



ADOLFO ARATA

INGENIERÍA Y GESTIÓN DE LA CONFIABILIDAD OPERACIONAL EN PLANTAS INDUSTRIALES

Aplicación de la Plataforma R-MES



Colaboradores
ALESSIO ARATA
FREDY KRISTJANPOLLER
RAÚL STEGMAIER



RiL editores

PREFACIO

LUCIANO FURLANETTO

ASSOCIAZIONE ITALIANA MANUTENZIONE

La Asociación Italiana de Mantenimiento, en su programa de orientación cultural, define sus líneas de desarrollo, entre las cuales la primera de ellas se relaciona con un asunto central en importancia que involucra no sólo al mantenimiento sino a toda la sociedad actual y futura; se refiere a: Mantenimiento y Sustentabilidad.

“Se observa un creciente incremento de la amplitud de la concepción del mantenimiento, evolucionando desde una actividad demandada, asociada básicamente con el mantenimiento eficiente de los equipos, hacia un proceso responsable del costo global y hacia una ciencia de la conservación, en un contexto de sustentabilidad del empleo de los recursos. El mantenimiento se transforma en una ciencia que se encuentra en el límite entre la ingeniería y la filosofía del desarrollo, adquiriendo una dimensión ética y un conjunto de valores, orientado a la eliminación de los derroches y a la responsabilidad de los comportamientos. Esta transformación será cumplida sólo cuando haya una visión compartida de valores y de principios éticos del mantenimiento al interior de toda la sociedad”.

Por lo tanto, el mantenimiento no sólo es ingeniería, sino también, es o debe ser cultura de la conservación. El verbo mantener deriva del latín “tener al cuidado”, con sentido de prevención y no corrección. Se dice que es como tener al cuidado un niño; en general, tener al cuidado algo de valor que puede estar sujeto a desgaste. Es decir, estar expuesto a los peligros por quien le corresponde el respectivo cuidado.

La cultura del mantenimiento es transversal, “si bien está caracterizada por la especificidad sectorial, tiene una base común a todos los sistemas y posee tecnologías, instrumentos y técnicas

operativas utilizables en la solución de problemas técnicos y de gestión”.

El mantenimiento es una ciencia que se encuentra en el con-fín entre la ingeniería y la filosofía del desarrollo y como para toda ciencia, los estudiosos deben desarrollar la epistemología, el estudio crítico de la naturaleza y de los límites del conocimiento científico en relación a la estructura lógica y a la metodología.

Para todos los ámbitos de interés del mantenimiento, que se caracteriza por la complejidad, las tecnologías y el ciclo de vida, la acción del mantenimiento debe ser pensada desde la fase del diseño y del proyecto del bien o de la instalación, no sólo para asegurar la funcionalidad durante todo el ciclo de vida sino, por sobre todo, para garantizar la seguridad y el respeto del medio ambiente.

Pensar el mantenimiento desde la fase del proyecto, significa:

- Definir un sistema con fuertes características de mantenibilidad,
- Facilitar la utilización de los instrumentos del mantenimiento,
- Entregar al usuario final, además del proyecto, una oportuna documentación del sistema y de sus componentes,
- Garantizar las competencias de las personas sobre el ejercicio del bien proyectado y
- Optimizar los costos globales de ejercicio del sistema.

El diseñar y proyectar tiene obligaciones establecidas por normativas vinculantes que tienen que ser debidamente consideradas y correctamente aplicadas, así como el mantenedor tiene una serie de tareas a realizar en las que tiene responsabilidad de relevancia civil y penal.

El responsable del mantenimiento tiene la obligación de activar el plan de mantenimiento, actuar según los estándares de trabajo y emplear recursos calificados y certificados.

Las temáticas centrales del mantenimiento se pueden definir como:

- La centralización para diseñar y proyectar de forma optimizada los procesos y los costos que caracterizan el ciclo de vida de un sistema no sólo a nivel del proyecto mismo, sino también para la construcción, el montaje, la gestión operacional y hasta el reemplazo de equipos, que frecuentemente se relaciona con importantes problemáticas que pueden impactar con el medio ambiente.
- La definición del plan de mantenimiento, considerado no sólo como un instrumento de optimización de los costos de gestión sino como la modalidad más oportuna para garantizar la seguridad de funcionamiento y como consecuencia la seguridad de las personas y del medio ambiente.
- El plan de mantenimiento está constituido por actividades preventivas estandarizadas que deben ser desarrolladas a través de un personal calificado o especializado, de acuerdo a las directrices y normativas establecidas.

Un profesional calificado está en condiciones de garantizar un nivel básico de competencias, por lo que está habilitado para desarrollar tareas específicas de responsabilidad. Debe, en consecuencia, afrontar un programa de capacitación y de adiestramiento, superando las necesarias evaluaciones y verificación del aprendizaje logrado. El profesional puede estar certificado, a través del desarrollo de tareas complejas de mantenimiento, para garantizar la calidad de trabajo ejecutado.

La certificación considera tanto los roles técnicos de coordinación y supervisión como aquellos asociados a la dirección. Naturalmente, la certificación debe prever un régimen dinámico de evaluación y verificación en el tiempo, de las capacidades operativas y de gestión.

Una fuerte integración entre el proyecto y la gestión asegura una concepción genética adecuada del mantenimiento y el camino del desarrollo. Sin embargo, todo esto es inútil si no se actúa en dirección de un fuerte crecimiento formativo y de certificación de todas las personas de la organización. El mantenimiento desde siempre ha sido un problema asociado más a las personas que a las tecnologías.

Las acciones de crecimiento cultural son la forma para desarrollar una cultura de mantenimiento basada en el compromiso compartido y difundido de valores y de principios éticos fundados en el tener al cuidado de todo aquello que es parte de toda la sociedad.

Adolfo Arata, quien me honra por una larga y fraterna amistad, es, entre aquellos pocos estudiosos a nivel internacional, quien con una visión transversal e integrada puede contribuir a desarrollar una dimensión científica del mantenimiento funcional, una gestión industrial y un enfoque que abrace los sistemas, las redes, las ciudades y, en general, el ambiente natural.

Luciano Furlanetto
Partner Segesta srl
Presidente Commissione UNI di Manutenzione
Consejero A.I.Man
Milán (Italia), noviembre de 2008

PRÓLOGOS

JORGE ALEJANDRO JACOBSEN

TERNIUM

Todos aquellos que tenemos una larga experiencia en la Industria nos hemos encontrado durante nuestra carrera con incontables situaciones donde la imprevisión, los errores de diseño, la falta de criterios de mantenibilidad, errores humanos, etc. nos conducen a situaciones en que los costos asociados a una falla pagan varias veces cualquier mejora que la evite.

En estas circunstancias cabe preguntarse: ¿que otro aspecto no considerado en la instalación puede generar un problema similar? Y aún habiéndolo determinado: ¿Cómo justifico a los accionistas y *stake holders* de mi Empresa las inversiones necesarias para un aumento en la Confiabilidad Operativa?

El enfoque sistémico desde la teoría de la confiabilidad y la Ingeniería de Mantenimiento resuelven esta problemática de manera rigurosa cuantificando los riesgos en instalaciones existentes, o desde la etapa de diseño, transformando los “pareceres” y “opiniones” en oportunidades de inversión concretas y medibles que hacen más eficaces y eficientes nuestras operaciones.

Mas aún, estas disciplinas y metodologías cambian la perspectiva de la Gestión de Activos desde un enfoque tradicionalmente re-activo hacia uno pro-activo centrado en la mejora continua de equipos y procesos y por lo tanto, en términos financieros, de centros de gasto a centros de beneficio orientados a la estrategia del negocio de la Compañía.

Este libro no es uno más de la amplia gama disponible en la literatura actual sobre este tema: por una parte aborda de manera rigurosa y conceptual el problema estadístico y matemático y por otra logra el *drill down* necesario hacia aplicaciones en casos reales

de la Industria desplegando resultados y conclusiones contundentes.

De lectura amena, abarca de manera integral la problemática Industrial desde la óptica de la confiabilidad, introduce al lector novel en los criterios y fundamentos del *Risk-based Management* y al mismo tiempo es fuente de consulta para aquellos que conociendo el tema, buscan un enfoque riguroso y práctico para la resolución de casos concretos.

No me queda más que felicitar al Dr. Arata y a sus colaboradores por esta novedosa contribución que debe estar en la biblioteca de todo Ingeniero dedicado al fascinante mundo de la Gestión de Activos.

Jorge Alejandro Jacobsen
Director Departamento de Planeamiento
y Servicios Tecnológicos. Ternium.
San Nicolás (Argentina), julio del 2008

HORACIO BERGERO

TENARIS

Es suficientemente conocido por todos quienes hemos tenido algún rol en la gestión empresarial en los últimos años, que la globalización en la economía ha cambiado las reglas del juego y en el caso particular de las empresas industriales de vanguardia, el nivel de tecnología en los equipos o maquinarias operativas de las mismas ha dejado de ser un factor de diferenciación contundente, como lo era hace unos años. Este fenómeno se explica por el alto nivel de concentración de proveedores de estos equipos en este nuevo escenario, donde quedan sólo unos pocos y a los cuales todos quienes tengan suficientes recursos financieros tienen acceso. En otras palabras, la diferenciación entre una empresa industrial eficiente y una que no lo es, no radica ya en el nivel de tecnología del que dispone, sino en la capacidad de gestionar esta tecnología de manera más eficiente que sus competidores directos; de aplicar el lenguaje que solemos usar en nuestras plantas, diríamos que no depende de los “fierros”, sino de la “materia gris” de las personas que componen esa empresa y del nivel de motivación de los mismos.

Actualmente existe una profunda preocupación en la alta dirección de la mayor parte de nuestras empresas, en implementar un sistema efectivo en lo que hoy llamamos Gestión del Talento; estos son los mecanismos que una determinada empresa ha puesto en práctica para atraer a los mejores profesionales del mercado, desarrollarlos en el menor tiempo posible y en especial, retenerlos por muchos años en la empresa al ser capaz de satisfacer no sólo sus expectativas económicas, sino además las referentes a su desarrollo profesional y al logro de un equilibrio razonable entre trabajo y familia, donde la calidad de vida sea un factor considerado en esta ecuación global de satisfacción laboral. De más está decir, que sin una gestión adecuada del talento en una empresa, la posibilidad de supervivencia de la misma en el largo plazo estará al menos comprometida.

Los conceptos vertidos en los dos párrafos precedentes que podrían parecer inconexos entre sí, en mi opinión deberían ser tenidos muy en cuenta por cualquier Manager que esté diseñando un modelo óptimo de gestión industrial y muy en particular, en el caso de la organización del Mantenimiento. Esto es, debido al hecho de que por un lado al compartir las tecnologías con nuestros competidores y al tener estas un alto nivel de automatización, la capacidad de conservar, mejorar y hacer el uso más eficiente posible de las mismas, hacen que el Mantenimiento en este tipo de empresas se convierta en un Factor Estratégico de diferenciación y ya no más en un Costo Necesario operativo, como fue considerado por muchos años. Por otra parte, como los equipos a mantener son cada vez más elaborados y las organizaciones de las áreas de mantenimiento más complejas, será necesario atraer muy buenos Talentos en esta función, desarrollarlos de manera adecuada y lograr retenerlos en el área por muchos años, ya que la experiencia aplicada en este tipo de actividades es fundamental.

Que el Mantenimiento sea visto como Factor Estratégico depende en primer lugar, de que el *Top Management* de nuestras empresas logre escaparse de la cuenta económica y del logro de los objetivos anuales, para poder tener una visión de largo plazo y poder comprender que con una adecuada gestión del Mantenimiento puede lograr ese “algo más” en cuanto a volumen de producción, calidad, costos, seguridad y gestión ambiental, que lo diferenciarán definitivamente de sus competidores. Pero también es necesario, que los responsables de las áreas de mantenimiento logren escaparse de la gestión diaria enfocada fundamentalmente en ejecutar el mantenimiento y puedan pensar también ellos en el largo plazo, diseñando un nuevo modelo organizativo basado en la prevención y en la Ingeniería de Mantenimiento. *Top Managers* y responsables del Mantenimiento, deben ya no discutir en forma permanente sobre el nivel de fallas de los equipos y los costos del mantenimiento, sino asociarse en la creativa tarea de diseñar una nueva manera de ver, organizarse e implementar el Mantenimiento, totalmente alineada a los objetivos finales de la empresa.

En la actualidad, escasean a nivel mundial los ingenieros y técnicos en las “especialidades duras” como solemos llamarles, que

son mecánica, electrónica, mecatrónica, etc. y que son las más aptas para la función de Mantenimiento. Por este motivo, estos profesionales tienen una amplia oferta laboral y la tarea de atraerlos y luego retenerlos en la función de Mantenimiento no es para nada simple, especialmente si en la empresa prevalece la “visión reducida” del mantenimiento a un mero prestador de servicios. Será fácil para ellos comprender, que si bien la tarea les atrae desde el punto de vista técnico, no forma parte del *core* de la empresa y buscarán migrar a otras áreas como producción, comercial, etc. o directamente cambiar de empresa. En cambio, una empresa que tiene una visión moderna en cuanto a la organización del mantenimiento, puede ofrecerles a sus talentos no sólo una mayor posibilidad de desarrollo técnico/gestional excelente, sino la certeza que los mismos necesitan de saberse incluidos en una función estratégica para la empresa y que les permitirá desarrollarse y crecer en la misma, sin la necesidad de buscar otros caminos mas fértiles de crecimiento.

Durante mi experiencia italiana como Director Industrial en TenarisDalmine, la que he desarrollado como coordinador global de las actividades de Mantenimiento de todas las plantas que Tenaris posee en el mundo y durante mi rol actual, como Director de TenarisUniversity, que es la Universidad Corporativa que posee la empresa, he tenido la oportunidad de trabajar en repetidas oportunidades con el autor de este libro, ya sea en su rol de consultor especializado en temas de Ingeniería de Mantenimiento o en temas académicos específicos. En todos estos casos, he encontrado en el Ing. Adolfo Arata Andreani a un profesional idóneo, que no sólo posee vastos conocimientos y experiencia en temas de Mantenimiento que lo han convertido en un referente mundial en el tema, sino que además tiene esa capacidad didáctica que le permite explicar de manera simple conceptos que, para quienes tenemos experiencia en el tema, sabemos que son muy complejos. Es una persona con la cual he coincidido siempre, en la visión que del Mantenimiento deben tener las empresas que hoy quieren ser líderes a nivel mundial, además de que sus aportes han significado y significan actualmente, un impulso importante en la búsqueda de la excelencia gestional, que es fundamental para Tenaris en su objetivo de afianzarse como líder mundial en su rubro.

He recorrido las páginas de este nuevo libro del autor, *Ingeniería y gestión de la confiabilidad operacional en plantas industriales*, que afronta no sólo el tema puro de la Ingeniería de Mantenimiento que es la especialidad del autor y presenta el R-MES como instrumento efectivo para su desarrollo, sino además otros relacionados a la organización, estructura, costos, estrategias de Mantenimiento, logísticos, etc. No fue novedoso para mí comprobar que el autor pudo volcar en este libro sus amplios conocimientos en el tema, con la claridad didáctica que lo caracteriza, y también gran parte de la experiencia que ha logrado desarrollar en tantos años de trabajo en su carrera profesional. Estoy persuadido de que este libro posee todos los elementos necesarios para convertirse en un poderoso instrumento de formación y, por lo tanto, lo recomiendo en el caso de estudiantes universitarios, para lograr la especialización en el tema, y además para Managers industriales y responsables de Mantenimiento, con el objetivo final de que juntos superen definitivamente la miopía estratégica de considerar al Mantenimiento como un costo necesario y se embarquen en el desarrollo de un nuevo y moderno rol estratégico, donde se logre por un lado la optimización de la gestión industrial de nuestras empresas y por el otro, atraer y retener a los talentos que tanto se necesitan en esta función.

Horacio Bergero
Ex Director Industrial de Tenaris Dalmine en Italia.
Ex Coordinador Global del mantenimiento
a nivel global en Tenaris.
Actual Director de TenarisUniversity.
Buenos Aires (Argentina), julio de 2008

SANTIAGO NÚÑEZ

CODELCO

Durante mi desempeño profesional me ha correspondido la dirección de Operaciones de plantas industriales complejas, no siendo pocas las oportunidades en las que he debido enfrentar problemas en el funcionamiento de las mismas, cuyo origen ha sido por problemas de operación y/o mantenimiento inadecuado de las plantas. Sin embargo, a pesar de importantes esfuerzos en la gestión operacional para cumplir con los programas de producción y presupuesto al menor costo global con una perspectiva de corto y largo plazo, muchas veces visualicé que parte importante del origen de los problemas no necesariamente estaban en la operación o en el mantenimiento de la planta, sino en la concepción y en la implementación del proyecto, en la selección de los equipos y las soluciones sistémicas adoptadas.

Recuerdo que en una ocasión, hace bastante tiempo atrás (1991), en mi interés permanente de profundizar diversas materias relacionadas con mi quehacer profesional me encontré con un artículo del autor de este libro *Ingeniería y gestión de la confiabilidad de plantas industriales*, el que introducía el concepto del “costo de ineficiencia” que corresponde a la probabilidad del mal funcionamiento de un equipo y su impacto sobre el negocio. Desde ese entonces el tema de la confiabilidad operacional atrajo mi atención y motivó mi estudio sobre el tema en mi perspectiva de operador de plantas industriales complejas. No fueron pocos los avances sobre el tema que nos permitieron junto a mi equipo de trabajo y con el apoyo de consultores externos, como es el caso de Adolfo Arata autor de este libro, lograr mejoramientos de proyectos, operación y mantenimiento de la planta que muchas veces alcanzaron mejoras y adecuaciones de los equipos y los procesos.

En la actualidad, con la responsabilidad que me corresponde participar en la concepción, desarrollo e implementación de nuevos proyectos de inversión, el tema relacionado con la confiabi-

lidad operacional ha cobrado aún mayor relevancia en la toma de decisiones, ya que ellas requieren de un enfoque de largo plazo que considere todo el ciclo de vida de los equipos con el objeto de lograr y mejorar los resultados del negocio durante todo el horizonte de evaluación del proyecto.

Es con esta visión que he tenido que enfrentar las decisiones asociadas con el estudio de alternativas, las que no sólo quedan definidas por los costos de inversión y los costos operacionales asociados, sino también por aquellos costos y riesgos escondidos relacionados con la indisponibilidad, la no calidad, la inseguridad, los costos de repuestos, entre tantos otros, los que son resultados de la confiabilidad y mantenibilidad de los equipos.

Si bien conceptualmente el tema es fácilmente asimilable, el asunto es bastante más difícil cuando uno se enfrenta a la realidad que imponen las plantas industriales compuesta por diferentes equipos integrados entre sí con las más diversas configuraciones y con comportamientos operacionales que cambian continuamente durante la vida de los mismos. La solución de problemas de este tipo requiere, además de los conocimientos propios de los procesos, de una buena base probabilística para el desarrollo de modelos complejos que permita simular diferentes condiciones operacionales para, mediante análisis económicos y financieros, obtener indicadores de evaluación bajo incertidumbre.

Además el contar con estudios con este enfoque, asociado con el *Life Cycle Cost (LCC)*, permite no sólo resolver a nivel de la ingeniería conceptual y el estudio económico-financiero, sino también sirve como elemento de apoyo para el desarrollo del proyecto a nivel de ingeniería básica y de detalles, dado su valor para la configuración del sistema y sus redundancias, selección de los equipos, el *layout* de los mismos, la definición de los repuestos críticos y la elaboración de un plan maestro de mantenimiento que minimice los costos globales.

De la lectura de este libro *Ingeniería y gestión de la confiabilidad de plantas industriales* he notado su aporte teórico y práctico

de esta materia que se caracteriza por su complejidad y amplitud, lo que queda de manifiesto al recorrer los diversos capítulos que consideran, en la perspectiva de la confiabilidad operacional, desde una descripción general de las etapas de un proyecto, del estudio de costos, de la confiabilidad de equipos y sistemas, de las soluciones sistémicas, de la organización y la gestión de proveedores. Además en su último capítulo presenta la plataforma R-MES que he tenido la oportunidad de utilizar, permitiéndome identificarla como una herramienta poderosa ya que permite de manera simple y amigable desarrollar este tipo de estudios que se caracterizan por su complejidad.

El libro es el reflejo del autor, quien se ha caracterizado por su contribución teórica a través de su desarrollo académico fuertemente vinculado con la realidad empresarial, producto de su larga trayectoria como consultor de grandes empresas tanto a nivel nacional e internacional en diversos sectores industriales. Estimo que este libro se distingue del resto de la literatura disponible sobre esta área del conocimiento, por lo que es un muy buen material de estudio para los alumnos de ingeniería, como también es una excelente fuente de consulta para profesionales de experiencia que se dedican a la concepción, desarrollo e implementación de nuevos proyectos de inversión y para aquellos que le corresponde la operación y el mantenimiento de instalaciones industriales.

Santiago Núñez L.
Ex Gerente de Plantas División Andina, Codelco Chile
Gerente de Proyectos, Codelco Chile
Santiago, (Chile), agosto de 2008

ÍNDICE DE CONTENIDOS

| | |
|---|-----|
| PRESENTACIÓN | 27 |
| CAPÍTULO 1 | |
| ETAPAS DE UN PROYECTO Y LAS PLANTAS INDUSTRIALES | 39 |
| 1.1. Etapas y actividades del proyecto | 39 |
| 1.2. Estudio de mercado | 41 |
| 1.3. Ingeniería del proyecto..... | 42 |
| 1.3.1. Sobre la capacidad productiva | 43 |
| 1.3.2. Sobre la localización | 44 |
| 1.3.3. Sobre la selección del proceso | 45 |
| 1.3.4. Sobre la confiabilidad y la mantenibilidad..... | 47 |
| 1.3.5. Sobre el <i>layout</i> | 51 |
| 1.4. Análisis económico y financiero | 53 |
| 1.5. Clasificación de las plantas | 54 |
| 1.5.1. Instalaciones de producción o unidades tecnológicas | 55 |
| 1.5.2. Instalaciones de servicio | 57 |
| CAPÍTULO 2 | |
| ESTIMACIÓN GENERAL DE COSTOS | 61 |
| 2.1. Antecedentes de costos..... | 61 |
| 2.2. Costos del proyecto..... | 63 |
| 2.2.1. Etapa de inversión..... | 64 |
| 2.2.2. Etapa de ejercicio | 65 |
| 2.3. Estimación de costo de capital | 66 |
| 2.3.1. Capital fijo..... | 67 |
| 2.3.2. Capital de trabajo | 88 |
| 2.4. Ejemplos de estimación de capital total de inversión | 89 |
| CAPÍTULO 3 | |
| FUNDAMENTOS DE CONFIABILIDAD | 99 |
| 3.1. Costo durante el ciclo de vida | 100 |
| 3.2. Teoría de confiabilidad aplicada a sistemas | 103 |

| | |
|--|-----|
| 3.2.1. Cálculo de funciones de confiabilidad y falla | 109 |
| 3.2.2. Confiabilidad de sistemas..... | 113 |
| 3.2.3. Mantenibilidad | 131 |
| 3.2.4. Disponibilidad de componentes y sistemas | 134 |
| 3.2.5. Costos globales | 139 |
| 3.2.6. Análisis de redundancia | 141 |
| 3.2.7. Evaluación de la seguridad de funcionamiento..... | 144 |
| 3.2.8. El método de Montecarlo..... | 147 |
| 3.2.9. Caso: Planta de filtrado | 150 |
| 3.2.10. Caso: Planta concentradora..... | 156 |
| 3.3. Ejemplos | 162 |

CAPÍTULO 4

| | |
|---|-----|
| ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO..... | 193 |
| 4.1. Introducción | 193 |
| 4.2. Evolución del mantenimiento | 194 |
| 4.3. Lógica para definición de política de mantenimiento | 197 |
| 4.4. Modelos de mantenimiento preventivo..... | 199 |
| 4.4.1. Mantenimiento preventivo a fecha constante..... | 199 |
| 4.4.2. Mantenimiento preventivo a edad constante..... | 200 |
| 4.4.3. Mantenimiento preventivo según condición | 205 |
| 4.4.4. Sustitución para caso “n” componentes | 207 |
| 4.5. Inspección óptima | 209 |
| 4.5.1 Inspecciones óptimas mantenimiento preventivo I.. | 209 |
| 4.5.2 Inspecciones óptimas mantenimiento preventivo II. | 210 |
| 4.6. Ejemplo políticas de mantenimiento..... | 211 |
| 4.7. Renovación de equipos | 218 |
| 4.7.1. Sustitución de equipos | 219 |
| 4.7.2. Modelos de reemplazo | 220 |
| 4.7.3. Alternativas de costo anual uniforme equivalente.... | 224 |
| 4.8. Metodologías de análisis de componentes críticos | 225 |
| 4.8.1. MAFEC..... | 226 |
| 4.8.2. Caso: Equipos rodantes en una empresa minera.... | 231 |
| 4.8.3. HAZOP | 238 |
| 4.9. Plan Matriz de Mantenimiento..... | 240 |
| 4.9.1. Metodologías para la definición del Plan Matriz ... | 241 |

| | |
|---|-----|
| CAPÍTULO 5 | |
| EL DISEÑO EN LA SEGURIDAD OPERACIONAL | 245 |
| 5.1. Introducción | 245 |
| 5.2. Centralización y descentralización..... | 246 |
| 5.2.1. Centralización | 246 |
| 5.2.2. Descentralización | 246 |
| 5.3. Fraccionamiento y no fraccionamiento..... | 247 |
| 5.3.1. Caso no fraccionado..... | 247 |
| 5.3.1.1. Ventajas del no fraccionamiento | 248 |
| 5.3.1.2. Modelo de no fraccionamiento | 249 |
| 5.3.2. Fraccionamiento..... | 252 |
| 5.3.2.1. Ventajas | 252 |
| 5.3.2.2. Modelo fraccionado | 253 |
| 5.3.3. Variabilidad en la demanda de los usuarios | 255 |
| 5.3.4. Redundancia o equipos de reservas | 264 |
| 5.3.4.1. Conclusiones | 267 |
| 5.4. Procesos con acumulación o pulmón..... | 267 |
| 5.4.1. Caso de completa disponibilidad del servicio | 268 |
| 5.4.1.1. Procesamiento con un solo nivel de producción..... | 268 |
| 5.4.1.2. Procesamiento con dos niveles de producción | 270 |
| 5.4.1.3. Dimensionamiento del servicio..... | 271 |
| 5.4.2. Caso de “parcial” indisponibilidad del servicio | 273 |
| 5.4.3. Indisponibilidad del generador..... | 275 |
| 5.5. Ejemplo compresor-pulmón..... | 276 |
| 5.6. Ejemplo: Generación aire comprimido | 278 |
| CAPÍTULO 6 | |
| LAS PERSONAS EN LA CONFIABILIDAD..... | 293 |
| 6.1. La organización liviana..... | 293 |
| 6.2. Ingeniería de confiabilidad en la organización | 300 |
| 6.2.1. Rol de la ingeniería de confiabilidad | 300 |
| 6.2.2. La Ingeniería de confiabilidad y la organización | 303 |
| 6.3. Confiabilidad humana | 307 |
| 6.3.1. Error humano | 312 |
| 6.3.2. Análisis de la confiabilidad humana (HRA) | 314 |
| 6.3.3. Estrategias de confiabilidad humana..... | 317 |
| 6.3.4. Gestión del conocimiento | 320 |

CAPÍTULO 7

| | |
|--|-----|
| ABASTECIMIENTO Y EXTERNALIZACIÓN DEL MANTENIMIENTO | 323 |
| 7.1. Introducción | 323 |
| 7.2. Evolución y tendencias mundiales..... | 326 |
| 7.2.1. Evolución del mantenimiento | 326 |
| 7.2.2. Evolución en las técnicas de mantenimiento | 328 |
| 7.2.3. Evolución del <i>outsourcing</i> | 329 |
| 7.2.4. Tendencia industrial europea..... | 330 |
| 7.3. Externalización..... | 331 |
| 7.3.1. El <i>Outsourcing</i> en la Organización Liviana (OIL)... | 331 |
| 7.3.2. El <i>outsourcing</i> como factor de competitividad | 332 |
| 7.3.3. Tercerización del mantenimiento | 333 |
| 7.4. <i>Global service</i> | 336 |
| 7.4.1. Del <i>outsourcing</i> al <i>global service</i> | 336 |
| 7.4.2. Objetivos del <i>global service</i> de mantenimiento | 337 |
| 7.5. Abastecimiento estratégico | 339 |
| 7.5.1. Abastecimiento y costo global de mantenimiento.. | 339 |
| 7.5.2. Proceso de abastecimiento estratégico | 340 |
| 7.5.3. Mejores prácticas de abastecimiento..... | 341 |
| 7.5.4. Cadena de valor de la función abastecimiento | 342 |
| 7.5.5. Proceso de identificación de oportunidades | 343 |
| 7.6. Metodologías y estrategia, un abastecimiento competitivo | 344 |
| 7.6.1. Abastecimiento estratégico de equipos | 344 |
| 7.6.2. Abastecimiento estratégico de repuestos..... | 347 |
| 7.6.3. Abastecimiento estratégico de lubricantes | 352 |
| 7.6.4. Abastecimiento y externalización de servicios | 357 |
| 7.7. Contratación del mantenimiento | 385 |
| 7.7.1. Proceso de licitación | 385 |
| 7.7.2. Tipos de contrato | 387 |
| 7.7.3. Modelos de contratación y pago | 389 |
| 7.8. Relación cliente-proveedor | 391 |
| 7.9. Administración de contratos..... | 394 |
| 7.10. Procesos y gestión para el abastecimiento | 396 |
| 7.10.1. Rediseño de procesos | 396 |
| 7.10.2. Gestión competitiva | 398 |
| 7.11. Organización para un abastecimiento de clase mundial. | 401 |

| | |
|---|-----|
| CAPÍTULO 8 | |
| R-MES, INSTRUMENTO PARA LA AGREGACIÓN DE VALOR..... | 405 |
| 8.1. Introducción | 405 |
| 8.2. Descripción Plataforma R-MES..... | 409 |
| 8.2.1. Entregables de R-MES..... | 413 |
| 8.3. Caso aplicado | 414 |
| 8.3.1. Definiciones generales del modelo | 414 |
| 8.3.2. Modelamiento en R-MES | 415 |
| 8.3.3. Alternativas de mejoramiento | 428 |
| Bibliografía y referencias..... | 431 |
| Índice de tablas | 435 |
| Índice de figuras..... | 437 |

PRESENTACIÓN

El proceso de globalización obliga a todas las empresas, independientes de su tamaño y sector en cual participan, confrontarse permanentemente a nivel mundial, lo que les exige abordar nuevos desafíos para lograr alcanzar la competitividad según estándares internacionales, los que deberá afrontar de manera inteligente y responsable buscando permanentemente su diferenciación, en caso contrario, arriesga su permanencia en el mercado con las negativas consecuencias que ello implica.

La competitividad empresarial es un asunto complejo en el que intervienen factores propios de la empresa como también del entorno organizacional, territorial y mundial. La competitividad de una empresa se logra no sólo siendo eficientes a través de la reducción de los costos, sino también siendo eficaces en la atención al cliente tanto interno como externo, y siendo efectivos en el cuidado del medio ambiente y en el respeto a las personas.

Sin embargo, estos factores no son suficientes sin que, adicionalmente, se genere un ambiente que motive la capacidad de innovar de manera permanente para asegurar la proyección de la competitividad en el futuro a través del mejoramiento continuo de la eficiencia, la eficacia y la efectividad.

Competitividad es la habilidad de vender, producir, satisfacer al cliente y adaptarse de manera sustentable en el tiempo gracias a la generación de ventajas competitivas que permiten competir y ser más eficiente, eficaz, efectivo e innovador que los competidores nacionales e internacionales maximizando el valor económico de la empresa.

La competitividad se logra haciendo cada vez con menos, más y mejor, y bien, en caso contrario la empresa afecta sus ventajas competitivas y como consecuencia su condición de *World Class*.

En este nuevo escenario, la adecuada gestión y mantenimiento de los activos físico, con un enfoque que considere los costos durante todo su ciclo de vida (LCC), asume un rol cada vez más significativo para el logro de los resultados del negocio, ya que tiene relación directa con los factores que influyen en la competitividad empresarial.

El efecto de los costos propios del mantenimiento, asociados con la mano de obra, materiales, repuestos y terceros, pueden superar el 30% de los costos de producción en empresas intensivas en activos físicos, sin considerar aquellos otros inducidos como los costos de la improductividad, de la no calidad, del lucro cesante, etc., que pueden llegar a duplicar los costos propios del mantenimiento en sistemas de producción críticos, debido a una inadecuada gestión y mantenimiento de los activos que afecta la seguridad de funcionamiento de los equipos e instalaciones.

También las actuales condiciones que impone un mercado siempre más exigente obligan que la empresa asuma su labor con responsabilidad social y con un sistema productivo flexible que opera con la lógica de la *Lean Production*, la que no sólo está basada en la gestión de la calidad sino también en el mantenimiento productivo.

En este complejo entorno un enfoque que contribuye a alcanzar la excelencia empresarial es la Confiabilidad Operacional, que es la capacidad de la empresa, a través de los procesos, las tecnologías y las personas, para cumplir con su propósito dentro de los límites del diseño y de las condiciones operacionales. La Confiabilidad Operacional considera una serie de procesos de mejora continua que incorporan en forma sistemática herramientas de diagnóstico, metodologías de análisis y nuevas tecnologías, para optimizar el proyecto, la gestión, la planeación, la ejecución y el control, asociados con la producción, el abastecimiento y el mantenimiento industrial.

Para la búsqueda de la Confiabilidad Operacional es necesario actuar de manera integrada sobre los activos, desde su diseño

hasta su operación, como también sobre aspectos relacionados con los procesos y las personas, es así como las componentes que la conforman y que actúan integradamente son la confiabilidad de los procesos.

La Confiabilidad Operacional tiene cinco ejes que se deben considerar y sobre los cuales se debe actuar si se desea obtener una instalación confiable a largo plazo en términos que opere según lo proyectado. Estos ejes son: la confiabilidad humana que se relaciona con el involucramiento, el compromiso y las competencias que disponen las personas con las actividades que le corresponde realizar y la estructura organizacional para lograrlo; la mantenibilidad y confiabilidad de los activos que se vincula con el diseño de los equipos y su apoyo logístico, para la disminución del tiempo medio para reparar y con las estrategias de mantenimiento de los equipos e las instalaciones y con la efectividad del mantenimiento, para el aumento de su tiempo medio entre fallas, respectivamente; la confiabilidad del proceso que se asocia con la sintonía que existe entre el proceso y los procedimientos utilizados para operar las instalaciones, con los parámetros operacionales que se deben utilizar, de manera de respetar las condiciones establecidas; y por último la confiabilidad de los suministros que se refiere a la integración entre las distintos procesos o unidades internas, como operación, mantenimiento, abastecimiento, desarrollo, y los proveedores de insumos, energía, bienes o servicios de modo asegurar el suministro en términos de cantidad, calidad, oportunidad y costo a través de procesos establecidos que faciliten la logística de entrada y permitan cuando corresponda la gestión de terceros, la administración eficiente de contratos y el análisis de la oferta.

La adecuada gestión y mantenimiento de los activos, principalmente en actividades industriales intensivas en el uso de los equipos, tiene un rol significativo en la Confiabilidad Operacional. Su efecto sobre la competitividad, no siempre está asumido al interior de las empresas debido fundamentalmente por una cultura organizacional que aún se caracteriza por considerar el mantenimiento como una unidad de costos más que una alternativa para mejorar los resultados del negocio, como también por limitar su tarea para

la etapa de la operación sin identificar la importancia que esta función tiene en el diseño de nuevos proyectos y equipos para mejorar la seguridad de funcionamiento con su efecto sobre los costos, el ambiente y las personas.

En el diseño de proyectos industriales los principales esfuerzos de Ingeniería están orientados a optimizar los distintos procesos operacionales que constituyen la cadena de valor. Normalmente se destinan importantes recursos en evaluar distintos escenarios a través de complejas herramientas financieras que buscan reducir la incertidumbre abarcando la mayor cantidad de variables y sus respectivas proyecciones en el horizonte de evaluación, sin considerar el riesgo asociado a no cumplir con los planes de producción e ingresos proyectados por los ingenieros de procesos. Los modelos de optimización que originan las estimaciones de producción se sustentan en condiciones ideales difícilmente alcanzables que ocasionalmente obligan a incorporar factores de seguridad definidos sin la rigurosidad y certeza asignada al resto del proyecto.

Este problema tiene su solución en la utilización de herramientas de Ingeniería de Confiabilidad que permitan calcular de forma robusta e intrínseca a cada proyecto la probabilidad de falla o no funcionamiento del sistema productivo, con el objetivo de establecer una función de ingreso que obligue a optimizar los procesos evaluando su Confiabilidad Operacional para así estimar la real rentabilidad del proyecto o en su defecto considerar las nuevas inversiones para alcanzar el *VAN* exigido o para disminuir el nivel de incertidumbre.

No son pocos los casos en los que proyectos industriales no alcanzan las capacidades operacionales para las cuales fueron diseñados con el efecto negativo que esto significa para los inversionistas ya que se debe operar a niveles de producción por debajo a las condiciones estándar reduciendo los ingresos o, por otro lado, se debe aumentar los costos operacionales para compensar las deficiencias.

Es posible establecer que, generalmente, es más conveniente encontrar la mejor solución genética a nivel del Proyecto de In-

geniería que subsanar los errores durante la construcción y la operación de las instalaciones a través de permanentes modificaciones o por medio de exigentes sistemas de gestión y control.

También se puede establecer que no pocas veces que proyectos, por consideraciones aproximadas en su etapa de desarrollo, no logran la rentabilidad exigida, por lo que son erróneamente rechazados perdiéndose, de esta manera, buenas oportunidades de inversión.

Esta cultura, casi generalizada a nivel mundial en el ambiente industrial, es resultado tanto de la insensibilidad de muchos *manager* de no visualizar en la gestión y mantenimiento de los activos una fuente de grandes oportunidades en beneficio del negocio como de los ingenieros de proyectos de limitar sus análisis a los costos de capital y de operación sin visualizar el efecto este asunto en los costos asociados con la seguridad de funcionamiento. También, es resultado de la incapacidad de muchos mantenedores de no superar su focalización en el ejecutar mantenimiento por una forma más evolucionada de hacer mantenimiento, que se caracterice por agregar valor al negocio a través del diseño, de la prevención y del mejoramiento continuo, en una perspectiva sistémica que considere todo el ciclo de vida de los equipos y las instalaciones.

Esta manera más evolucionada de la gestión y el mantenimiento de los activos físicos, busca no sólo cómo ejecutar eficientemente el mantenimiento sino cómo hacer de esta función un proceso eficaz que contribuya con el logro final perseguido por el negocio. Para lograr este cambio se debe superar su acción limitada a nivel operativo, en una perspectiva de corto plazo, para asumir además un rol estratégico-táctico, con una visión amplia de mediano y largo plazo.

Esta nueva forma de concebir y hacer mantenimiento persigue transformar esta función empresarial desde una unidad de gasto a una de resultado y de oportunidades. Esto requiere crear una cultura organizacional en la que prevalezca la integración, la prevención, el mejoramiento continuo, el conocimiento, la tecnología y la innovación.

Para responder con estos nuevos desafíos es necesario intervenir en el plano de la organización, favoreciendo el *Core Business*, los procesos y la gestión participativa (*Lean Organization*) por sobre las estructuras funcionales y jerárquicas. Como también es requisito actuar en el plano de la gestión y el mantenimiento de los activos físicos, desarrollando una visión amplia sobre todo en el ciclo de vida de los equipos e instalaciones (Ingeniería de Confiabilidad). Además, es necesario considerar el apoyo de las tecnologías de la información y las comunicaciones (*ICT*), a través de los *CBM* (*Condition Base Maintenance*), *CMMS* (*Computer Maintenance Management System*) y *Data Base System*, de manera de asegurar la captura y el registro confiable de los datos de intervención e inspección (*Mobility*), y su procesamiento, a través de algoritmos y modelos, para transformarlos en información y conocimiento útil y oportuno para el desarrollo de nuevos proyectos de inversión y para la elaboración de los planes del mantenimiento productivo y su permanente mejoramiento producto de la dinámica asociada a la operación de los equipos, de las competencias laborales de las personas y de las cambiantes condiciones del entorno.

La Ingeniería de Confiabilidad, también llamada Ingeniería de Mantenimiento, asume un rol cada vez más relevante en el proceso de cambio de cómo deben hacer el mantenimiento los mantenedores, de cómo deben concebir los ingenieros de proyecto la seguridad operacional de los sistemas y de cómo deben entender la gestión y el mantenimiento de los activos los *managers* de la empresa.

La Ingeniería de la Confiabilidad, a través del compromiso del factor humano y del análisis cuantitativo, debe, a partir del comportamiento de los equipos y de sus configuraciones sistémicas, proyectar, mejorar y controlar la gestión y el mantenimiento de los activos, desde la etapa de concepción de nuevos proyectos hasta la operación de los mismos. Es la función que entrega valor ya que a través de la modelación de las variables asociadas con la seguridad de funcionamiento de los equipos y sistemas (disponibilidad, confiabilidad, mantenibilidad y utilizabilidad), y con los costos globales (costos propios e inducidos), logra identificar los

factores críticos de acuerdo a la combinación de la frecuencia de los eventos y su impacto.

La Ingeniería de Confiabilidad permite determinar, sobre una base cuantitativa y cualitativa, las soluciones a nivel de proyecto a través del enfoque LCC, los planes de mantenimiento productivo y las mejoras continuas que optimizan la gestión y el mantenimiento de activos favoreciendo los resultados del negocio.

En la actualidad, gran parte de las grandes empresas a nivel mundial están cambiando su visión de la gestión y el mantenimiento de los activos, superando su mirada parcial y de corto plazo de considerarlo sólo como un costo para visualizarlo como una importante oportunidad para mejorar la Confiabilidad Operacional, por lo que la participación de la Ingeniería de Confiabilidad en la gestión y en el desarrollo de nuevos proyectos es algo que está siendo cada vez más considerada.

Sin embargo, no necesariamente la Ingeniería de Confiabilidad ha sido bien interpretada, implementada y desarrollada en las empresas, debido fundamentalmente a que las competencias de los mantenedores ha estado tradicionalmente limitada a ejecutar mantenimiento más que al cómo evitarlo a través de una lógica en la que prevalezca la prevención y el mejoramiento genético de equipos y sistemas, como también las competencias de los ingenieros de proyecto ha estado ajena a los conocimientos relacionados con la seguridad operacional, asociada a la confiabilidad y mantenibilidad de los activos.

Para salvar y superar esta situación, de manera que la Ingeniería de Confiabilidad se transforme en una realidad y entregue los aportes esperados, es fundamental que los profesionales dedicados al mantenimiento y al desarrollo de proyectos adquieran las capacidades necesarias para el desarrollo de esta relevante actividad en la empresa, de manera de disminuir las brechas existentes, en gran parte de las organizaciones, entre las competencias disponibles y las requeridas, de forma que el ingeniero de confiabilidad, además de su función en la etapa de operación de una instalación, también

asuma un rol importante en el diseño de nuevos equipos y plantas industriales y en la definición de sus planes de mantenimiento, los que no sólo deben contener las intervenciones e inspecciones sino también debe incluir el factor humano en términos de su estructura organizacional y de las competencias requeridas.

Si bien conceptualmente la Confiabilidad Operacional es de fácil comprensión, su aplicación requiere de modelos analíticos y probabilísticos complejos ya que las instalaciones industriales se caracterizan por una gran cantidad de equipos que se encuentran en diferentes fases de su ciclo de vida (mortalidad infantil, vida útil y desgaste), además se integran sistémicamente de las más diversas formas (serie, paralelo, redundancia parcial, *stand by* y fraccionamiento) y los costos asociados son de distinta índole (costos directos y costos de la falta).

Estos modelos permiten la simulación de diferentes soluciones en término de las redundancias, del fraccionamiento y de las características de los equipos como también del tipo de estrategia de gestión a implementar, permitiendo determinar las criticidades, la seguridad de funcionamiento de las instalaciones (disponibilidad) y los costos globales asociados.

Dado la complejidad y la dinámica de estos procesos es fundamental contar con herramientas informatizadas que permita la simulación de manera fácil y confiable. Entre ellas vale la pena destacar el *R-MES (Reliability & Maintenance Engineering System)*.

Este libro de *Ingeniería y gestión de la confiabilidad operacional en plantas industriales*, pretende ser una contribución para el desarrollo y la implementación de la Ingeniería de Confiabilidad, tanto como documento de consulta para los profesionales que se relacionan con esta actividad, sean mantenedores, ingenieros de proyectos o consultores, como también un texto de estudio para estudiantes de Ingeniería en las especialidades de proyecto, gestión y mantenimiento de activos físicos.

Los primeros aportes que permiten la publicación de este libro se remontan a la década de los años 80, cuando se considera

conveniente la creación de la asignatura Ingeniería de Plantas para su incorporación en los programas para la formación de ingenieros, con el objetivo de entregar a los alumnos los conocimientos relacionados con el efecto de la Confiabilidad Operacional de sistemas complejos en la toma de decisiones en proyectos industriales bajo el enfoque del ciclo de vida de los equipos, LCC (*Life Cycle Cost*).

Con posterioridad, a partir de las actividades de investigación desarrolladas en centros de investigación extranjeros y del trabajo de consultoría realizados en grandes empresas a nivel internacional, se avanza en la generación de nuevos conocimientos en el área, logrando, en el último tiempo, la concepción e implementación del *software Reliability & Maintenance Engineering System (R-MES)* que integra las diferentes funciones relacionadas con la gestión y el mantenimiento de activos.

El *R-MES*, dado su rigurosidad de modelamiento, facilidad de uso y capacidad de personalización, se ha transformado en una herramienta poderosa para la implementación y desarrollo de la Ingeniería de Confiabilidad en distintos sectores y complejos industriales a nivel internacional, es por esta razón que se incluye una presentación general de esta plataforma en el último capítulo del libro.

A través de un recorrido por los diferentes capítulos que conforman este libro, es posible visualizar su valor, tanto en el plano teórico como aplicado, lo que es reflejo y resultado de las competencias y especialización lograda a través de distintas y variadas experiencias profesionales, como consultores en importantes empresas con presencia internacional, y de una intensa trayectoria académica, como profesores e investigadores en destacadas universidades.

De estas experiencias, tanto en el ámbito de la consultoría como de la académica, realizadas en diferentes países, es posible destacar que el mundo del mantenimiento no tiene fronteras en lo que se refiere a los nuevos desafíos que debe enfrentar y a las oportunidades que ofrece, tareas que serán más fáciles de abordar en la medida que profesores, investigadores, consultores, ingenieros de

proyecto y profesionales relacionados con esta importante área de trabajo, se integren en una red que permita una eficaz gestión del conocimiento que no sólo sea capaz de superar las fronteras de las naciones sino que fundamentalmente logre traspasar las difíciles barreras que separan el mudo universitario del mundo empresarial y que dividen el área del mantenimiento de las áreas de producción, de ingeniería y de recursos humanos.

En este marco se diseña, estructura y desarrolla este libro, cuyo contenido es posible sintetizar de la manera siguiente:

En el primer capítulo se presentan de manera general las etapas de un proyecto y los elementos a considerar para el desarrollo del Estudio de Ingeniería, para lo que se diferencia entre las tecnologías asociadas a los procesos y las instalaciones de servicio que actúan como soporte.

El segundo capítulo se orienta a la estimación de los costos a través de la presentación de diferentes metodologías, que se adecuan y entregan distintos niveles de aproximación de las estimaciones de acuerdo a la información disponible.

El capítulo tercero entrega los fundamentos asociados a la confiabilidad y mantenibilidad de sistemas durante las distintas etapas de vida de los equipos, considerando las diferentes configuraciones que permiten elaborar los diagramas lógicos funcionales.

El cuarto, desarrolla el tema de las estrategias de mantenimiento, que incluye los modelos relacionados con las políticas de mantenimiento, la gestión de repuestos críticos, entre otros.

El capítulo quinto presenta el efecto del diseño de sistemas en la seguridad operacional, considerando el nivel de centralización o fraccionamiento y la incorporación de unidades de acumulación que opera como sistemas de amortiguación.

El sexto, considera el factor organizacional en la seguridad operacional, presentándose en este capítulo algunos elementos so-

bre la organización liviana, la confiabilidad de las personas y la estructuración de la Ingeniería de Confiabilidad en la organización.

En el séptimo, se aborda la problemática del abastecimiento para el mantenimiento con un enfoque de costo global. Se entregan distintas metodologías para mejorar el aprovisionamiento de equipos, repuestos, lubricantes y servicios. Adicionalmente, se desarrollan los temas de *outsourcing* y *global service* desde una perspectiva decisional. Además se pone énfasis en los procesos organizacionales necesarios para enfrentar un abastecimiento en plantas de clase mundial.

El último y octavo capítulo, desarrolla un modelo integral para la determinación de los elementos críticos, que permiten tanto optimizar el diseño de sistemas, como elaborar y mejorar los planes de mantenimiento productivo. Se presenta en este capítulo la plataforma *R-MES* de manera de mostrar sus potencialidades de aplicación.

Adolfo Arata Andreani

Valparaíso (Chile), julio de 2008.