49,8866 | 2,6639 |
| 1169 | 36 | 0,1827 | | 7,0639 | -1,6007 | -11,3073 | 49,8987 | 2,5623 |
| 1194 | 37 | 0,1878 | 1,2313 | 7,0851 | -1,5701 | -11,1240 | 50,1981 | 2,4651 |
| 1195 | 38 | 0,1929 | 1,2391 | 7,0859 | -1,5401 | -10,9132 | 50,2100 | 2,3720 |
| 1212 | 39 | 0,1981 | 1,2470 | 7,1000 | -1,5109 | -10,7273 | 50,4104 | 2,2828 |
| 1224 | 40 | 0,2032 | 1,2550 | 7,1099 | -1,4823 | -10,5389 | 50,5504 | 2,1972 |
| 1368 | 41 | 0,2083 | 1,2631 | 7,2211 | -1,4543 | -10,5017 | 52,1444 | 2,1150 |
| 1392 | 42 | 0,2134 | 1,2713 | 7,2385 | -1,4269 | -10,3288 | 52,3958 | 2,0361 |
| 1512 | 43 | 0,2185 | 1,2796 | 7,3212 | -1,4001 | -10,2504 | 53,5998 | 1,9603 |
| 1560 | 44 | 0,2236 | 1,2881 | 7,3524 | -1,3738 | -10,1008 | 54,0584 | 1,8873 |
| 1594 | 45 | 0,2288 | | 7,3740 | -1,3480 | -9,9402 | 54,3759 | 1,8171 |
| 1619 | 46 | 0,2339 | 1,3053 | 7,3896 | -1,3227 | -9,7742 | 54,6057 | 1,7495 |
| 1762 | 47 | 0,2390 | 1,3141 | 7,4742 | -1,2979 | -9,7004 | 55,8637 | 1,6844 |
| 1884 | 48 | 0,2441 | | 7,5412 | -1,2734 | -9,6033 | 56,8690 | 1,6217 |
| 1909 | 49 | | 1,3320 | 7,5543 | -1,2495 | -9,4389 | 57,0680 | 1,5612 |
| 2007 | 50 | 0,2544 | 1,3411 | 7,6044 | -1,2259 | -9,3221 | | 1,5028 |
| 2020 | 51 | 0,2595 | 1,3504 | 7,6109 | -1,2027 | -9,1535 | 57,9251 | 1,4465 |
| 2039 | 52 | | 1,3598 | 7,6202 | -1,1799 | -8,9908 | 58,0677 | 1,3921 |
| 2138 | 53 | 0,2697 | 1,3693 | 7,6676 | -1,1574 | -8,8745 | 58,7925 | 1,3396 |
| 2167 | 54 | 0,2748 | 1,3790 | 7,6811 | -1,1353 | -8,7201 | 58,9993 | 1,2888 |
| 2225 | 55 | 0,2799 | 1,3888 | 7,7075 | -1,1135 | -8,5821 | 59,4057 | 1,2398 |
| 2348 | 56 | 0,2851 | 1,3987 | 7,7613 | -1,0920 | -8,4752 | 60,2381 | 1,1924 |
| 2368 | 57 | 0,2902 | 1,4088 | 7,7698 | -1,0708 | -8,3199 | 60,3698 | 1,1466 |
| 2411 | 58 | 0,2953 | 1,4190 | 7,7878 | -1,0499 | -8,1764 | 60,6498 | 1,1023 |
| 2412 | 59 | 0,3004 | 1,4294 | 7,7882 | -1,0293 | -8,0163 | 60,6562 | 1,0594 |
| 2419 | 60 | | 1,4399 | 7,7911 | -1,0089 | -7,8608 | 60,7014 | 1,0180 |
| 2458 | 61 | 0,3106 | 1,4506 | 7,8071 | -0,9889 | -7,7202 | 60,9509 | 0,9779 |
| 2480 | 62 | 0,3158 | 1,4615 | | -0,9690 | | 61,0901 | 0,9390 |
| 2496 | 63 | 0,3209 | 1,4725 | 7,8224 | -0,9494 | -7,4269 | 61,1906 | 0,9014 |
| 2511 | 64 | 0,3260 | 1,4837 | 7,8284 | -0,9301 | -7,2811 | 61,2844 | 0,8650 |
| 2513 | 65 | 0,3311 | | 7,8292 | -0,9109 | -7,1320 | | 0,8298 |
| | 66 | 0,3362 | 1,5066 | 7,8407 | -0,8920 | -6,9941 | 61,4767 | |
| 2543 | 67 | 0,3414 | | 7,8411 | | -6,8478 | 61,4828 | 0,7627 |
| 2544 | 68 | 0,3465 | 1,5301 | 7,8415 | -0,8548 | -6,7030 | 61,4890 | 0,7307 |
| 2601 | 69 | 0,3516 | 1,5422 | 7,8637 | -0,8365 | -6,5779 | 61,8370 | 0,6997 |
| 2602 | 70 | 0,3567 | 1,5545 | 7,8640 | -0,8184 | -6,4357 | 61,8431 | 0,6697 |
| 2642 | 71 | 0,3618 | 1,5670 | | -0,8004 | | 62,0832 | 0,6407 |
| 2664 | 72 | 0,3669 | 1,5796 | 7,8876 | -0,7827 | -6,1733 | 62,2140 | 0,6126 |
| 2745 | 73 | 0,3721 | 1,5925 | 7,9175 | -0,7651 | -6,0574 | 62,6874 | 0,5853 |
| 2792 | 74 | 0,3772 | | 7,9345 | -0,7476 | -5,9320 | 62,9565 | 0,5589 |
| 2801 | 75 | 0,3823 | 1,6189 | 7,9377 | -0,7303 | -5,7973 | 63,0076 | 0,5334 |
| 2815 | 76 | 0,3874 | 1,6324 | 7,9427 | -0,7132 | -5,6650 | | 0,5087 |
| | 77 | 0,3925 | 1,6462 | 7,9732 | -0,6963 | -5,5513 | 63,5712 | 0,4848 |
| 2914 | 78 | 0,3976 | 1,6602 | 7,9773 | -0,6794 | | 63,6370 | |
| 2920 | 79 | 0,4028 | | 7,9793 | -0,6627 | -5,2881 | 63,6698 | |
| 2936 | 80 | | 1,6889 | 7,9848 | -0,6462 | -5,1596 | 63,7571 | |

| | | | | | | | | |
|------|-----|--------|--------|--------|---------|---------|---------|--------|
| 2952 | 81 | | 1,7036 | 7,9902 | -0,6297 | -5,0318 | 63,8439 | 0,3966 |
| 3000 | 82 | 0,4181 | 1,7186 | 8,0064 | -0,6134 | -4,9114 | 64,1019 | 0,3763 |
| 3024 | 83 | 0,4232 | 1,7338 | 8,0143 | -0,5973 | -4,7866 | 64,2296 | 0,3567 |
| 3065 | 84 | 0,4284 | 1,7493 | 8,0278 | -0,5812 | -4,6657 | | 0,3378 |
| 3173 | 85 | | 1,7651 | 8,0624 | -0,5652 | | 65,0028 | 0,3195 |
| 3243 | 86 | 0,4386 | 1,7812 | 8,0843 | -0,5494 | -4,4414 | 65,3552 | 0,3018 |
| 3354 | 87 | 0,4437 | 1,7976 | 8,1179 | -0,5337 | -4,3322 | 65,9004 | 0,2848 |
| 3364 | 88 | 0,4488 | | 8,1209 | | -4,2068 | 65,9488 | |
| 3365 | 89 | 0,4539 | 1,8313 | 8,1212 | -0,5025 | -4,0807 | 65,9536 | 0,2525 |
| 3530 | 90 | 0,4591 | 1,8486 | 8,1691 | -0,4870 | -3,9786 | 66,7334 | 0,2372 |
| 3572 | 91 | 0,4642 | 1,8663 | 8,1809 | -0,4717 | -3,8588 | 66,9268 | 0,2225 |
| 3719 | 92 | 0,4693 | 1,8843 | 8,2212 | -0,4564 | -3,7523 | 67,5883 | 0,2083 |
| 3779 | 93 | 0,4744 | 1,9026 | 8,2372 | -0,4412 | -3,6346 | 67,8517 | 0,1947 |
| 3780 | 94 | 0,4795 | 1,9213 | 8,2375 | -0,4261 | -3,5104 | | 0,1816 |
| 3816 | | 0,4846 | 1,9404 | 8,2470 | -0,4111 | -3,3905 | 68,0123 | 0,1690 |
| 3841 | 96 | 0,4898 | 1,9599 | 8,2535 | -0,3962 | -3,2699 | 68,1201 | 0,1570 |
| 3843 | 97 | 0,4949 | 1,9797 | 8,2540 | -0,3813 | -3,1474 | 68,1287 | |
| 3945 | 98 | | 2,0000 | 8,2802 | -0,3665 | | 68,5618 | 0,1343 |
| 3948 | 99 | 0,5051 | 2,0207 | 8,2810 | -0,3518 | -2,9131 | | 0,1237 |
| 3984 | | 0,5102 | 2,0418 | 8,2900 | -0,3371 | | 68,7248 | |
| 3986 | 101 | 0,5154 | 2,0634 | 8,2905 | -0,3225 | -2,6737 | 68,7331 | |
| 3988 | 102 | 0,5205 | 2,0854 | 8,2910 | -0,3080 | -2,5532 | 68,7414 | 0,0948 |
| 4030 | | 0,5256 | 2,1079 | 8,3015 | -0,2935 | -2,4362 | 68,9153 | 0,0861 |
| 4094 | 104 | 0,5307 | 2,1309 | 8,3173 | -0,2790 | -2,3207 | 69,1771 | 0,0779 |
| 4152 | 105 | 0,5358 | 2,1544 | | -0,2646 | -2,2047 | 69,4113 | 0,0700 |
| 4153 | 106 | 0,5409 | 2,1784 | 8,3316 | | -2,0853 | | 0,0626 |
| 4156 | | 0,5461 | 2,2029 | 8,3323 | -0,2360 | -1,9663 | 69,4274 | 0,0557 |
| 4180 | 108 | 0,5512 | 2,2281 | 8,3381 | -0,2217 | -1,8488 | 69,5234 | 0,0492 |
| 4192 | 109 | 0,5563 | 2,2537 | 8,3409 | -0,2075 | -1,7309 | 69,5712 | 0,0431 |
| 4193 | | 0,5614 | | 8,3412 | | -1,6127 | 69,5751 | 0,0374 |
| 4194 | 111 | 0,5665 | | 8,3414 | -0,1792 | -1,4948 | | 0,0321 |
| | 112 | 0,5716 | 2,3345 | 8,3416 | -0,1651 | -1,3772 | 69,5831 | 0,0273 |
| 4200 | 113 | 0,5768 | 2,3628 | 8,3428 | -0,1510 | -1,2599 | 69,6030 | 0,0228 |
| 4221 | 114 | 0,5819 | 2,3917 | 8,3478 | -0,1370 | -1,1434 | 69,6862 | 0,0188 |
| 4230 | 115 | 0,5870 | 2,4213 | 8,3500 | -0,1229 | -1,0266 | 69,7218 | 0,0151 |
| 4413 | 116 | 0,5921 | 2,4517 | 8,3923 | -0,1089 | -0,9143 | 70,4309 | 0,0119 |
| | 117 | 0,5972 | 2,4828 | 8,4007 | -0,0950 | -0,7978 | 70,5711 | 0,0090 |
| 4468 | 118 | 0,6024 | 2,5148 | 8,4047 | -0,0810 | -0,6808 | 70,6389 | 0,0066 |
| 4493 | 119 | 0,6075 | 2,5476 | 8,4103 | -0,0671 | -0,5639 | 70,7327 | 0,0045 |
| 4512 | 120 | 0,6126 | 2,5812 | 8,4145 | -0,0531 | -0,4469 | 70,8037 | 0,0028 |
| 4641 | 121 | 0,6177 | | 8,4427 | -0,0392 | -0,3309 | 71,2789 | 0,0015 |
| 4722 | 122 | 0,6228 | | 8,4600 | -0,0253 | -0,2138 | 71,5714 | 0,0006 |
| 4831 | | 0,6279 | 2,6878 | 8,4828 | -0,0114 | -0,0963 | 71,9580 | 0,0001 |
| 4976 | 124 | | 2,7252 | | 0,0026 | 0,0217 | 72,4606 | |
| 5034 | 125 | 0,6382 | | 8,5240 | 0,0165 | 0,1404 | 72,6581 | 0,0003 |
| | 126 | 0,6433 | 2,8034 | 8,5382 | 0,0304 | 0,2594 | 72,9004 | 0,0009 |

| | | | | | | | | |
|------|-----|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|
| 5116 | 127 | 0,6484 | 2,8443 | 8,5401 | 0,0443 | 0,3784 | 72,9338 | 0,0020 |
| 5160 | 128 | 0,6535 | 2,8863 | | 0,0582 | | 73,0801 | 0,0034 |
| 5162 | 129 | 0,6586 | 2,9295 | 8,5491 | 0,0722 | 0,6170 | 73,0868 | 0,0052 |
| 5184 | 130 | 0,6638 | 2,9741 | 8,5533 | 0,0861 | 0,7367 | 73,1595 | 0,0074 |
| | 131 | | 3,0201 | 8,5499 | 0,1001 | 0,8559 | 73,1000 | 0,0100 |
| 5223 | 132 | 0,6740 | 3,0675 | 8,5608 | | 0,9768 | 73,2878 | 0,0130 |
| 5252 | 133 | 0,6791 | 3,1164 | 8,5664 | 0,1281 | 1,0975 | 73,3826 | 0,0164 |
| 5267 | 134 | 0,6842 | 3,1669 | 8,5692 | 0,1422 | 1,2182 | 73,4315 | 0,0202 |
| 5268 | 135 | | 3,2191 | 8,5694 | 0,1562 | 1,3389 | 73,4347 | 0,0244 |
| | 136 | 0,6945 | 3,2730 | 8,5702 | 0,1703 | 1,4599 | 73,4477 | 0,0290 |
| 5324 | 137 | 0,6996 | 3,3288 | 8,5800 | 0,1845 | 1,5829 | 73,6161 | 0,0340 |
| 5328 | | 0,7047 | 3,3865 | 8,5807 | 0,1987 | 1,7048 | 73,6289 | 0,0395 |
| 5331 | 139 | | 3,4462 | 8,5813 | 0,2129 | 1,8271 | 73,6386 | 0,0453 |
| 5332 | 140 | 0,7149 | 3,5081 | 8,5815 | 0,2272 | 1,9496 | 73,6418 | |
| 5352 | 141 | 0,7201 | 3,5722 | 8,5852 | 0,2415 | 2,0735 | 73,7061 | 0,0583 |
| 5364 | 142 | 0,7252 | 3,6387 | 8,5875 | 0,2559 | 2,1976 | 73,7446 | |
| 5376 | 143 | 0,7303 | 3,7078 | 8,5897 | 0,2704 | 2,3223 | 73,7829 | |
| 5392 | 144 | 0,7354 | 3,7795 | 8,5927 | 0,2849 | 2,4478 | 73,8340 | 0,0812 |
| 5393 | 145 | 0,7405 | 3,8540 | 8,5929 | 0,2995 | 2,5732 | | 0,0897 |
| 5394 | 146 | | 3,9316 | | 0,3141 | 2,6992 | 73,8404 | |
| 5417 | 147 | 0,7508 | 4,0123 | 8,5973 | 0,3289 | | 73,9135 | 0,1081 |
| 5424 | 148 | | 4,0964 | 8,5986 | 0,3437 | | 73,9357 | 0,1181 |
| 5439 | 149 | 0,7610 | | 8,6014 | | 3,0843 | 73,9832 | 0,1286 |
| 5442 | 150 | | 4,2757 | 8,6019 | | 3,2136 | 73,9927 | 0,1396 |
| 5447 | 151 | 0,7712 | 4,3714 | 8,6028 | 0,3887 | | 74,0085 | |
| 5448 | 152 | | 4,4714 | 8,6030 | 0,4039 | 3,4750 | 74,0117 | 0,1632 |
| 5456 | | 0,7815 | | 8,6045 | 0,4193 | 3,6076 | 74,0369 | 0,1758 |
| | 154 | | 4,6859 | 8,6048 | | 3,7408 | 74,0432 | 0,1890 |
| 5479 | 155 | | 4,8010 | 8,6087 | | 3,8767 | | 0,2028 |
| 5627 | | 0,7968 | | 8,6353 | | 4,0246 | | 0,2172 |
| 5628 | | 0,8019 | | 8,6355 | | 4,1618 | 74,5720 | 0,2323 |
| | 158 | 0,8071 | | 8,6392 | 0,4980 | 4,3021 | 74,6364 | 0,2480 |
| | 159 | 0,8122 | 5,3243 | 8,6538 | | 4,4496 | 74,8886 | |
| 5755 | 160 | 0,8173 | | 8,6578 | 0,5306 | 4,5936 | 74,9579 | 0,2815 |
| 5761 | | 0,8224 | 5,6311 | | 0,5471 | 4,7376 | 74,9760 | 0,2994 |
| 5768 | 162 | 0,8275 | | 8,6601 | 0,5639 | 4,8836 | 74,9970 | 0,3180 |
| | 163 | 0,8327 | | 8,6697 | 0,5809 | 5,0364 | 75,1644 | 0,3375 |
| 5872 | | 0,8378 | 6,1640 | 8,6780 | 0,5981 | 5,1906 | 75,3068 | 0,3578 |
| | 165 | 0,8429 | 6,3648 | 8,6783 | 0,6156 | 5,3424 | | 0,3790 |
| 5875 | 166 | 0,8480 | 6,5791 | 8,6785 | | 5,4965 | 75,3157 | 0,4011 |
| 5876 | 167 | 0,8531 | 6,8084 | 8,6786 | 0,6514 | 5,6529 | 75,3186 | 0,4243 |
| 5904 | | 0,8582 | 7,0542 | 8,6834 | 0,6697 | 5,8151 | 75,4012 | 0,4485 |
| | 169 | 0,8634 | 7,3184 | 8,7043 | 0,6883 | 5,9914 | | 0,4738 |
| | 170 | | 7,6031 | 8,7113 | | 6,1617 | 75,8864 | 0,5003 |
| 6050 | | 0,8736 | 7,9109 | | 0,7267 | | 75,8260 | |
| 6119 | 172 | | 8,2447 | 8,7192 | | 6,5087 | | 0,5572 |

| | | | | | | | | |
|---------------|--------------|-------------|-------------|-------------|--------|---------------|--------------|--------------|
| 6150 | 173 | 0,8838 | | 8,7242 | | 6,6890 | 76,1118 | 0,5879 |
| 6170 | 174 | 0,8889 | 9,0046 | 8,7275 | | 6,8722 | | 0,6200 |
| 6172 | | 0,8941 | 9,4396 | 8,7278 | 0,8087 | | 76,1741 | |
| 6264 | 176 | 0,8992 | 9,9188 | 8,7426 | 0,8305 | 7,2606 | 76,4326 | 0,6897 |
| 6286 | 177 | 0,9043 | 10,4492 | 8,7461 | 0,8529 | 7,4598 | 76,4939 | |
| 6339 | 178 | 0,9094 | 11,0395 | | 0,8761 | 7,6697 | 76,6409 | 0,7675 |
| | 179 | 0,9145 | 11,7006 | | 0,9000 | | 76,7702 | 0,8100 |
| 6388 | 180 | 0,9197 | | 8,7622 | 0,9248 | | 76,7757 | 0,8553 |
| 6399 | 181 | 0,9248 | 13,2925 | 8,7639 | | 8,3308 | 76,8059 | 0,9036 |
| 6432 | 182 | | 14,2628 | | 0,9774 | | 76,8961 | 0,9554 |
| 6469 | | 0,9350 | | 8,7748 | 1,0056 | 8,8236 | | 1,0112 |
| 6515 | 184 | 0,9401 | 16,7009 | 8,7819 | 1,0351 | 9,0903 | 77,1211 | 1,0715 |
| 6575 | 185 | 0,9452 | 18,2617 | 8,7910 | 1,0664 | 9,3745 | 77,2822 | 1,1371 |
| 6585 | 186 | 0,9504 | 20,1443 | 8,7925 | 1,0996 | 9,6682 | 77,3089 | 1,2091 |
| 6598 | 187 | 0,9555 | 22,4598 | 8,7945 | 1,1352 | 9,9833 | 77,3436 | 1,2886 |
| 6599 | 188 | 0,9606 | | 8,7947 | | 10,3220 | 77,3463 | |
| 6606 | 189 | 0,9657 | 29,1642 | 8,7957 | 1,2158 | 10,6937 | 77,3649 | 1,4781 |
| 6612 | 190 | | 34,2807 | | 1,2626 | 11,1066 | 77,3809 | 1,5941 |
| | 191 | 0,9759 | 41,5745 | 8,7975 | 1,3157 | | 77,3969 | |
| 6624 | | 0,9811 | | 8,7985 | | 12,1237 | | 1,8987 |
| 6636 | 193 | 0,9862 | | 8,8003 | 1,4544 | 12,7989 | 77,4447 | 2,1152 |
| 6666 | 194 | | 114,9412 | | 1,5570 | 13,7088 | 77,5241 | |
| 6677 | 195 | | 279,1429 | 8,8064 | 1,7284 | 15,2212 | 77,5531 | 2,9874 |
| 704774 | 19110 | 97,5 | 1269 | 1529 | | -610,3 | 12230 | 371,2 |

Después de haber realizado la Regresión Lineal, podemos reemplazar en la fórmula para hallar **a** y **β**:

$$a = \frac{\sum x^2 \sum y - \sum X \sum xy}{n \sum x^2 - (\sum x)^2}$$

a = -8.9947

$$b = \beta = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2}$$

$$\beta = 1.074$$

Luego de obtener estos valores reemplazamos y obtenemos la ecuación:

$$5.1.1.1.1 \quad Y = 1.074 X - 8.9947$$

Con los valores de a y β obtenemos el parámetro η :

$$\eta = e^{\frac{a}{-\beta}} = e^{\frac{8.9947}{-1.074}}$$

$$\eta = 4337.066$$

➤ **PROBABILIDAD DE FALLA:** $R(t) = e - \left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta$

$$R(6677) = e^{-\left[\frac{6677}{4337.066}\right]^{1.074}}$$

PROBABILIDAD DE FALLA $R(6677) = 0.7959$

➤ **CONFIABILIDAD** = $1 - R(6677) = 1 - 0.7959$

CONFIABILIDAD = 0.20403

TABLA 6. CÁLCULO DE LA CONFIABILIDAD DEL ELEVADOR DE CANGILONES.

| 6 CALCULO DE LA CONFIABILIDAD | | | | | | | | |
|--------------------------------------|-------------------|---------------|-----------------|---------------|-------------------|-----------------|-------------------|--------------------|
| PARAMETRO DE POSICION = 0 | | | | | | | | |
| PARAMETRO DE FORMA = 1.074 | | | | | | | | |
| PARAMETRO ESCALAR = 4337.066 | | | | | | | | |
| T(i) (horas) | Prob. de falla | Confiabilidad | T(i) (horas) | Confiabilidad | Prob. de falla | T(i) (horas) | Prob. de falla | Confia- bilidad |
| 0 | 1 | 0 | 2513 | 0,573 | 0,427 | 5184 | 0,298 | 0,702 |
| 22 | 0,997 | 0,00342506 | 2542 | 0,569 | 0,431 | 5166 | 0,299 | 0,701 |
| 24 | 0,996 | 0,00375994 | 2543 | 0,569 | 0,431 | 5223 | 0,295 | 0,705 |
| 40 | 0,994 | 0,00649903 | 2544 | 0,569 | 0,431 | 5252 | 0,293 | 0,707 |
| 47 | 0,992 | 0,00772328 | 2601 | 0,561 | 0,439 | 5267 | 0,292 | 0,708 |
| 120 | 0,979 | 0,02099389 | 2602 | 0,561 | 0,439 | 5268 | 0,292 | 0,708 |
| 132 | 0,977 | 0,02323025 | 2642 | 0,556 | 0,444 | 5272 | 0,291 | 0,709 |
| 144 | 0,975 | 0,02547657 | 2664 | 0,553 | 0,447 | 5324 | 0,288 | 0,712 |
| 168 | 0,970 | 0,02999422 | 2745 | 0,542 | 0,458 | 5328 | 0,287 | 0,713 |
| 191 | 0,966 | 0,03434895 | 2792 | 0,536 | 0,464 | 5331 | 0,287 | 0,713 |
| 192 | 0,965 | 0,03453876 | 2801 | 0,535 | 0,465 | 5332 | 0,287 | 0,713 |
| 175 | 0,969 | 0,03131724 | 2815 | 0,533 | 0,467 | 5352 | 0,286 | 0,714 |
| 234 | 0,957 | 0,04253869 | 2902 | 0,522 | 0,478 | 5364 | 0,285 | 0,715 |
| 237 | 0,957 | 0,04311187 | 2914 | 0,521 | 0,479 | 5376 | 0,284 | 0,716 |

| | | | | | | | | |
|------|-------|------------|------|-------|-------|------|-------|-------|
| 288 | 0,947 | 0,05288041 | 2920 | 0,520 | 0,480 | 5392 | 0,283 | 0,717 |
| 290 | 0,947 | 0,05326421 | 2936 | 0,518 | 0,482 | 5393 | 0,283 | 0,717 |
| 379 | 0,930 | 0,07036591 | 2952 | 0,516 | 0,484 | 5394 | 0,283 | 0,717 |
| 383 | 0,929 | 0,07113475 | 3000 | 0,510 | 0,490 | 5417 | 0,281 | 0,719 |
| 432 | 0,919 | 0,08054771 | 3024 | 0,507 | 0,493 | 5424 | 0,280 | 0,720 |
| 540 | 0,899 | 0,10122194 | 3065 | 0,502 | 0,498 | 5439 | 0,279 | 0,721 |
| 552 | 0,896 | 0,10351011 | 3173 | 0,489 | 0,511 | 5442 | 0,279 | 0,721 |
| 576 | 0,892 | 0,10807989 | 3243 | 0,481 | 0,519 | 5447 | 0,279 | 0,721 |
| 600 | 0,887 | 0,11264039 | 3354 | 0,468 | 0,532 | 5448 | 0,279 | 0,721 |
| 876 | 0,836 | 0,16425556 | 3364 | 0,467 | 0,533 | 5456 | 0,278 | 0,722 |
| 882 | 0,835 | 0,16535824 | 3365 | 0,467 | 0,533 | 5458 | 0,278 | 0,722 |
| 887 | 0,834 | 0,16627645 | 3530 | 0,449 | 0,551 | 5479 | 0,277 | 0,723 |
| 888 | 0,834 | 0,16646001 | 3572 | 0,444 | 0,556 | 5627 | 0,266 | 0,734 |
| 912 | 0,829 | 0,17085804 | 3719 | 0,428 | 0,572 | 5628 | 0,266 | 0,734 |
| 1083 | 0,798 | 0,20175694 | 3779 | 0,422 | 0,578 | 5649 | 0,265 | 0,735 |
| 1106 | 0,794 | 0,20585241 | 3780 | 0,422 | 0,578 | 5732 | 0,259 | 0,741 |
| 1116 | 0,792 | 0,20762846 | 3816 | 0,418 | 0,582 | 5755 | 0,258 | 0,742 |
| 1118 | 0,792 | 0,20798333 | 3841 | 0,416 | 0,584 | 5761 | 0,258 | 0,742 |
| 1140 | 0,788 | 0,21187953 | 3843 | 0,416 | 0,584 | 5768 | 0,257 | 0,743 |
| 1152 | 0,786 | 0,21399899 | 3945 | 0,405 | 0,595 | 5824 | 0,253 | 0,747 |
| 1158 | 0,785 | 0,21505719 | 3948 | 0,405 | 0,595 | 5872 | 0,250 | 0,750 |
| 1168 | 0,783 | 0,21681859 | 3984 | 0,401 | 0,599 | 5874 | 0,250 | 0,750 |
| 1169 | 0,783 | 0,21699458 | 3986 | 0,401 | 0,599 | 5875 | 0,250 | 0,750 |
| 1194 | 0,779 | 0,22138493 | 3988 | 0,401 | 0,599 | 5876 | 0,250 | 0,750 |
| 1195 | 0,778 | 0,22156017 | 4030 | 0,397 | 0,603 | 5904 | 0,248 | 0,752 |
| 1212 | 0,775 | 0,22453493 | 4094 | 0,391 | 0,609 | 6029 | 0,241 | 0,759 |
| 1224 | 0,773 | 0,22662976 | 4152 | 0,385 | 0,615 | 6071 | 0,238 | 0,762 |
| 1368 | 0,749 | 0,25144175 | 4153 | 0,385 | 0,615 | 6050 | 0,239 | 0,761 |
| 1392 | 0,744 | 0,25551797 | 4156 | 0,385 | 0,615 | 6119 | 0,235 | 0,765 |
| 1512 | 0,724 | 0,27564275 | 4180 | 0,382 | 0,618 | 6150 | 0,233 | 0,767 |
| 1560 | 0,716 | 0,28357239 | 4192 | 0,381 | 0,619 | 6170 | 0,232 | 0,768 |
| 1594 | 0,711 | 0,28914747 | 4193 | 0,381 | 0,619 | 6172 | 0,232 | 0,768 |
| 1619 | 0,707 | 0,29322466 | 4194 | 0,381 | 0,619 | 6264 | 0,227 | 0,773 |
| 1762 | 0,684 | 0,31618539 | 4195 | 0,381 | 0,619 | 6286 | 0,225 | 0,775 |
| 1884 | 0,665 | 0,33528869 | 4200 | 0,381 | 0,619 | 6339 | 0,222 | 0,778 |
| 1909 | 0,661 | 0,33914821 | 4221 | 0,379 | 0,621 | 6386 | 0,220 | 0,780 |
| 2007 | 0,646 | 0,35409741 | 4230 | 0,378 | 0,622 | 6388 | 0,220 | 0,780 |
| 2020 | 0,644 | 0,35605895 | 4413 | 0,361 | 0,639 | 6399 | 0,219 | 0,781 |
| 2039 | 0,641 | 0,35891679 | 4450 | 0,358 | 0,642 | 6432 | 0,217 | 0,783 |
| 2138 | 0,626 | 0,37363438 | 4468 | 0,356 | 0,644 | 6469 | 0,215 | 0,785 |
| 2167 | 0,622 | 0,37789075 | 4493 | 0,354 | 0,646 | 6515 | 0,213 | 0,787 |
| 2225 | 0,614 | 0,38632931 | 4512 | 0,352 | 0,648 | 6575 | 0,209 | 0,791 |
| 2348 | 0,596 | 0,40389958 | 4641 | 0,341 | 0,659 | 6585 | 0,209 | 0,791 |

| | | | | | | | | |
|-----------------------------|-------|------------|------|-------|-------|-------------|--------------|--------------|
| 2368 | 0,593 | 0,40671502 | 4722 | 0,334 | 0,666 | 6598 | 0,208 | 0,792 |
| 2411 | 0,587 | 0,41272913 | 4831 | 0,325 | 0,675 | 6599 | 0,208 | 0,792 |
| 2412 | 0,587 | 0,41286836 | 4976 | 0,314 | 0,686 | 6606 | 0,208 | 0,792 |
| 2419 | 0,586 | 0,41384216 | 5034 | 0,309 | 0,691 | 6612 | 0,207 | 0,793 |
| 2458 | 0,581 | 0,41924191 | 5106 | 0,304 | 0,696 | 6618 | 0,207 | 0,793 |
| 2480 | 0,578 | 0,42226873 | 5116 | 0,303 | 0,697 | 6624 | 0,207 | 0,793 |
| 2496 | 0,576 | 0,42446137 | 5160 | 0,300 | 0,700 | 6636 | 0,206 | 0,794 |
| 2511 | 0,573 | 0,42651036 | 5162 | 0,299 | 0,701 | 6666 | 0,205 | 0,795 |
| AL FINAL DEL ESTUDIO | | | | | | 6677 | 0,204 | 0,796 |

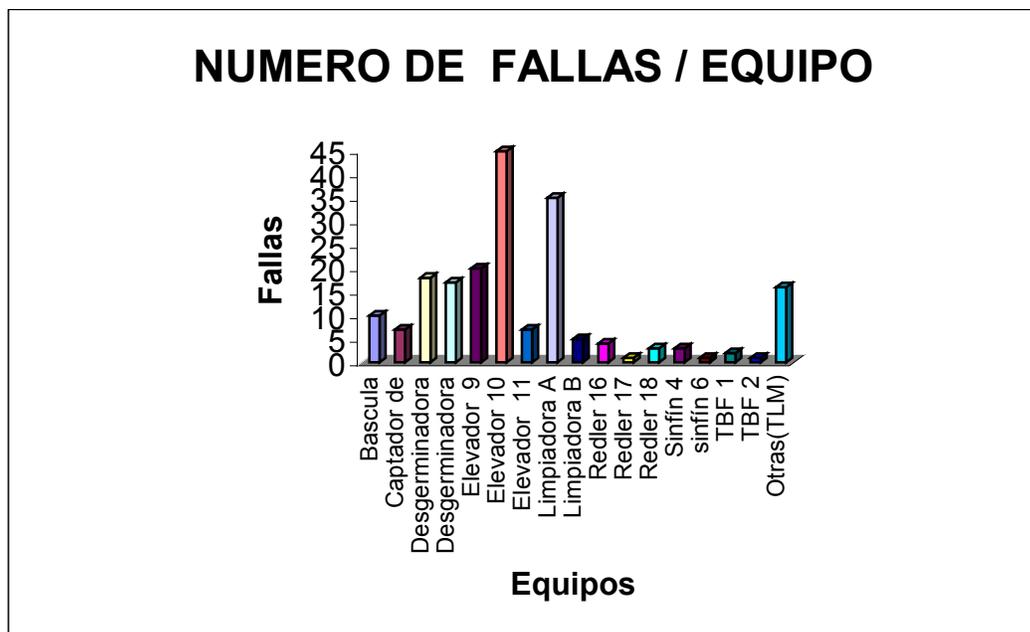
3.6.1 GRAFICO DE LA CONFIABILIDAD

FIGURA 5. GRÁFICO DE LA CONFIABILIDAD.



3.6.2 GRAFICA NUMERO DE FALLAS / EQUIPO

FIGURA 6. GRAFICA NÚMERO DE FALLAS/ EQUIPO.



3.6.3 GRAFICA PORCENTAJE FALLAS/ EQUIPO

FIGURA 7. GRÁFICA PORCENTAJE DE FALLAS/ EQUIPO.

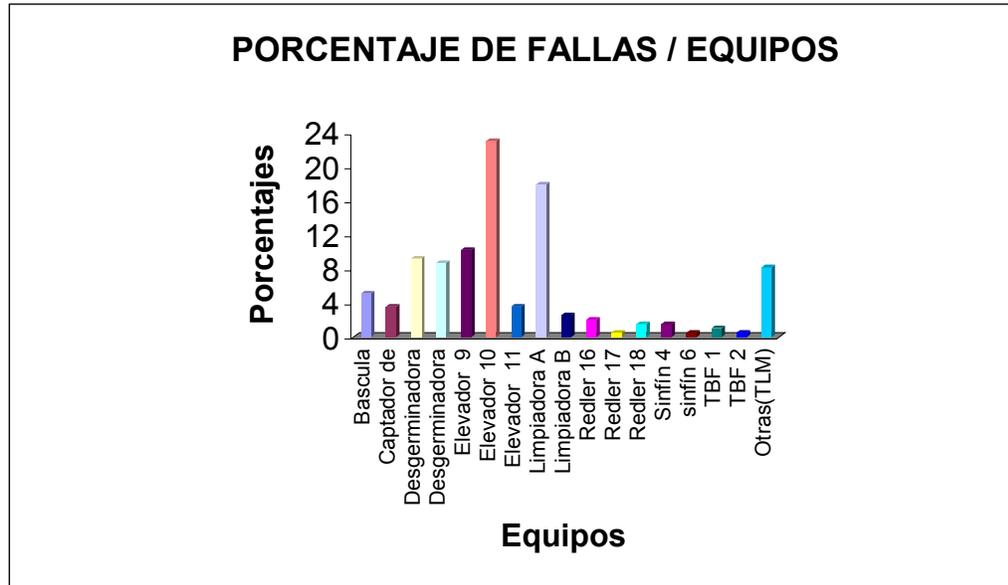


TABLA 7. CÁLCULO DE PORCENTAJES DE FALLAS DE LOS EQUIPOS QUE CONFORMAN LA TORRE DE LIMPIEZA DE MALTA.

| CALCULOS DE LOS PORCENTAJES | | | | |
|-----------------------------|------------|--------------|---------------|---------------|
| EQUIPO | # FALLAS | TFS(min) | % FALLAS | % TFS |
| Bascula | 10 | 2646 | 5,13 | 5,43 |
| Captador de polvo | 7 | 780 | 3,59 | 1,60 |
| Desgerminadora A | 18 | 3352 | 9,23 | 6,88 |
| Desgerminadora B | 17 | 4495 | 8,72 | 9,22 |
| Elevador 9 | 20 | 5677 | 10,26 | 11,65 |
| Elevador 10 | 45 | 8787 | 23,08 | 18,02 |
| Elevador 11 | 7 | 1394 | 3,59 | 2,86 |
| Limpiadora A | 35 | 13134 | 17,95 | 26,94 |
| Limpiadora B | 5 | 710 | 2,56 | 1,46 |
| Redler 16 | 4 | 426 | 2,05 | 0,87 |
| Redler 17 | 1 | 120 | 0,51 | 0,25 |
| Redler 18 | 3 | 205 | 1,54 | 0,42 |
| Sinfin 4 | 3 | 520 | 1,54 | 1,07 |
| sinfin 6 | 1 | 508 | 0,51 | 1,04 |
| TBF 1 | 2 | 521 | 1,03 | 1,07 |
| TBF 2 | 1 | 30 | 0,51 | 0,06 |
| Otras(TLM) | 16 | 5445 | 8,21 | 11,17 |
| TOTAL | 195 | 48750 | 100,00 | 100,00 |

4. EVALUACIÓN DE LA PRIORIDAD DE RIESGO (RPN)

Esta evaluación se realiza con el objetivo de evaluar cual es la falla que tiene un mayor porcentaje de causar daños y que ocasiona no fiabilidad en la empresa. Como se ha observado al estudiar el historial de fallas del equipo las fallas que se pueden presentar son: Las Fallas Eléctricas, Las Fallas Trabajando y las Fallas de Giro. Por lo tanto, vamos a establecer cada una de las probabilidades para cada falla que se ha presentado:

TABLA 8. PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE LAS FALLAS DEL ELEVADOR

| PROBABILIDAD DE OCURRENCIA (PO) | | |
|---------------------------------|---|---------------------|
| Ranqueo | Criterio de Ocurrencia | Ratas de Ocurrencia |
| 3 | <u>Esporádico</u> (El número de <i>Fallas Eléctricas</i> son ocasionales) | 0,001 |
| 3 | <u>Esporádico</u> (El número de <i>Fallas Trabajando</i> son ocasionales) | 0,001 |
| 5 | <u>Recurrente</u> (Hay certeza de que las <i>Fallas de Giro</i> se repetirán) | 0,1 |

TABLA 9. PROBABILIDAD DE SEVERIDAD DE LAS FALLAS DEL ELEVADOR

| PROBABILIDAD DE SEVERIDAD (PS) | |
|---------------------------------------|--|
| Ranqueo | Criterio de Severidad |
| II | <u>Marginal</u> (El número de <i>Fallas Trabajando</i> causa insatisfacción y no hay degradación al sistema) |
| III | <u>Moderado</u> (El número de <i>Fallas Eléctricas</i> causa insatisfacción y alguna degradación al sistema) |
| IV | <u>Crítica</u> (Las <i>Fallas de Giro</i> causan un alto grado de insatisfacción y pérdidas de la función del sistema) |

TABLA 10. PROBABILIDAD DE DETECCIÓN DE FALLAS DEL ELEVADOR.

| PROBABILIDAD DE DETECCIÓN (PD) | | |
|---------------------------------------|--|---------------------|
| Ranqueo | Criterios de Detección | Probabilidad |
| 1 | <u>Muy Alta</u> (Las <i>Fallas de Giro</i> tienen una probabilidad de detección antes de que esta ocurra). | 90% |
| 4 | <u>Baja</u> (El número de <i>Fallas Eléctricas</i> tiene una baja probabilidad de detección antes de que esta ocurra.) | 35% |
| 5 | <u>Remota</u> (En el número de <i>Fallas Trabajando</i> , la probabilidad de que estas fallas se detecten antes de que ocurran es remota). | 15% |

Entonces, el porcentaje de prioridad de riesgo es equivalente a la multiplicación de las probabilidades de ocurrencia, severidad y detección.

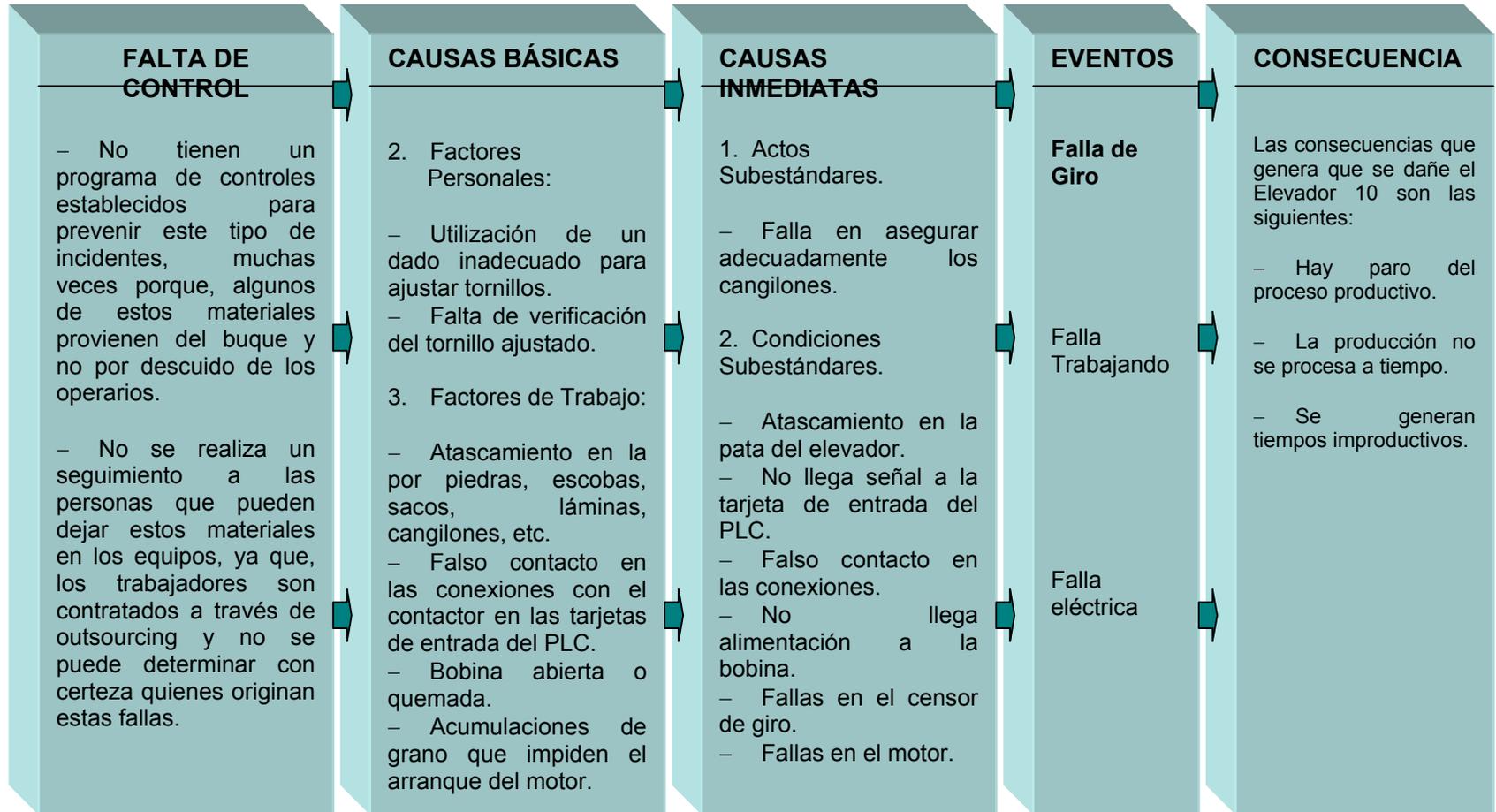
$$\mathbf{RPN = PO \times PS \times PD}$$

Por tanto, tenemos para cada falla la probabilidad de riesgo:

- **FALLA DE GIRO** = $0.1 * 4 * 0.9 = 0.36$
- **FALLA TRABAJANDO** = $0.001 * 2 * 0.15 = 0.0003$
- **FALLA ELECTRICA** = $0.001 * 3 * 0.35 = 0.00105$

5. METODOLOGIA DE ANALISIS DE FALLA O DOMINO

FIGURA 8. METODOLOGÍA DEL DOMINÓ APLICADA AL ELEVADOR DE CANGILONES.



6. ANÁLISIS DE CAUSA RAIZ (RCA)

FIGURA 9. ANÁLISIS DE LA CAUSA RAÍZ DE LAS FALLAS DEL ELEVADOR DE CANGILONES # 10



7. NORMAS DE MANTENIMIENTO PARA EL ELEVADOR DE CANGILONES

7.1 SITUACIÓN ACTUAL DE LA EMPRESA:

INRAOSK S.A., tiene instituido en su empresa un programa de mantenimiento programado, para las maquinas que actualmente se encuentran en la planta. Estos mantenimientos se realizan para ciertos componentes de los equipos como son los rodamientos, las chumaceras, cojinetes, unidad motriz, entre otras. Pero el mantenimiento que predomina en la empresa es el mantenimiento correctivo, ya que cuando fallan los equipos se llaman a los mecánicos o eléctricos de turno para que normalicen la falla y se pueda continuar con el proceso. Además, estos cuando terminan de realizar el mantenimiento no se verifican que lo que se hace quede funcionando de la manera más óptima.

7.2 PROPUESTA A LA SITUACIÓN ACTUAL:

En la Torre de Limpieza de Malta se presentan fallas en los diversos equipos que se encuentran allí. El equipo que seleccionamos para realizar nuestro ejemplo y dar recomendaciones en cuanto a su mantenimiento fue el Elevador de Cangilones número 10, precisamente por el gran porcentaje de fallas que presenta este con respecto a los demás, y es un equipo crítico por que puede parar la producción.

Nosotros recomendamos, una inspección diaria al sistema de transportadores por que, es un buen medio para detectar problemas potenciales por sonidos no usuales provenientes de cadenas, poleas, chumaceras y uniones de las bandas. Todas las operaciones de mantenimiento deben realizarse mientras el sistema este detenido, con los controles eléctricos desconectados; además la limpieza y la buena iluminación son prerequisites para una operación segura.

Las partes que requieren de una inspección frecuente son las siguientes:

- Banda: se debe revisar si existe huellas o daños en la cubierta y en los bordes que indiquen rozamientos o imperfecciones se le debe realizar un ajuste diario.
- Unidad motriz: se debe verificar su funcionamiento sin ruidos anormales, revisar niveles de lubricación diariamente y se deben mantener limpios con una excelente adecuada ventilación para su correcto funcionamiento.
- Chumaceras: revisar semanalmente o diariamente como lo considere la empresa para buscar ruidos o temperaturas anormales que nos puedan indicar que hay falta de lubricación o daños en los rodamientos del mismo.

➤ Cangilones: revisar si estos se encuentran sueltos o presentan fracturas inspección que se debe realizar diariamente para prevenir atascamientos en los elevadores; además los tornillos deben ser ajustados cada 15 días.

8. CONCLUSIONES

El proceso que se sigue en INRAOSK S.A. para transformar la cebada en Malta es un poco complicado y dura aproximadamente 21 horas, la Torre de Limpieza de Malta que es el último proceso y el objetivo de éste trabajo es una parte vital del proceso porque cuando ella falla no se puede terminar la producción porque se el proceso productivo de la planta es interrumpido.

Hemos encontrado muchos tipos de fallas en el Elevador # 10 siendo el más frecuente por FALLA DE GIRO provocado en ocasiones por atascamiento, por cangilones atravesados, otras porque se presenta fuga de grano, etc.; y después de haber analizado la situación, podemos concluir que estos atascamientos son producto de un mal mantenimiento de los equipos, porque colocar de nuevo los cangilones en el elevador los tornillos del mismo no son correctamente ajustados, lo que hace que cuando se presente la vibración normal del elevador, los tornillos se desajusten produciendo que se atasque el elevador porque los cangilones se caen.

La falta de verificación de los empelados cuando realizan su trabajo es lo que hace que se presenten tantas fallas en el elevador, así que recomendamos que se ejerza un control más estricto sobre estos procedimientos y que los tornillos sean ajustados cada 15 días y que se deje de realizar cada seis meses como lo hacen actualmente, para con esto poder detectar a tiempo cualquier anomalía. Además, cuando se presente la vibración normal del elevador estos dejarán de sufrir caídas y de causar atascamientos entonces, serán reemplazados cuando cumplan su vida útil, no inesperadamente como está sucediendo en la empresa.

A lo largo del estudio y analizando las fallas observamos que las fallas de giro también se presentan por atascamientos que son ocasionados por ciertos materiales como lo son: sacos, láminas que se desprenden, pedazos de tubos, escobas, etc. No se ha podido determinar con precisión quienes son los responsables de dejar estos residuos en el elevador, o si estos provienen directamente del muelle al momento de descargar la materia prima. Por lo cual se recomienda que se realice una inspección mucho más estricta y un control en el muelle de recepción de la materia prima, por lo cual se recomienda que se instale un separador en el muelle de descarga de la materia prima que pueda extraer los residuos sólidos que puedan venir en esta, pero ante de hacerlo debe tenerse certeza que realmente es en el descargue que vienen estos residuos.

Adicionalmente se puede proceder a realizar un control y vigilancia mucho más estricta a los operarios en los procesos de limpieza de los equipos para descartar la posibilidad que estos residuos son consecuencia de que ellos están realizando mal su trabajo y se pueden instaurar capacitaciones en donde sea resaltada la importancia de la fiabilidad en toda la empresa, sus equipos, materiales y el talento humano.

La empresa en la actualidad lo que hace es apagar incendios, es decir, en el momento que se presenta la falla la corrigen y no se dedican a realizar un análisis para encontrar la raíz y causa del problema. La baja disponibilidad de la Torre de limpieza de malta es consecuencia de la cantidad de fallas que se presentaron durante el tiempo bajo estudio (**195 Fallas**). **Ver Figuras 6 y 7**), y el tiempo improductivo total que se generó (48.750 min.), que al ser transformado en pesos la empresa dejó de percibir \$3439.546.424 durante este periodo. Por ello, es importante tener un plan de mantenimiento preventivo y proactivo en la empresa al que se le dé verdadero cumplimiento y que se realicen revisiones periódicas a todos los sistemas de la empresa en su totalidad, para hacer estos equipos más fiables.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

ACTIVIDAD: Es la acción ejecutada por el sistema, parte o equipo en estudio. Conjuntamente con la materia prima forman la intención. Es posible, y muy frecuente, que un sistema, parte o equipo de proceso ejecute varias actividades.

ANÁLISIS DE EFECTO Y MODOS DE FALLA (FMEA): es el estudio de las fallas potenciales que podrían ocurrir en cualquier parte del sistema, para determinar los efectos probables sobre cada una de las demás partes del mismo y sobre el probable buen éxito operacional.

ANÁLISIS DE CRITICIDAD DE EFECTOS Y MODOS DE FALLA (FMECA): ídem a la anterior pero los resultados en orden de la gravedad o severidad de las consecuencias.

ANÁLISIS DE ÁRBOL DE FALLAS: es un método para representar de forma lógica las combinaciones de varios estados del sistema, los cuales conducen a un resultado en particular.

ANÁLISIS DE REHABILITACIÓN HUMANA (AIPA): Método usado para determinar la probabilidad de que un sistema requiera de acciones humanas, tareas o trabajos que podrían ser completados satisfactoriamente dentro de un

tiempo requerido de un período, también como la probabilidad que no extrañe las acciones humanas determinadas por el sistema para ser desempeñadas.

ÁRBOL DE EVENTOS (HRA): Representación gráfica o secuencial de un evento en el cual la rama del árbol designa la acción humana y otro evento tan bueno como condición diferente o sobre este evento. Los valores asignados para toda la rama del árbol (excepto para la primera rama) son condiciones probabilísticas. Cualquier punto de la rama del árbol, es la suma de los valores de probabilidad asignados para toda la rama la cual debe ser igual a 1.

CAUSAS: Son las razones por las cuales se puede presentar una desviación. Una desviación se considera significativa sólo si se demuestra, que tiene una causa realista, posible y probable, y sus consecuencias son inaceptables para la empresa. La causa es pieza importante en el proceso para proponer acciones que eliminen el riesgo en la fuente.

CAUSA DE FALLA: es la razón principal por la cual un elemento en particular del diseño del proceso resulta en un modo de falla.

COMPORTAMIENTO ESTÁNDAR: es aquel que no expone al empleado o a terceros o al ambiente o al equipo o al proceso a riesgos de lesiones, fallas o pérdidas.

COMPORTAMIENTO SUBESTÁNDAR: es aquel que es capaz de causar al empleado, al equipo, al medio ambiente o al proceso una lesión, un daño o pérdida.

CONFIABILIDAD: es la probabilidad de que los equipos o procesos desempeñen en forma satisfactoria su función durante un lapso de tiempo específico, bajo una serie dada de condiciones de operación.

CONSECUENCIAS: Son el resultado de la materialización de las desviaciones, en caso de que se presenten. El impacto de la consecuencia, incluida la probabilidad de su ocurrencia es una referencia al momento de considerar el costo de las acciones para prevenir la desviación.

CONTROL ADMINISTRATIVO: Mecanismo de supervisión y/o regulación emitido por la dirección para el chequeo y control del desempeño humano en una planta.

CONTROLES O MONITOREOS: son los mecanismos que previene la causa de los modos de falla o detectan la condición de falla antes de que alcance el cliente.

CRITICIDAD: es el producto matemático de la severidad y la frecuencia de la ocurrencia, este número es utilizado para priorizar aquellos ítems que requieren de una calidad adicional en la planeación.

DEMANDA: es la condición por la cual se requiere que un sistema de protección opere.

DESEMPEÑO DE CONFORMACIÓN DEL FACTOR (PSF): Los factores que influye en el desempeño humano, incluye, factores intrínsecos o inherentes al individuo y factores en la situación de trabajo, (herramientas, políticas de planta, diseño del hardware.

DESVIACIÓN: Es el alejamiento con respecto a la intención en la materia prima o en la actividad, la cual se descubre al aplicar las Palabras Guías. La desviación abre la puerta para identificar las causas que conllevan riesgos significativos.

DESVIACIÓN INTENCIONAL (ERROR): Un error ocurre cuando el trabajador realiza alguna acción que es incorrecta pero que él / ella creen que es correcta, o el método es superior al desempeñado. Un error puede ocurrir cuando el

trabajador no entiende el procedimiento, entonces el crea o identifica una mejor forma de hacer las cosas.

DIAGNÓSTICO: Es la evaluación mental de las más probables causas de un evento anormal y la identificación de los componentes de un sistema cuyo status puede ser cambiado para reducir o eliminar el problema, el diagnóstico incluye la interpretación y (cuando es necesario) la toma de decisión.

DISPLAY (EXHIBIR): Cualquier instrumento o dispositivo que brinde información para algún órgano sensorial humano (vista. Oído, etc.)

DISPONIBILIDAD: es la probabilidad de que un ítem o sistema esté en un estado o capacidad de realizar una función requerida, en condiciones dadas y suponiendo que se disponen los medios exteriores para dicho fin, es decir, expresado en otra forma, la disponibilidad es el parámetro que define en términos de probabilidad la situación de funcionamiento de un sistema, elemento o componente en un cierto instante futuro seleccionado al azar.

DIVERSIDAD: es el desempeño de una función por un número dado de medios diferentes e independientes.

EFFECTO DE FALLA: es la consecuencia adversa ó benéfica contra el cliente, proceso, ambiente, equipo o el hombre.

ELEMENTO (ITEM): Término genérico que denota todo nivel de armado de ferretería; por ejemplo: Sistema, segmento de sistema, subsistema, equipo, componente, parte, etc.

ESTEREOTIPO POPULAR: La forma de comportarse del un grupo identificable de personas (excepto algunas), o equipos.

ERROR: comportamiento que excede el límite de tolerancia definido para la seguridad de un sistema.

EXACTITUD: Es la cercanía entre el valor medido y el valor real, cualquiera que sea la variable y el método de medición.

FALLA: es la finalización de la capacidad de un ítem o equipo para desempeñar su función de diseño.

FALLA CASUAL O ALEATORIA: Es toda falla en la que por su causa y/o mecanismo no se puede predecir el tiempo de ocurrencia, es decir, su ocurrencia esta liberada al azar.

FALLA SECUNDARIA O DE CAUSA COMÚN: Falla de un elemento causada directa o indirectamente por falla de otro elemento ó es la falla coincidente de dos

ó más ítem o sistema como resultado de una causa o evento simple independiente, aplica en particular a los sistemas redundantes.

FALLA REPENTINA: Fallas que no podrían anticiparse mediante un examen previo.

FALLA POR DEFICIENCIA INHERENTE: Fallas atribuibles a deficiencias inherentes al elemento en sí, al ser sometido a esfuerzos dentro de los límites que puede soportar dicho elemento.

FALLA POR MAL USO: Fallas atribuibles a la aplicación de esfuerzos superiores a los que se ha establecido que puede soportar el elemento.

FALLA POR DESGASTE: Falla que ocurre como resultado del proceso del deterioro o del uso, y cuya probabilidad de presentarse aumenta con el tiempo.

FALLA GRADUAL: Fallas que podrían anticiparse mediante un examen previo.

FALLA POR DEGRADACIÓN: Fallas graduales y parciales.

FALLA PARCIAL: Fallas resultantes de las desviaciones de las características que sobrepasan los límites especificados, pero que no llegan a provocar la falta completa de la función requerida.

FALLA COMPLETA: Fallas producidas como consecuencia de desviaciones de las características que sobrepasan los límites especificados, capaces de provocar la falta completa de la función requerida.

FALLA CATASTRÓFICA: Falla repentina y completa.

FALLA SEGURA: Se da en el diseño de un sistema ó ítem para asegurar que una falla del sistema o del ítem resulte en un cambio o movimiento hacia una condición segura.

FACTORES DE RECUPERACIÓN: Factores que limitan o previenen las consecuencias del error humano.

FUNCIÓN: podría definirse como el propósito de un proceso o producto.

INTENCIÓN: Es el propósito de la parte, equipo de proceso, pieza o bomba a ser estudiada. Responde a las preguntas ¿Qué contiene? ¿Por qué y para qué? La intención puede ser descriptiva o esquemática, prefiriéndose la primera por cuanto

es más fácil de entender por cada miembro del equipo y por aquellos que quieran o deban conocer los resultados posteriormente. Consta la Intención de la Materia Prima, la Actividad y Otros Modos de Empleo.

INCIDENTE: Evento que generó un accidente o que tuvo el potencial para llegar a ser un accidente. (Según norma NTC 18001). Es el resultado del contacto de la persona lesionada, el equipo, el material, el ambiente dañado con una fuente de energía o sustancia cuya cantidad o concentración es mayor a la que éstos pueden soportar. (Versión del Control de pérdidas).

INTERFASE OPERADOR – MAQUINA: Cualquier punto de interacción entre la persona y otra persona o componente del sistema.

LISTA DE CHEQUEO: Es un procedimiento escrito en el cual cada ítem es marcado de acuerdo a su estado en el momento de la revisión.

MANTENIBILIDAD: aptitud de un ítem o elemento en condiciones dadas de utilización, para ser mantenido o restablecido, a un estado en el que pueda realizar una función requerida cuando el mantenimiento se lleve a cabo en condiciones dadas y utilizando procedimientos y medios establecidos.

MANTENIMIENTO PRODUCTIVO TOTAL (TPM): es un enfoque innovativo para el mantenimiento que optimiza la efectividad del equipo, elimina las averías y promueve el mantenimiento autónomo por los operarios a través de actividades día a día.

MANTENIMIENTO AUTÓNOMO: es el proceso por medio del cual se le asigna al operador del equipo, una serie de actividades primarias propias del mantenedor con los cuales se logra mantener estable las condiciones de operación del mismo.

MATERIA PRIMA: Es la sustancia, las condiciones físicas, las propiedades, la cantidad de los productos que maneja el sistema, parte o equipo en estudio.

MODO DE FALLA: es la manera como un componente o equipo falla.

NODOS DEL ESTUDIO: Las localizaciones (en la tubería y dibujos y los procedimientos de la instrumentación) en las cuales los parámetros de proceso se investigan para las desviaciones.

OPERADOR: Individuo responsable de monitorear, controlar y ejecutar tareas que son necesarias para el proceso productivo del sistema.

PALABRAS GUÍAS: Son palabras sencillas las cuales se usan para calificar la Intención, guiar y estudiar el proceso creativo del pensamiento y descubrir las desviaciones. Se aplican a la materia prima y a la actividad, en forma independiente pero sistemática.

PELIGRO: se da en una falla del sistema que conduce a un cambio o movimiento del sistema a una condición subestándar. Podría estar afectando un dispositivo de protección o un equipo en parada incapacitándolo para operar cuando sea requerido.

PELIGRO POTENCIAL: es una situación física con un potencial de lesión a las personas, daños a la propiedad, la ambiente o a alguna combinación de éstos.

PERIODO DE FALLA PREMATURA: Es el primer periodo, a partir de un momento dado y durante el cual la tasa de fallas de ciertos elementos decrece rápidamente. Comprende el tiempo de asentamiento o ensayo.

PERIODO DE FALLA CONSTANTE: Periodo durante el cual se producen las fallas de ciertos elementos a un ritmo más o menos uniforme.

PERIODO DE FALLAS POR DESGASTE: Período en el cual la tasa de fallas de ciertos elementos sube rápidamente debido a los procesos de deterioro.

PRECISIÓN: Es la cercanía entre los resultados sucesivos de la medición de una variable, sin tener en cuenta la relación con el valor real de ésta.

PROBABILIDAD ERROR HUMANO (HEP's): Es la probabilidad que un error pueda ocurrir cuando se ejecuta una tarea.

REDUNDANCIA: Existencia de más de un medio en un elemento para realizar su función.

REDUNDANCIA ACTIVA: Redundancia en la cual todos los elementos funcionan simultáneamente, en lugar de hacerlo en el momento en que se necesitan.

REDUNDANCIA POR ELEMENTOS DE RESERVA: Es aquella que está dada por elementos o repuestos alternativos y que entran en funcionamiento cuando su similar deja de hacerlo a raíz de alguna falla, suplantándolo en todas sus funciones.

RIESGO: es una estimación cuantificada de la probabilidad de que un sistema de protección no opere cuando sea solicitado por una demanda preestablecida sobre él.

RIESGOS (hazop): son agentes de naturaleza diversa con la potencialidad de desencadenar efectos indeseables en las personas, animales, plantas, medio ambiente, equipos y productos. También se entienden como las consecuencias que se traducen en daños, perjuicios o pérdidas. *HAZOP PERSIGUE IDENTIFICAR RIESGOS INDUSTRIALES*

SITUACIÓN ERROR – PROBABILIDAD: Una situación en la cual el aspecto del desempeño es un factor no compatible con las capacidades, limitaciones o necesidades de la persona para ejecutar una tarea correctamente.

SUBTAREAS: Actividades u operaciones elementales claves, en las que un error puede contribuir a un suceso no deseado, identificando los factores que influyen en la ejecución de cada operación o subtarea.

STRESS: Es la tensión mental que surge como respuesta a problemas, situaciones o sentimientos.

STRESS DESORDENADO: Resultado del cuerpo o tensión mental como respuesta a preocupaciones, amenazas, enojo, etc. de una persona que se ve reflejado en la eficiencia y efectividad que es disminuida.

TASA DE FALLAS: En una etapa cualquiera de la vida de un elemento, el cambio de aumento en el número de fallas por cambio de aumento de tiempo correspondiente.

TAREA: Se entiende por tarea en sentido estricto, el objetivo asignado al trabajador. En sentido amplio, la tarea conlleva las instrucciones y las consignas, los dispositivos utilizados y las condiciones en que se debe realizar.

TIEMPO: Se refiere a la duración de las observaciones de los elementos considerados, ya sea en funcionamiento propiamente dicho, como en almacenaje, preparación, etc., pero excluyendo tiempo perdido por fallas.

Nota: En las definiciones en las que se usa el término “tiempo” dicho parámetro se podrá remplazar por distancia, ciclos y otras mediciones de la vida, según convengan. Tiene que ver con términos tales como factor de aceleración, falla por uso, tasa de falla, vida media, tiempo medio entre fallas, confiabilidad y vida útil.

TIEMPO MEDIO ENTRE FALLAS: es el recíproco de la tasa de fallas, está basado en la asunción que la tasa de fallas es constante, así las fallas ocurren de manera aleatoria y estadísticamente presentan una distribución exponencial.

TIEMPO MEDIO PARA FALLAR: es el análogo del tiempo medio entre fallas y es utilizado donde la falla no puede ser reparada, es normalmente aplicado a ítems que son reemplazados después de fallar.

TIEMPO MEDIO PARA REPARAR: es el tiempo medio que toma para reparar una pieza o componente de un equipo que ha fallado y dejarla lista para su utilización.

TIEMPO MUERTO FRACCIONARIO: es la fracción de tiempo promedio en la cual un componente o sistema está imposibilitado para operar cuando le sea solicitado, es equivalente a una condición de no disponibilidad.

TOMA DE DECISIÓN: La toma de decisión es una parte del diagnóstico. Es el arte de buscar entre alternativas de diagnóstico la causa más probable del modelo o estímulo que ocasiona un evento anormal.

VIDA ÚTIL: Espacio de tiempo en que un elemento funciona como una tasa de falla aceptable.

VIDA MEDIA: Media aritmética de la relación tiempo-falla de un grupo de elementos nominalmente idénticos.

BIBLIOGRAFÍA

ALADON. Curso RCM I Y RCM II.

AGUIRRE, MARTÍNEZ EDUARDO. Seguridad Integral en las empresas Industriales, Comerciales y de Servicios.

BLANCO, LUIS ERNESTO. Módulo 2 Planeación de la Producción. 2002

CENTER FOR CHEMICAL PROCESS SAFETY OF THE AMERICAN INSTITUTE OF CHEMICAL ENGINEERS. Guidelines for Investigating Chemical Process Incidents.

CREUS ANTONIO. Fiabilidad y Seguridad, su aplicación en Procesos Industriales.

CHASE AQUILANO, JACOBS. Administración de Producción Operaciones. Editorial Mc Graw Hill, 2001.

CHEMICAL MANUFACTURERS ASSOCIATION. A manager's Guide to reducing Human Errors.

DIAZ, BOSSIO LUIS MANUEL. Manual para la Formación de Líderes Efectivos en los Estudios de Riesgos y Operabilidad HAZOP.

E.E LEWIS. Introduction to Reliability Engineering. Second Edition.

INSTITUTO INTERNACIONAL DE CONTROL DE PERDIDAS (ILCI).

Administración Moderna de la seguridad y control de pérdidas.

K. HODSON, WILLIAM. Maynard Manual Del Ingeniero Industrial.

Editorial Mc Graw Hill, 1998.

NAKAJIMA, SEIICHI. Introducción al TPM. Editorial. Editorial Norman Bodek, 1971.

www.elprisma.com

www.tpm.com

www.reliability.com

www.klaron.net

www.kaizen.com

www.mundoelectrico.com

www.rcmingeneria.com

www.sae.org/BOOKSTORE

www.ceroaverias.com/tpm/marca1.htm

CONCLUSIONES

Con este trabajo de grado aprendimos que en la industria, existe de modo creciente, una inquietud por la fiabilidad y la seguridad de complejos industriales y de sus métodos de producción y control, lo que ha dado lugar a métodos capaces de analizar dicha fiabilidad.

El área de la Ingeniería de la Confiabilidad y la metodología estadística relacionada han estado creciendo continuamente durante los últimos 50 años. Los métodos estadísticos permiten definir correctamente la calidad de los productos, siendo este un paso fundamental para determinar la confiabilidad de los mismos; dar un fundamento científico a las operaciones de control industrial. Con el cambio continuo de la tecnología, el conocimiento continuo creciente y las nuevas fuentes de información y datos, surgen nuevos problemas y retos de gran interés.

Debido a que la confiabilidad es un factor medido en una probabilidad de ocurrencia, la estadística continuará desempeñando un papel fundamental en el área de la confiabilidad. Los modelos estadísticos nos permiten actualmente identificar un tipo de comportamiento de fallas de manera que aplicando estas técnicas podamos predecirlas y tomar medidas preventivas.

La Confiabilidad Humana es una de las herramientas más importantes de la Ingeniería de la Confiabilidad porque nos permite predecir, prevenir y por ende evitar errores humanos y al mismo tiempo encontrar las verdaderas causas de los fallos en los humanos. Es importante anotar que para que los resultados sean los esperados, todos los involucrados con la empresa deben tomar parte al poner en práctica ésta técnica. Además es importante que exista un buen control administrativo y excelente entrenamiento y capacitación para las personas que lideren el proceso en la compañía, sin obviar las demás personas de la empresa.

Este trabajo ha sido de gran importancia para nosotras porque nos ha ayudado a afianzar nuestro conocimiento preliminar sobre Confiabilidad y la posibilidad de darle a las personas que lo consulten una mejor forma de hacer las cosas, todavía este trabajo de grado no es un libro como tal, pero tiene todas las bases para ser editado y convertirse en un libro, esperamos que la Universidad nos apoye para esto.

