

**PLAN PILOTO DE RCM2 EN LA EMPRESA POLIPROPILENO
DEL CARIBE S.A. (PROPILCO S.A.)**

**RAMÓN ALBERTO RAMÍREZ LAINO
FERNANDO JOAQUIN VILLARREAL POSADA
JULIO CESAR ACOSTA TREJO**

**Monografía de Grado presentada como requisito para optar el título de
Especialista en Gerencia de Mantenimiento**

Director: CARLOS MARIO PÉREZ JARAMILLO
Ingeniero Mecánico

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO
CARTAGENA
2004**

CONTENIDO

	Pag.
INTRODUCCIÓN	1
1. PROPILCO S.A. Y SU ENTORNO	3
1.1 RESEÑA HISTÓRICA	3
1.2 LOCALIZACIÓN	4
1.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO	4
1.4 ORGANIZACIÓN DE MANTENIMIENTO	9
1.5 SISTEMA COMPUTARIZADO DE ADMINISTRACIÓN DEL MANTENIMIENTO EN PROPILCO S.A.	11
1.6 PERSONAL DE MANTENIMIENTO	13
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
2.1 ANTECEDENTES	14
2.2 RESULTADOS DE MANTENIMIENTO DURANTE EL AÑO 2003	14
2.3 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	17
3. MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD – RCM2	19
3.1 INTRODUCCIÓN AL RCM	19
3.1.1 Antecedentes	19
3.1.2 Definiciones	20
3.2 RCM2 – UN NUEVO PARADIGMA DE LA ADMINISTRACIÓN DEL MANTENIMIENTO	22
3.2.1 Evolución de Expectativas y Técnicas de Mantenimiento	22
3.2.2 Patrones de Falla	24

3.2.3 Enfoque Tradicional vs. RCM	26
3.3 LAS 7 PREGUNTAS DE RCM	27
3.4 METODOLOGÍA DE IMPLANTACIÓN DE RCM2	28
3.4.1 Selección del Sistema y definición del Contexto Operacional	28
3.4.2 Definición de Funciones	29
3.4.3 Tipos de Funciones	32
3.5 DETERMINACIÓN DE FALLAS FUNCIONALES	33
3.5.1 Falla Total y Parcial	33
3.5.2 Límites superiores e inferiores	34
3.5.3 Establecimientos de parámetros	34
3.6 IDENTIFICACIÓN DE MODOS DE FALLA	35
3.7 EFECTOS Y CONSECUENCIAS DE FALLA	38
3.7.1 Evidencia de falla	38
3.7.2 Riesgo para la seguridad y el medio ambiente	39
3.7.3 Daños secundarios y su efecto sobre la producción	39
3.7.4 Acción correctiva	39
3.7.5 Información sobre Modos y Efectos de falla	39
3.8 CONSECUENCIAS DE FALLAS OCULTAS	41
3.8.1 Dispositivos de Seguridad	41
3.8.2 Dispositivos de Seguridad con Seguridad Inherente	41
3.8.3 Dispositivos de Seguridad que no son de falla segura	41
3.8.4 La disponibilidad que requieren las funciones ocultas	42
3.8.5 Mantenimiento de rutina y funciones ocultas	43

3.9 TAREAS DE MANTENIMIENTO	43
3.9.1 Tareas Proactivas	44
3.9.2 Tareas de Condición	45
3.9.3 Tareas “a falta de”	47
3.9.4 Selección de Tareas en RCM2	48
3.10 APLICACIÓN DEL DIAGRAMA DE DECISIÓN DE RCM2	49
4. IMPLANTACIÓN DE RCM2 EN PROPILCO S.A.	50
4.1 RESULTADOS ESPERADOS CON LA IMPLANTACIÓN DE RCM2	55
4.2 PRESUPUESTO DE INVERSIÓN	55
CONCLUSIONES	58
BIBLIOGRAFÍA	59

LISTA DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1. Índices de Mantenimiento	11
Tabla 2. Reglas de conducta general del Mantenimiento Tradicional vs. RCM	26
Tabla 3. Presupuesto de Capacitación en RCM2	56
Tabla 4. Presupuesto de Implantación del Proyecto Piloto de RCM2	57

LISTA DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1. Panorámica aérea del área de Reacción de PROPILCO S.A.	3
Figura 2. Ubicación de PROPILCO S.A.	5
Figura 3. Diagrama de flujo del proceso de fabricación del polipropileno	5
Figura 4. Diagrama de proceso de entradas y salidas	9
Figura 5. Organigrama General y de la Superintendencia de Mantenimiento	10
Figura 6. Módulo de Mantenimiento SAP	12
Figura 7. Personal directo de Mantenimiento vs. Contratado	13
Figura 8. Distribución de Ordenes de Trabajo por Tipo	15
Figura 9. Cumplimiento Plan de Mantenimiento, Año 2003	15
Figura 10. Distribución de Órdenes de Trabajo de Instrumentación	16
Figura 11. Distribución de Ordenes de Trabajo Correctivas de Instrumentación, Año 2003	16
Figura 12. Ordenes de Trabajo Correctivas de Instrumentación por Áreas, Año 2003	17
Figura 13. Expectativas crecientes del Mantenimiento	23
Figura 14. Evolución de la Técnicas de Mantenimiento	23
Figura 15. Patrones de Falla de equipos	25
Figura 16. Diagrama de Implantación de RCM-2	28
Figura 17. Deterioro inevitable de los activos	30
Figura 18. Capacidad de funcionamiento de los activos	31

Figura 19. Fallas Funcionales	33
Figura 20. Unificación de parámetros de funcionamiento	34
Figura 21. Modos de falla de una bomba	36
Figura 22. Fallas del impulsor de una bomba centrífuga	37
Figura 23. Clasificación de Modos de Falla	37
Figura 24. Tiempo de parada de máquina y tiempo de reparación	39
Figura 25. Intervalo P-F	47
Figura 26. Grupo de trabajo en PROPILCO S.A.	51
Figura 27. Diagrama de Implantación de RCM2 en PROPILCO S.A.	52
Figura 28. Hoja de Información de RCM	53
Figura 29. Diagrama de decisión	54
Figura 30. Hoja de decisión de RCM	54

RESUMEN

TÍTULO: PLAN PILOTO DE RCM-2 EN LA EMPRESA POLIPROPILENO DEL CARIBE S.A. (PROPILCO S.A.) *

AUTORES: RAMÓN ALBERTO RAMÍREZ LAINO, FERNANDO JOAQUIN VILLARREAL POSADA Y JULIO CESAR ACOSTA TREJO **

PALABRAS CLAVES: Mantenimiento, Confiabilidad, Mantenimiento Centrado en Confiabilidad - RCM, RCM-2, Disponibilidad, Mantenibilidad, Contexto Operacional, Sistema Funcional.

DESCRIPCIÓN O CONTENIDO: La Monografía tiene como tema central la filosofía de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad aplicado a la industria, RCM-2, y su metodología de implantación en una industria petroquímica, como la empresa PROPILCO S.A. Se ha delimitado el alcance de la Monografía a un sistema operacional específico dentro de la empresa, como es el área de Reacción de Propileno, utilizando este sistema como Piloto para la implementación de la filosofía de RCM-2, para posteriormente replicar este trabajo, capitalizando las experiencias que se obtengan de él, al resto de sistemas operacionales la empresa.

La Monografía inicia describiendo la empresa PROPILCO S.A., pasando por su reseña histórica, su localización geográfica, la descripción de su proceso, y su organización de Mantenimiento. Posteriormente se explica en forma resumida la gestión de Mantenimiento de la empresa en el año 2003. Seguidamente, se dedica un capítulo completo para hablar RCM-2, sus antecedentes, su definición, su filosofía, los objetivos que pretende y los pasos que se deben dar para su implantación. Finalmente, se presenta la propuesta de implantación en el área seleccionada como Piloto.

Sabiendo que el RCM-2 ha sido usado exitosamente por una amplia variedad de industrias durante los últimos diez años, la propuesta tiene como objetivo obtener beneficios para PROPILCO S.A. representados en: Mayor seguridad y protección del entorno, debido al mejoramiento en el mantenimiento de los dispositivos de seguridad existentes y claras estrategias para prevenir los modos de falla que puedan afectar a la seguridad; mejores rendimientos operativos, debido a un mayor énfasis en los requisitos del mantenimiento de equipos y componentes críticos, intervalos más largos entre las revisiones, y en algunos casos la eliminación completa de ellas; mayor control de los costos del mantenimiento, debido a menor mantenimiento rutinario innecesario; y por último, más larga vida útil de los equipos, debido al aumento del uso de técnicas de mantenimiento "a condición".

* Monografía

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Especialización en Gerencia de Mantenimiento, Director: Carlos Mario Pérez Jaramillo, Ingeniero Mecánico.

SUMMARY

TITLE: RCM-2 PILOT PLAN IN THE COMPANY POLIPROPILENO DEL CARIBE S.A. (PROPILCO S.A.) *

AUTHORS: RAMÓN ALBERTO RAMÍREZ LAINO, FERNANDO JOAQUIN VILLARREAL POSADA Y JULIO CESAR ACOSTA TREJO **

KEY WORDS: Maintenance, Reliability, Reliability Centered Maintenance - RCM, RCM-2, Availability, Maintainability, Operational Context, Functional System.

DESCRIPTION: The Monograph has as the main subject the philosophy of RCM-2, Reliability Centered Maintenance applied to the industry, and its methodology of implementation in a petrochemical industry, such as the company PROPILCO S.A. The scope of the Monograph has been limited to a specific operational system within the company, which is the Propylene Reaction area, considering this system as the Pilot for the implementation of the RCM-2 philosophy, and afterwards proceeds to replicate this job, taking into account the experiences obtain from it, to the rest of the operational systems within the company.

The Monograph starts describing the company PROPILCO S.A., going through its history, its geographical location, its process description, and its Maintenance organization. Then, there is a summary of the maintenance performance of the company during the year 2003. Then, there is a complete chapter dedicated to RCM-2, its background, its meaning, its philosophy, the objectives that it looks for, and the steps needed for its implementation. Finally, a proposal for the implementation in the area selected as the Pilot is presented.

Knowing that RCM-2 has been successfully used by an ample variety of industries during the last ten years, the proposal has as its objective obtain benefits for PROPILCO S.A. represented in: Increase of safety and environmental protection, due to the improvement of maintenance of the existing safety devices, and clear strategies to prevent the failure modes which could affect Safety; operating performance improvement, due to increase of emphasis in maintenance requirements for critical equipment and parts, longer periods of time between inspections, and even in some cases the elimination of these inspections; increase on control of maintenance expenditures, due to less routine maintenance unnecessary; and finally, longer service life of equipment, because the increase of "condition monitoring" maintenance techniques.

* Monograph

** School of Mechanical Engineering. Maintenance Management Specialization,
Director: Carlos Mario Pérez Jaramillo, Mechanical Engineer.

INTRODUCCIÓN

La operación de plantas petroquímicas exige de programas operativos y de mantenimiento muy exigentes en cuanto a la seguridad y confiabilidad de los equipos se refiere, para garantizar un funcionamiento continuo de los procesos, con la mayor seguridad para los operarios y la planta misma.

En este tipo de industrias, las exigencias hacia los planes y programas de mantenimiento es cada vez mayor, por las nefastas experiencias del sector en el pasado, de grandes catástrofes que han afectado a la humanidad, y los que en algunos casos han sido responsabilizados a deficientes programas de mantenimiento.

El mantenimiento preventivo siempre fue concebido como un sistema de desarme periódico de los equipos para verificar la existencia de fallas en sus componentes, esto ha sido revaluado por su alto costo en mano de obra y partes de repuesto, y confiabilidad del equipo; esta gestión a pesar de proporcionar cierta seguridad nunca ha podido ser considerada la solución perfecta a todos los problemas inherentes al mantenimiento. El mantenimiento está reaccionando ante nuevas expectativas, éstas incluyen una mayor importancia a los aspectos de seguridad y del medio ambiente, un conocimiento creciente de la relación que existe entre el mantenimiento y la calidad del producto, y un aumento de la presión ejercida para conseguir una alta disponibilidad de la maquinaria al mismo tiempo que se optimizan.

Frente a estos cambios, el personal que dirige el mantenimiento en las empresas está buscando un nuevo camino. Quiere evitar equivocarse cuando se toma alguna acción de mejora. Trata de encontrar un marco de trabajo estratégico que sintetice los nuevos avances en un modelo coherente, de forma que puedan evaluarlos racionalmente y aplicar aquellos que sean de mayor valía para ellos y sus compañías.

Algunos diccionarios definen mantener como la causa para continuar o para preservar en un estado existente. Ambas definiciones ponen de manifiesto que el mantenimiento significa la preservación de algo. Pero cuando se tiene que tomar la decisión de mantener algo, ¿qué es lo que se desea causar que continúe? ¿Cuál es el estado existente que se desea preservar? La respuesta a estas preguntas puede encontrarse en el hecho de que todo elemento físico se pone en servicio para cumplir una función o funciones específicas. Por lo tanto, cuando se mantiene un equipo, el estado en que se desea preservarlo debe ser aquel en el que se desea que continúe para cumplir la función determinada.

Lo anterior nos lleva a una de las definiciones de Mantenimiento, “asegurar que todo elemento físico continúe desempeñando las funciones deseadas.

Claramente, para que esto sea posible, los equipos deben ser capaces de cumplir esas funciones previstas. Esto es porque el mantenimiento - el proceso de “causar que continúe” - solamente puede entregar la capacidad incorporada (confiabilidad inherente) de cualquier elemento. No puede aumentarla. En otras palabras, si cualquier tipo de equipo es incapaz de realizar el funcionamiento deseado en principio, el mantenimiento por sí solo no puede realizarlo. En tales casos, debemos modificar los elementos de forma que pueda realizar el funcionamiento deseado, o por el contrario reducir nuestras expectativas.

RCM se llama Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad porque reconoce que el mantenimiento no puede hacer más que asegurar que los elementos físicos continúan dando su capacidad incorporada o teniendo su confiabilidad inherente. La función determinada de cualquier equipo puede definirse de muchas formas dependiendo exactamente de dónde y cómo se esté usando (el contexto operacional). Como resultado de esto, cualquier intento de formular o revisar las políticas de mantenimiento deberían comenzar con las funciones y los estándares de funcionamiento asociados a cada elemento en su contexto operacional presente. Esto lleva a la definición formal de RCM (Reliability Centered Maintenance), un proceso que se usa para determinar los requerimientos del mantenimiento de los elementos físicos en su contexto operacional. Una definición más amplia de RCM podría ser “un proceso que se usa para determinar lo que debe hacerse para asegurar que un elemento físico continúa desempeñando las funciones deseadas en su contexto operacional presente”.

La empresa POLIPROPILENO DEL CARIBE S.A., PROPILCO S.A., fiel a los postulados de su misión, propende por el mejoramiento continuo de sus planes y programas de mantenimiento, y por ello ha aceptado la realización de este trabajo de investigación en RCM-2, una metodología derivada de RCM, aplicada a la industria, con el fin de ser implantado en el futuro cercano, esperando se inicie en el segundo semestre el año 2004.

Un programa de mantenimiento basado en Confiabilidad, aplicado a PROPILCO S.A., le garantiza una operación más segura y confiable, especialmente por la gran cantidad de dispositivos de seguridad que poseen los sistemas de la planta, y el tratamiento que esta filosofía da a las fallas ocultas.

1. PROPILCO S.A. Y SU ENTORNO

1.1 RESEÑA HISTÓRICA

Polipropileno del Caribe S.A. – PROPILCO S.A. – fue creada en Julio de 1989 como un aporte al desarrollo industrial colombiano y constituido como compañía privada por inversionistas colombianos, reconocidos además como soportes de la Industria Nacional desde hace más de 100 años. PROPILCO S.A. cuenta con una amplia trayectoria y experiencia industrial como proveedor de productos de alta tecnología y calidad. Cuenta además con procesos productivos de alta tecnología reconocidos a nivel mundial, y considerados como de los más eficientes y limpios.

La Figura 1 muestra una panorámica aérea del área de Reacción de la empresa, que es el área de incidencia del trabajo desarrollado en la presente monografía.

Figura 1. Panorámica aérea del área de Reacción de PROPILCO S.A.



PROPILCO S.A. inició operaciones en Julio de 1990 con una planta de 120,000 toneladas métricas por año de resinas de polipropileno, utilizando la tecnología Unipol, licenciada por Union Carbide Corporation, actualmente de Dow Chemical.

Cinco (5) años después, se inicio un proceso de desembotellamiento, que incremento su capacidad de producción a 140,000 toneladas al año.

En Octubre del 2001 entró en operación la segunda planta de Polipropileno con una capacidad de 180,000 toneladas anuales para incrementar la capacidad instalada a 320,000 toneladas métricas anuales.

El producto final es vendido tanto en el mercado nacional como internacional donde se exporta a más de 20 países. Los clientes son todas aquellas industrias que transforman la resina de polipropileno en bienes intermedios y finales que sirven para distintos usos industriales y domésticos.

Actualmente PROPILCO S.A. produce tres (3) tipos de resina para diferentes aplicaciones:

- Homopolímeros, caracterizados por su gran rigidez.
- Copolímeros Random, distinguidos por sus propiedades ópticas y de sellamiento.
- Copolímero de Impacto, con excelente relación rigidez – resistencia al impacto.

1.2 LOCALIZACION DE LA EMPRESA

PROPILCO S.A tiene ubicada sus Plantas en la zona industrial Mamonal kilómetro 8, en Cartagena, donde funciona la Vicepresidencia de Operaciones. En la Figura 2 se muestra la localización y un plano de distribución de planta.

En Bogotá funciona la Presidencia, la Vicepresidencia Financiera y Administrativa; y la Vicepresidencia de Ventas y Aplicaciones y Desarrollo.

1.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN

La proceso de fabricación de la resina de Polipropileno es similar tanto en la planta 1 (Tecnología UNIPOL) como en Planta 2 (Tecnología NOVOLEN). La única diferencia importante es que en la tecnología UNIPOL la agitación en el reactor es mediante un compresor que mantiene el lecho fluidizado, mientras que en la de NOVOLEN se utiliza un agitador para ese propósito.

A continuación se procederá a explicar el proceso general para la elaboración de la resina de Polipropileno, el cual se ilustra en la Figura 3.

Para una mayor claridad, el proceso de fabricación del Polipropileno se describe por las áreas que lo componen.

Figura 2. Ubicación de PROPILCO S.A.

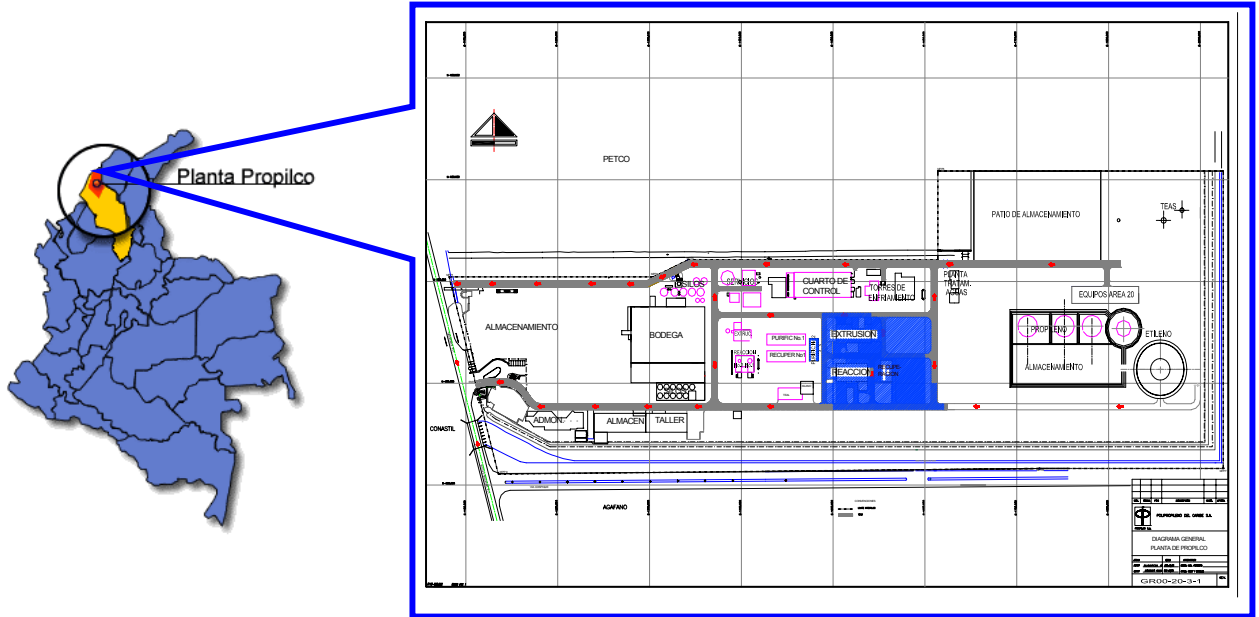
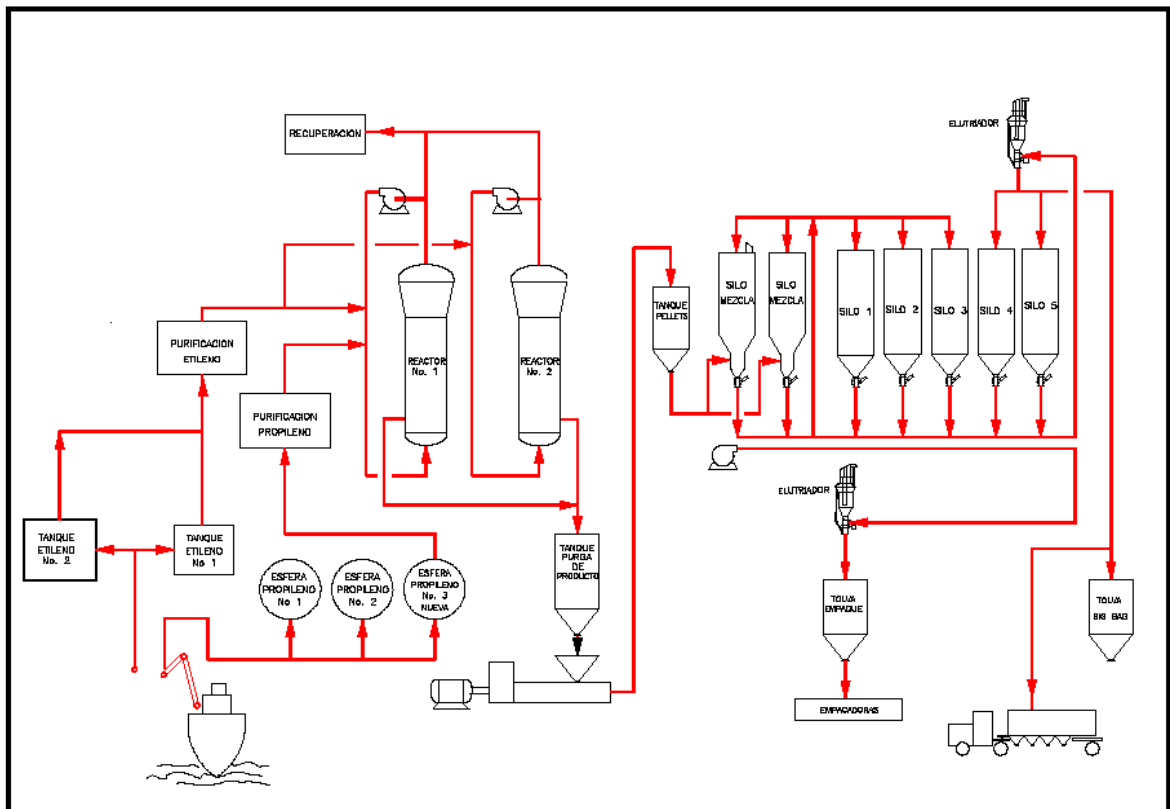


Figura 3. Diagrama de flujo del proceso de fabricación del polipropileno.



1.3.1 Área de Almacenamiento de Monómeros (Propileno y Etileno). En la producción de Homopolímeros se emplea únicamente Propileno, el cual es un hidrocarburo que llega a la planta en estado líquido y a temperatura de -44°C . Este hidrocarburo arriba en buques y se bombea desde el muelle hasta la planta para ser almacenado en tres (3) esferas aisladas convenientemente para la conservarlo líquido a temperaturas criogénicas.

En la producción de Copolímeros Random y Copolímeros de Impacto, además de Propileno se emplea el Etileno. Este hidrocarburo, al igual que el Propileno, llega a la planta en buques, en estado líquido a -106°C y se almacena en dos (2) tanques cilíndricos con una capacidad total de 3.000 TM. debidamente aislados para la conservarlo líquido a temperaturas criogénicas.

1.3.2 Área de Purificación de Materias Primas. Las materias primas que participan en la reacción de polimerización normalmente contienen impurezas tales como agua, oxígeno, alcoholes, monóxido de carbono, etc. Estas impurezas son nocivas para el catalizador que se emplea en la reacción y por ende son retiradas usando un tren de purificación especialmente diseñado para este fin. En el proceso de purificación se emplean básicamente operaciones de destilación y absorción.

1.3.3 Área de Reacción. Producción de Homopolímeros y Copolímeros Random. La reacción se efectúa en fase gaseosa en un reactor de lecho fluidizado al cual se le alimentan continuamente los reactantes y un catalizador especialmente desarrollado para la producción de polipropileno.

El sistema de reacción tiene un reactor, un compresor y un enfriador, y tiene una capacidad aproximada de 500 m³.

El compresor mantiene en circulación continua los gases, succionando gases calientes del tope del reactor forzándolos a pasar a través de un enfriador para retornarlos por el fondo del reactor. El polipropileno sólido formado se descarga continuamente hacia el área de desgasificación.

Producción de Copolímero de Impacto. En la fabricación de éstos productos intervienen dos sistemas de reacción instalados en serie (Ver Figura 3). El sistema de reacción N°2, al igual que el sistema de reacción N°1, está compuesto de un reactor, un compresor y un enfriador. En el reactor N°1 se produce Homopolímero a partir del Propileno y el catalizador. El polipropileno formado se descarga continuamente al reactor N°2 donde la reacción prosigue con una mezcla de

Propileno y Etileno. El Copolímero así formado se descarga hacia el área de desgasificación.

1.3.4 Área de Desgasificación y Peletizado. El polipropileno descargado del sistema de reacción N°1 llega al tanque receptor de producto acompañado de gases ricos en monómero, los gases se ventean hacia el sistema de recuperación y la resina pasa al tanque de purga de producto. En este tanque se purga con Nitrógeno los pocos hidrocarburos que aún contiene el polipropileno. La mezcla nitrógeno-hidrocarburos se ventea hacia la tea, para su disposición final. La resina libre de hidrocarburos pasa al mezclador continuo donde se funde y mezcla con aditivos para luego ser peletizada. Finalmente, el polipropileno peletizado se envía al área de almacenamiento.

Nota: Los aditivos son compuestos químicos que brindan al polipropileno características especiales de resistencia físico-químicas y se adicionan de acuerdo a la aplicación final a que se destine el producto.

1.3.5 Área de Recuperación. Los gases venteados en el tanque receptor de productos son ricos en monómeros y es necesario recuperarlos a fin de hacer más eficiente el proceso. Mediante compresión, enfriamiento y destilación, el propileno venteadado se pasa de la fase gaseosa a la líquida y se recircula a los reactores. Cuando se usa Etileno, éste se recircula hacia el sistema de reacción en estado gaseoso.

1.3.6 Área de Almacenamiento y Empaque. El polipropileno peletizado se almacena en silos y previa certificación en laboratorio de calidad del producto, éste se despacha a los clientes en alguna de las siguientes modalidades:

- Al granel en carro tolva o en containers,
- En super-saco (Big-Bags) de 830 Kg, 1100 Kg y 1250 Kg.
- En bolsas de 25 Kg.

1.3.7 Área de Servicios Generales. Se encarga de suministrar a todas las áreas de la planta servicios tales como:

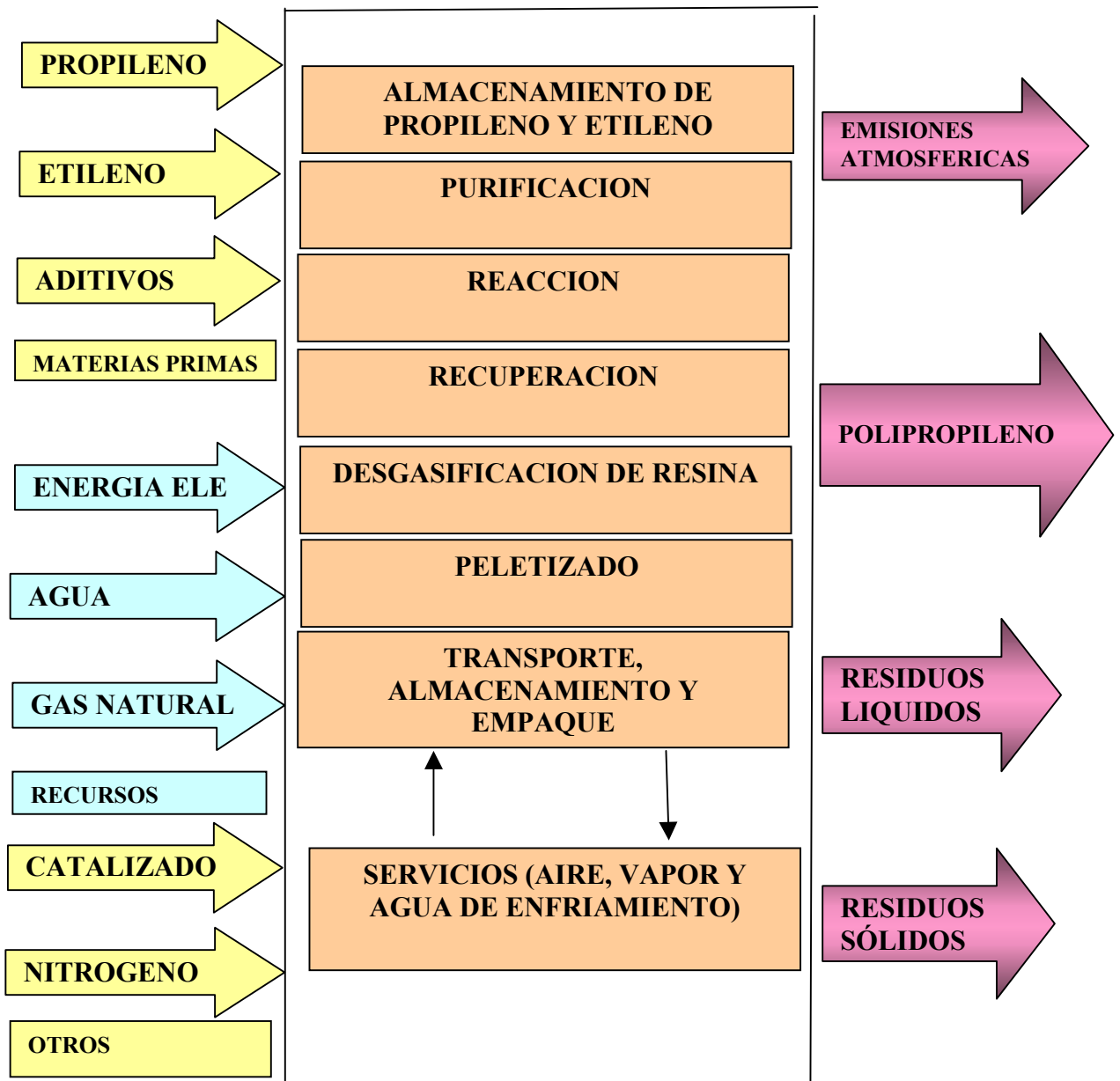
- Aire comprimido: El cual se usa para operar las válvulas automáticas.
- Vapor: Usado como fluido de calentamiento en intercambiadores.
- Agua de Torres: Se utiliza como fluido refrigerante.

1.3.8 Equipos principales. Los equipos principales del proceso de producción son los siguientes:

- Reactor de 140.000 TM/año, 600 #, 4.5 m Φ X 38.0 m Long.
- Compresor Centrifugo Allis Chalmers 600#, 1800 RPM,
- Bomba Durco, modelo Mark III, 1200 RPM, 800 GPM.
- Torre de enfriamiento Tiro inducido, 3300 GPM.
- Caldera Acuotubular, 20.000 Lbs/Hr, 650 PSI.
- Secadores de Propileno (C₃) de 24 TM/Hr
- Esferas de almacenamiento, 7000 TM, 30 PSI, -45°F
- Extrusora de 18 TM/Hr, 4.500 HP.
- Empacadoras de bolsas de 25 Kgs, Capacidad 24 TM/ Hr.

1.3.9 Diagrama de proceso - Entradas y Salidas. En la Figura 4 se muestra un diagrama de bloque del proceso de producción del polipropileno.

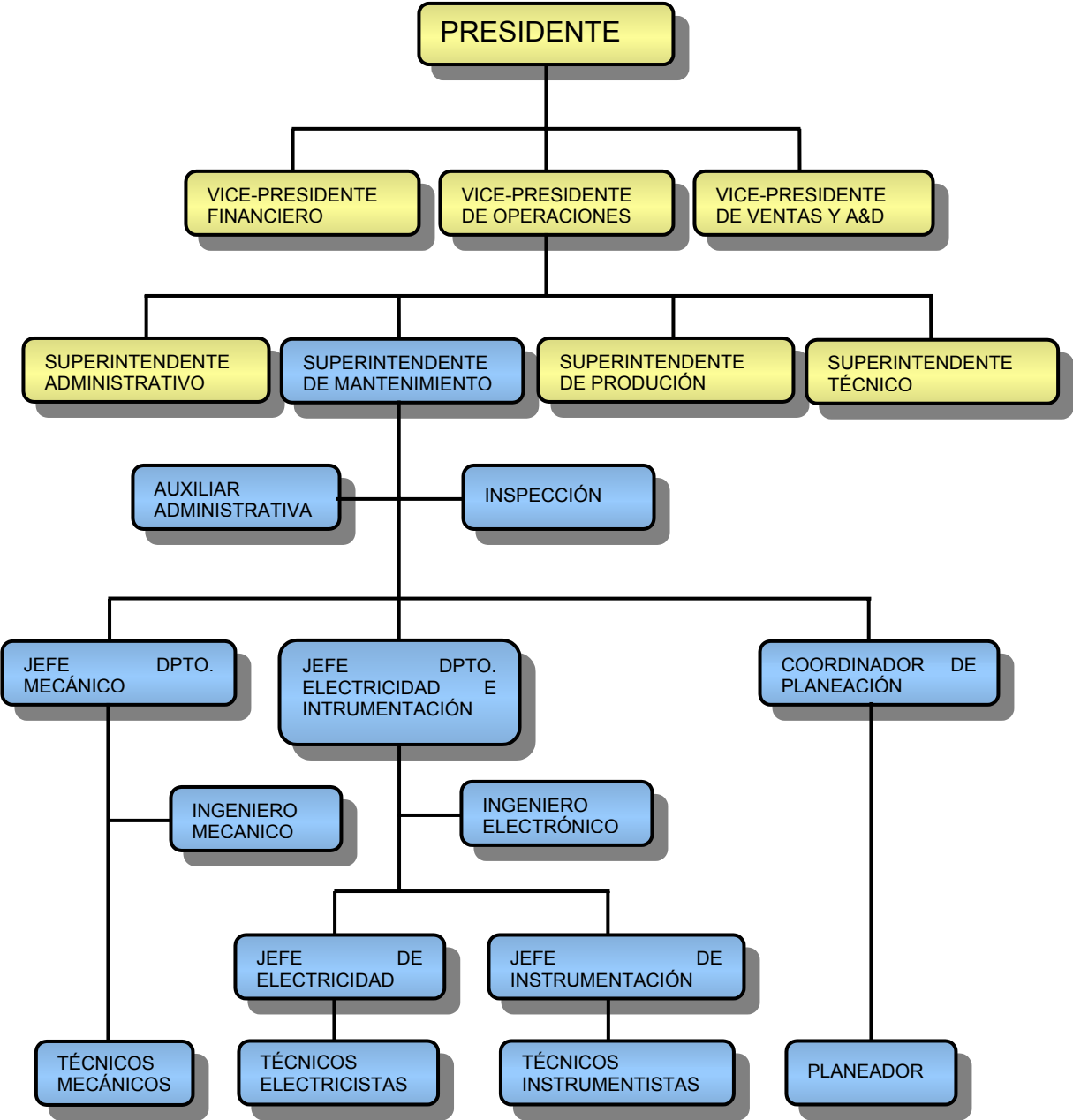
Figura 4. Diagrama de proceso de entradas y salidas.



1.4 ORGANIZACIÓN DE MANTENIMIENTO

Mantenimiento hace parte de la Vicepresidencia de Operaciones y esta definida dentro de la organización como una Superintendencia que a su vez se subdivide en Departamentos tal y como se muestra en la Figura 5.

Figura 5. Organigrama general y de la Superintendencia de Mantenimiento



El control del almacén de repuestos si bien depende de la superintendencia administrativa, mantiene una estrecha relación con la superintendencia de mantenimiento para el establecimiento de los stocks mínimos de repuestos, forma de almacenamiento y reposición de los mismos.

PROPILCO S.A. está certificada bajo la norma ISO 9000 e ISO 14000, lo cual compromete a mantenimiento en el manejo sistemático de sus procesos y los compromete al manejo adecuado de los residuos propios de su labor.

Los objetivos corporativos son definidos por la alta gerencia y las metas establecidas son medidas y analizadas con la gerencia mediante índices, algunos de los cuales son mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1. Índices de Mantenimiento

ÍNDICES CORPORATIVOS	2002	2003
Costo de Mtto/Costo de Producción	1.2%	0.96%
Costo de Mtto/Reposición Act. Productivos	0.93%	1.00%
Costo de Mtto/ Ventas Totales	0.95%	0.79%

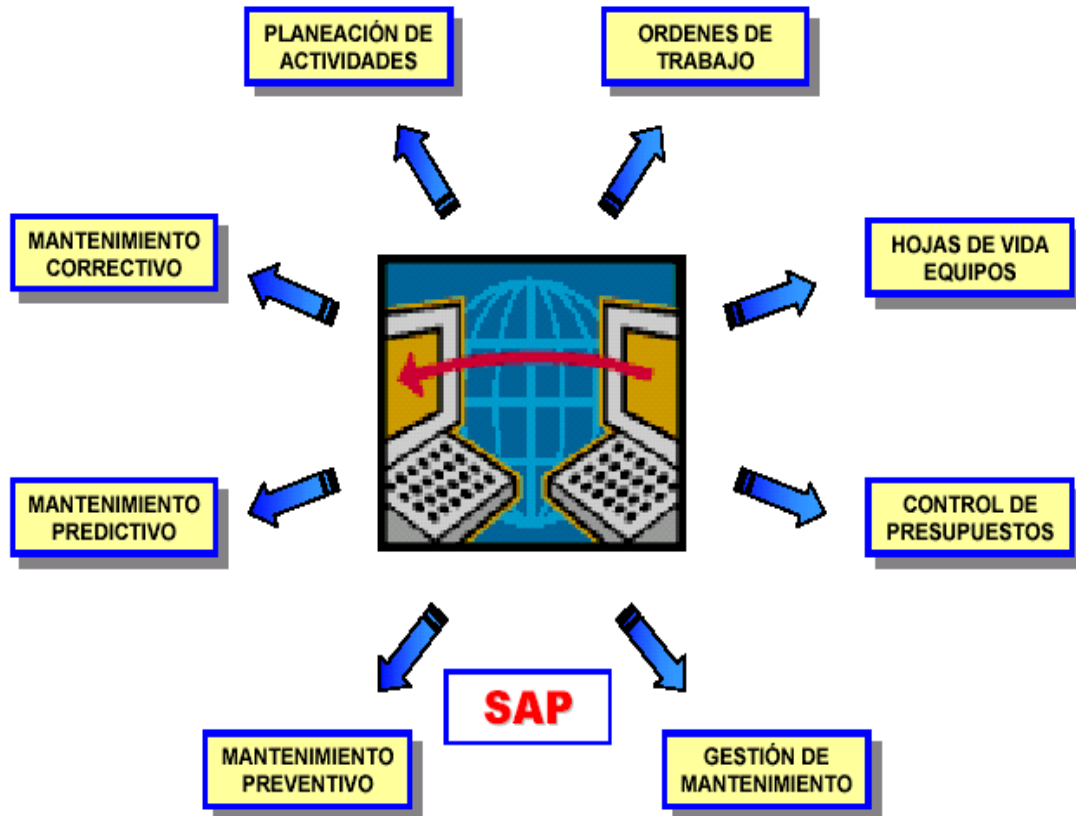
ÍNDICES GENERALES	2003		META 2004
	PROM.	META	
Cumplimiento del Plan Preventivo	93.0%	80%	93%
Ocupación Promedio del personal	69.90%	60%	70%
Número de Re-trabajos promedio	2.64	0	0

El mantenimiento en PROPILCO S.A. se basa en el preventivo, predictivo y correctivo siguiendo los lineamientos de los fabricantes de equipos y la tecnología.

1.5 SISTEMA COMPUTARIZADO DE ADMINISTRACIÓN DEL MANTENIMIENTO EN PROPILCO S.A.

El control del mantenimiento en PROPILCO S.A. es manejado a través del programa de informática corporativo SAP, el cual tiene un módulo especializado en Mantenimiento, identificado como PM, y esquematizado en la Figura 6.

Figura 6. Módulo de mantenimiento de SAP.



El módulo de mantenimiento de SAP maneja las siguientes actividades:

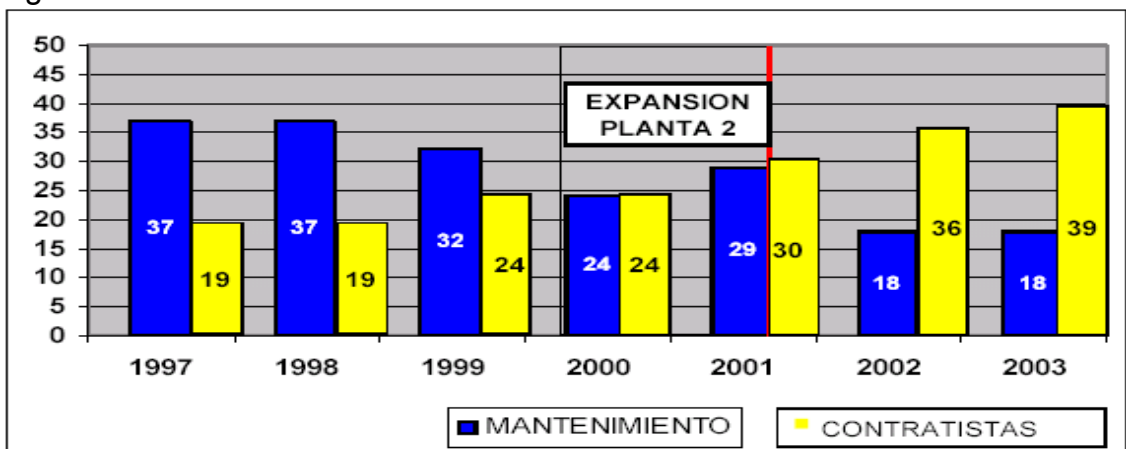
- **Mantenimiento Preventivo:** generación automática de actividades preventivas establecidas para cada activo de acuerdo con las frecuencias asociadas al Plan de Mantenimiento.
- **Mantenimiento Predictivo:** control del cumplimiento de las rutas de inspección predictiva de equipos estacionarios (tanques atmosféricos, recipientes a presión, transformadores de energía, subestaciones eléctricas, entre otros) y rotativos de la planta, de acuerdo con un plan de frecuencia establecido.
- **Mantenimiento Correctivo:** emisión de Órdenes de Trabajo Correctivas a partir de solicitudes de los departamentos de Producción e Inspección.
- **Planeación de Trabajos:** planeación de Órdenes de Trabajo, asignando recursos humanos, materiales, herramientas, costos, duración, etc., para la posterior programación y ejecución de las mismas.

- Generación de Órdenes de Trabajo: dependiendo del tipo de solicitud (Preventiva, Predictiva o Correctiva) se emite las Órdenes de Trabajo, para la posterior planeación, programación y ejecución de las mismas.
- Actualización de las Hojas de Vida de los equipos: actualización de las Hojas de Vida de los equipos de acuerdo con la información suministrada en el cierre de cada una de las órdenes de trabajo ejecutadas y asignadas al equipo correspondiente.
- Control de presupuesto: establece los costos de cada orden de trabajo en los diferentes rubros contables, como mano de obra, materiales y servicios contratados, y se pueden generar reportes periódicos de cada uno de los rubros contables, y compararlos con en el presupuesto asignado.
- Gestión de Mantenimiento: generación de índices de gestión preestablecidos para cada período, lo cual ayuda a fijar metas y objetivos dentro del control gerencial del mantenimiento.

1.6 PERSONAL DE MANTENIMIENTO

La ejecución del mantenimiento se realiza en forma combinada con recursos propios y externos (Outsourcing). Actualmente se tienen 18 empleados directos y 39 contratados mediante servicios tal y como muestra la Figura 7. Esto ha obedecido a un proceso gradual de optimización de recursos que empezó en 1997 y ha permitido manejar los requerimientos de mantenimiento de una manera más eficiente y flexible. Se puede observar que en el 2001 hubo un incremento del personal base debido al montaje de una nueva línea de producción que Demandó muchos recursos propios de manera puntual.

Figura 7. Personal directo de mantenimiento vs. Contratado.



2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 ANTECEDENTES

Es política de PROPILCO S.A. mantenerse actualizada en tecnología de punta, tanto para los procesos como para con los equipos ó activos. Esto hace que el personal de Mantenimiento sea altamente calificado y esté entrenado para atender los requerimientos de las nuevas tecnologías.

Acorde con la misión de Mantenimiento, PROPILCO S.A. está empeñado en lograr calificar su organización de mantenimiento como de clase mundial, por lo que en forma continua se exploran nuevas filosofías o tecnologías de administración de Mantenimiento que permitan el logro de este objetivo.

En los catorce años de operación de la planta de PROPILCO S.A., el mantenimiento ha evolucionado desde una aplicación manual para la administración del Mantenimiento con énfasis en mantenimiento correctivo, hasta llegar en la actualidad a un módulo PM de SAP con una estructura soportada básicamente en mantenimiento preventivo y predictivo, que hoy se pretende mejorar, y por ello se realiza esta monografía que permita en el futuro cercano una administración del mantenimiento acorde con las nuevas tecnologías.

2.2 RESULTADOS DE MANTENIMIENTO DURANTE EL AÑO 2003

A continuación mostramos el resultado de la gestión de mantenimiento durante el año 2003, periodo en el cual se ejecutaron 6055 ordenes de trabajo y cuya distribución de acuerdo al tipo de mantenimiento se muestra en la Figura 8.

El plan de mantenimiento tuvo un cumplimiento superior al 93% durante el año como se muestra en la Figura 9.

Figura 8. Distribución de Ordenes de Trabajo por Tipo en el año 2003

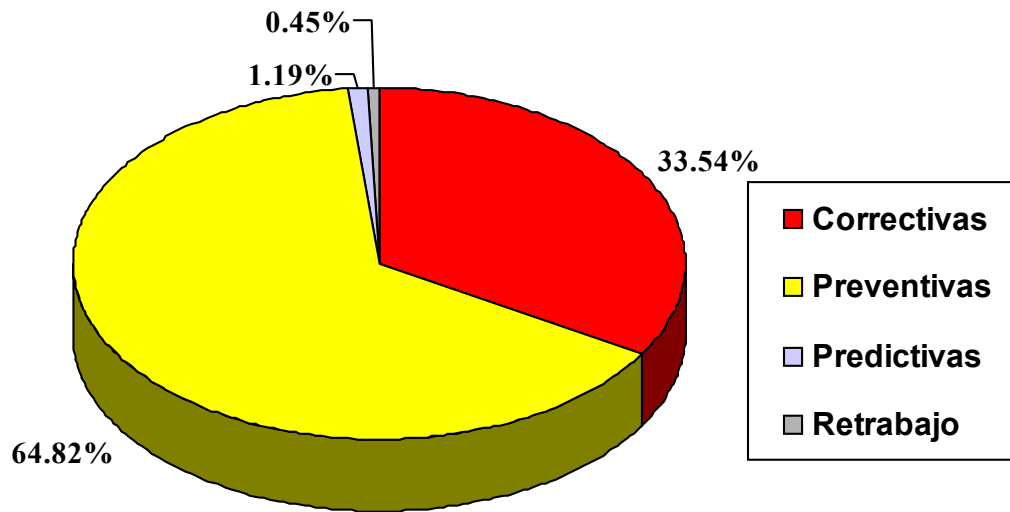
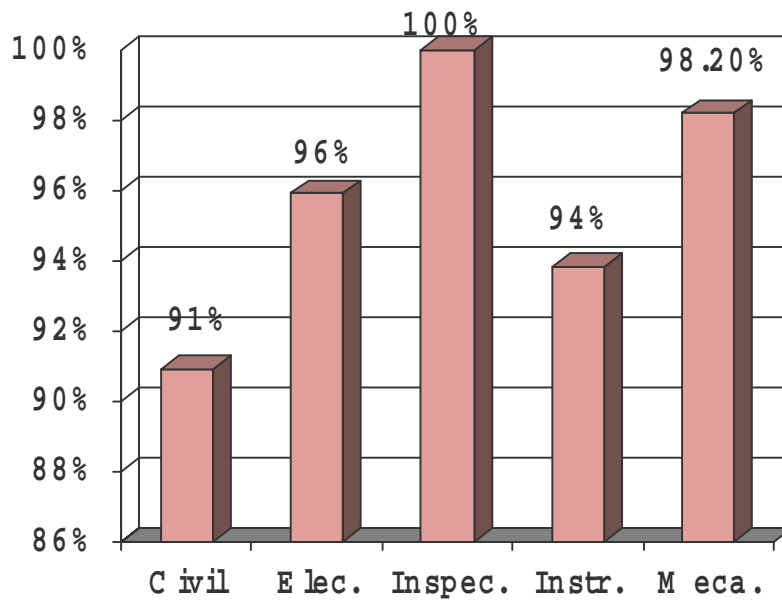


Figura 9. Cumplimiento Plan de Mantenimiento, Año 2003



Del análisis de la ordenes correctivas ejecutadas durante el año 2003, se encontró que un porcentaje alto corresponde al departamento de instrumentación, y que afectaron mucho la producción por ser trabajos correctivos inmediatos. (Ocasionan parada de planta ó equipos, ó afectan la calidad del producto) como se muestra en las Figuras 10 y 11.

Figura 10. Distribución de Ordenes de Trabajo de Instrumentación, Año 2003

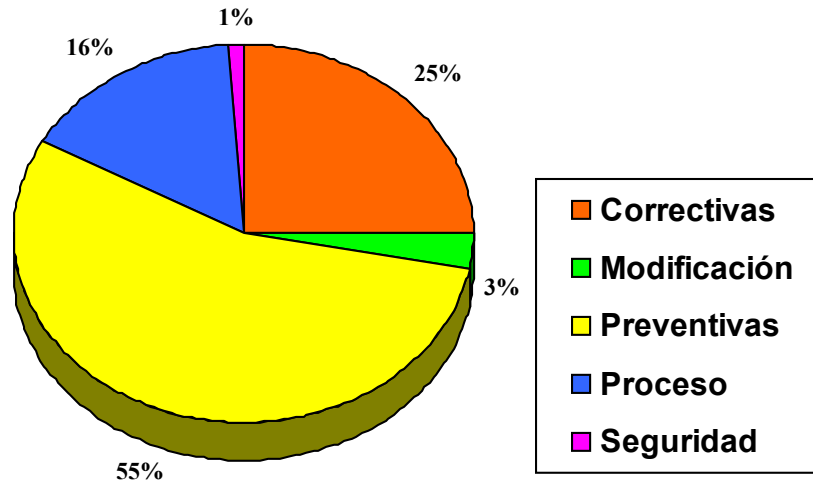
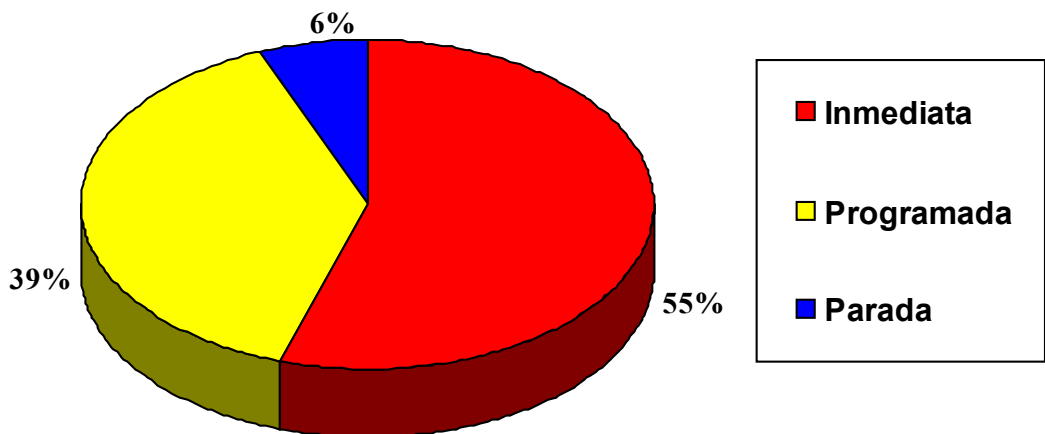


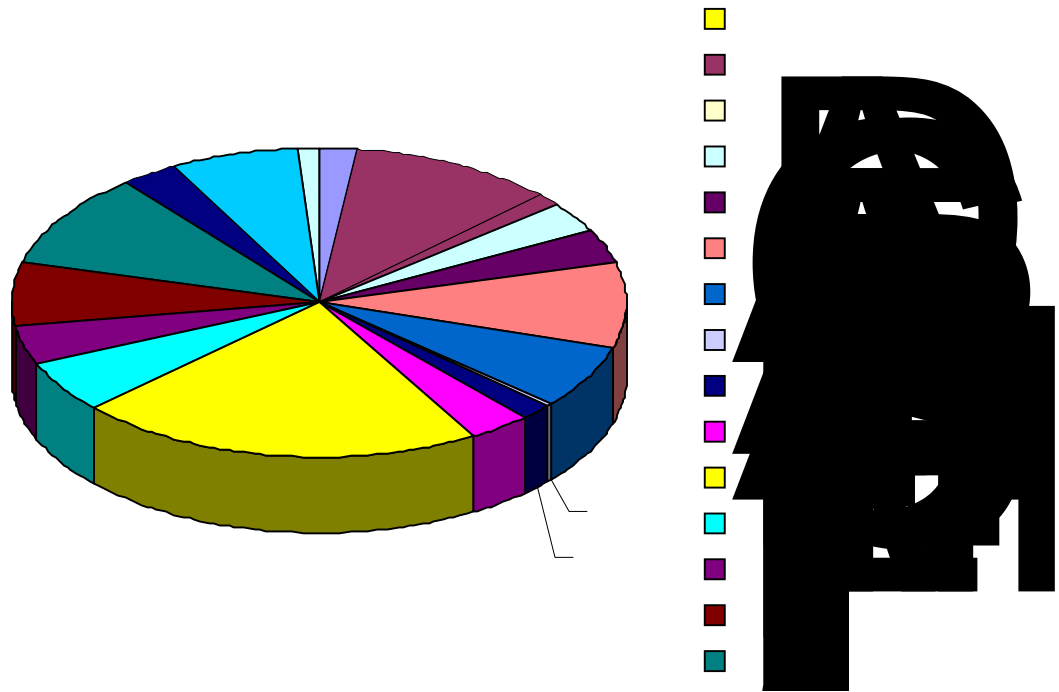
Figura 11. Distribución de Ordenes de Trabajo Correctivas de Instrumentación, Año 2003



Al analizar la incidencia de las órdenes correctivas inmediatas de instrumentación en las diferentes áreas de la planta, se observó un gran impacto en las áreas de

reacción y empaque que fueron identificadas como áreas críticas. El resultado se muestra en la Figura 12.

Figura 12. Ordenes de Trabajo Correctivas de Instrumentación por Áreas, Año 2003



2.3 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Basado en el análisis estadístico anterior, se determina seleccionar para desarrollar el plan piloto de RCM2, el área de reacción debido al gran número de fallas que presenta y al gran impacto que cada una de ellas le representan a PROPILCO S.A. en paros de producción y en la calidad del producto. Adicionalmente, desde el punto de vista de seguridad, esta es el área que requiere mayor cuidado para su operación porque maneja una gran cantidad de Propileno y otras materias primas que son altamente peligrosas, y por tal razón se debe garantizar la confiabilidad de los sistemas asociados a ella.

Es evidente que el programa actual de mantenimiento preventivo y predictivo ha sido satisfactorio, pero no hay identificación clara de las fallas de cada sistema, especialmente en instrumentos y controles, ni tampoco existe la metodología ni los procedimientos para buscar una solución efectiva a cada uno de ellos cuando son detectados.

Igualmente no existe una metodología para hacer análisis de falla tipo FMECA ó FMEA que direcciones al mantenimiento con un pensamiento proactivo ante este tipo de falla.

Basado en todo lo anterior, y conociendo las bondades de la filosofía de RCM2 se recomienda implantarlo inicialmente en el área de reacción de planta 1 para que luego pueda ser replicado en el resto de las áreas de la compañía.

La implantación permitirá identificar las fallas funcionales de los sistemas y detectar sus fallas ocultas para determinar el mantenimiento más adecuado que se deba aplicar que permita eliminar las fallas imprevistas que ocasionan las pérdidas de producción y afectan la calidad del producto.

3. MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD - RCM

3.1 INTRODUCCIÓN AL RCM

3.1.1 Antecedentes. El Mantenimiento ha cambiado ostensiblemente en las últimas dos décadas, posiblemente de una forma más rápida y radical que cualquier otra disciplina de gestión. Estos cambios se deben en gran medida al aumento considerable de activos físicos que las empresas y plantas industriales tienen que mantener. Este aumento ha estado acompañado igualmente de un incremento en la variedad o diversidad de esos mismos activos, diseños más complejos, nuevas técnicas de mantenimiento y una perspectiva de la administración de mantenimiento.

Por otro lado, el Mantenimiento se está enfocando en las fallas de equipos que afectan la seguridad, el medio ambiente, calidad de producto, y todo esto acompañado de una alta presión de mayor disponibilidad de planta al mínimo costo.

Todo lo anterior ha obligado al personal de Mantenimiento a cambiar su manera de pensar, adoptando posiciones nuevas, tanto como de ingenieros como de gerentes, soportando su gestión en Sistemas Computarizados de Administración de Mantenimiento (CMMS), que sean más eficientes e integrados a todo el proceso productivo de las empresas. Con el paso del tiempo los retos de Mantenimiento son cada día más crecientes.

El Mantenimiento hoy en día es mirado con un nuevo enfoque gerencial, que tiene en cuenta todos estos grandes cambios de los últimos años. Aquí es donde entra a la escena la nueva filosofía de Mantenimiento denominada Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM por su sigla en inglés), que si se aplica correctamente cambia la manera en que se relacionan los operadores de planta con los activos físicos a su cargo.

Mirando en retrospectiva la evolución del Mantenimiento, desde los años 30's hasta nuestros días, se pueden definir tres generaciones que han impactado considerablemente las estrategias de mantenimiento en cada uno de los períodos. A continuación se describen brevemente cada una de las generaciones mencionadas.

- **PRIMERA GENERACIÓN:** Este período se extiende hasta finales de los años 40's, finales de la Segunda Guerra Mundial, y se caracterizó por un mantenimiento que no iba más allá de una simple rutina de limpieza, servicio y

lubricación. Esto significaba que las fallas en los equipos y sistemas no eran prioritarias para ninguno de los gerentes, ya que para esa época la industria no estaba muy mecanizada y los equipos que existían eran simples, y sobre-diseñados.

- SEGUNDA GENERACIÓN: Para los años 50's se había aumentado la cantidad y complejidad de los equipos y sistemas utilizados en la industria, haciéndolos más imprescindibles en el proceso productivo. Debido a esta dependencia se empezó a enfocar en el tiempo de parada de los equipos, lo que conllevó a que las fallas de los mismos debían ser prevenidas, creándose el concepto de Mantenimiento Preventivo. En la década de los 60's, este concepto era aplicado principalmente en reparaciones mayores a intervalos regulares preestablecidos. Todo lo anterior comenzó a impactar el costo de mantenimiento, con relación a otros costos operacionales, lo que obligó al crecimiento de sistemas de Planeación y Control del Mantenimiento, que ayudaron a mantener bajo control el mantenimiento de los equipos. Debido a todo lo anterior, los gerentes de las empresas comenzaron a buscar la manera de maximizar la vida útil de los activos de sus empresas.
- TERCERA GENERACIÓN: A partir de la década de los 70's el proceso de cambio en la industria ha adquirido aún más impulso, y generado algunos cambios que han sido clasificados en: nuevas expectativas, nuevas investigaciones y nuevas técnicas. En la década de los 60's y principio de los 70's la capacidad de producción era afectada por la parada de máquina, lo que hacía aumentar los costos operaciones e interfería con el servicio al cliente, principalmente en las áreas de minería, manufactura y transporte. Los sistemas como justo a tiempo agravaron esta situación, ya que los inventarios eran reducidos, y una pequeña falla de un equipo podía hacer parar toda la planta.

Actualmente el crecimiento en la mecanización y automatización han tornado a la *confiabilidad* y a la *disponibilidad* en factores claves, aun en industrias poco tradicionales, como las relacionadas con la salud, el procesamiento de datos, y las comunicaciones.

3.1.2 Definiciones. La confiabilidad es frecuentemente mal entendida. Para la filosofía de RCM el mantenimiento está estrechamente ligado al concepto de tres parámetros básicos: Disponibilidad, Confiabilidad y Mantenibilidad.

- Disponibilidad. Este concepto puede ser definido como: *“La probabilidad de que un equipo se encuentre en condiciones de cumplir su función en cualquier instante.”* La disponibilidad relaciona los tiempos de reparación de las fallas, con los tiempos entre esas mismas fallas, en otras palabras, relaciona la Mantenibilidad con la Confiabilidad.

- **Mantenibilidad.** Este otro concepto se define como: *“La probabilidad de que un equipo sea devuelto a un estado en que pueda cumplir su función en un tiempo dado, después de la aparición de una falla, utilizando procedimientos de mantenimiento preestablecidos.”* La Mantenibilidad se relaciona con el diseño del equipo, su complejidad, el personal que lo mantiene, las herramientas y procedimiento de Mantenimiento disponibles. El parámetro básico para calcular la Manenibilidad es el tiempo medio de reparación de las fallas (conocido como MTTR por su sigla en inglés).
- **Confiabilidad.** La confiabilidad es muy específica – es el proceso de administrar el intervalo entre fallas. Se define como: *“La probabilidad de que un elemento opere sin fallar por un determinado período de tiempo, bajo unas condiciones de operación determinadas”.* Se relaciona con la tasa de fallas y con el tiempo medio entre fallas (conocido como MTBF por su sigla en inglés).

Haciendo énfasis en la Confiabilidad Operacional, ésta se define como: *“La capacidad de una instalación para cumplir su función, o el propósito que se espera de ella, dentro de sus límites de diseño, y bajo un contexto operacional específico”.*

Si la Disponibilidad es la medida del tiempo de operación del equipo, o contrariamente la Indisponibilidad la duración del tiempo parado, la Confiabilidad puede pensarse como la medida de la frecuencia del tiempo detenido o parado.

Para ilustrar estas definiciones, se toma el siguiente ejemplo:

Caso 1: Una máquina de molde por inyección se para 24 horas para un trabajo de reparación en la mitad de lo que se supone sería una corrida de 5 días. Su Disponibilidad es 80% ((120 horas-24 horas)/120 horas). La Confiabilidad es 96 horas ((120 horas-24horas)/1 falla).

Caso 2: La máquina se para 24 veces por una hora cada vez. La disponibilidad sigue siendo 80% ((120 horas-24 horas)/120 horas), pero su Confiabilidad se redujo a 4 horas (96/24 fallas).

Los tres factores descritos anteriormente están estrechamente relacionados, como se muestran en la siguiente ecuación:

$$\text{DISPONIBILIDAD} = \frac{\text{CONFIABILIDAD}}{(\text{CONFIABILIDAD} + \text{MANTENIBILIDAD})}$$

Una de las mejores aproximaciones para el manejo de la confiabilidad es adoptando RCM.

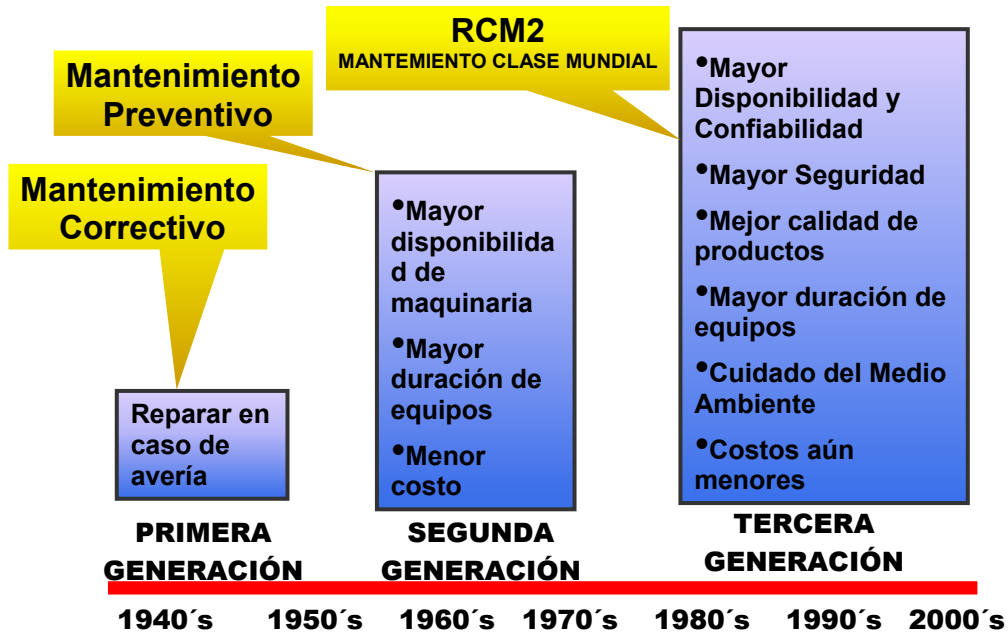
- RCM. Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, conocido como RCM por su sigla en inglés, es una filosofía de mantenimiento, desarrollada para la industria de la aviación a principios de los años 70's. Es un proceso utilizado para determinar los requerimientos de mantenimiento de cualquier activo en su contexto operacional. Una definición formal clara de RCM, es la que ofrece John Moubray en su libro RELIABILITY-CENTERED MAINTENANCE, como "un proceso utilizado para determinar qué debe hacerse para asegurar que todo activo físico continúe haciendo lo que sus usuarios quieren que haga en su actual contexto operacional".
- RCM2, Es básicamente una metodología derivada de RCM, aplicada a la industria, y desarrollada en la década de los 90's por John Moubray.

3.2 RCM2 - UN NUEVO PARADIGMA DE LA ADMINISTRACIÓN DEL MANTENIMIENTO

3.2.1 Evolución de Expectativas y Técnicas de Mantenimiento. Los estándares de calidad hoy en día son difíciles de mantener, debido a la automatización de los sistemas, aplicándose tanto para parámetros de servicio como a la calidad del producto. Cada vez aparecen más fallas que producen serias consecuencias tanto para el medio ambiente como la Seguridad Industrial, adicionales a las elevadas exigencias sobre todos estos temas. Todo esto ha hecho que las organizaciones enfoquen cada vez más todos sus esfuerzos a exigencias que van más allá del costo de operación.

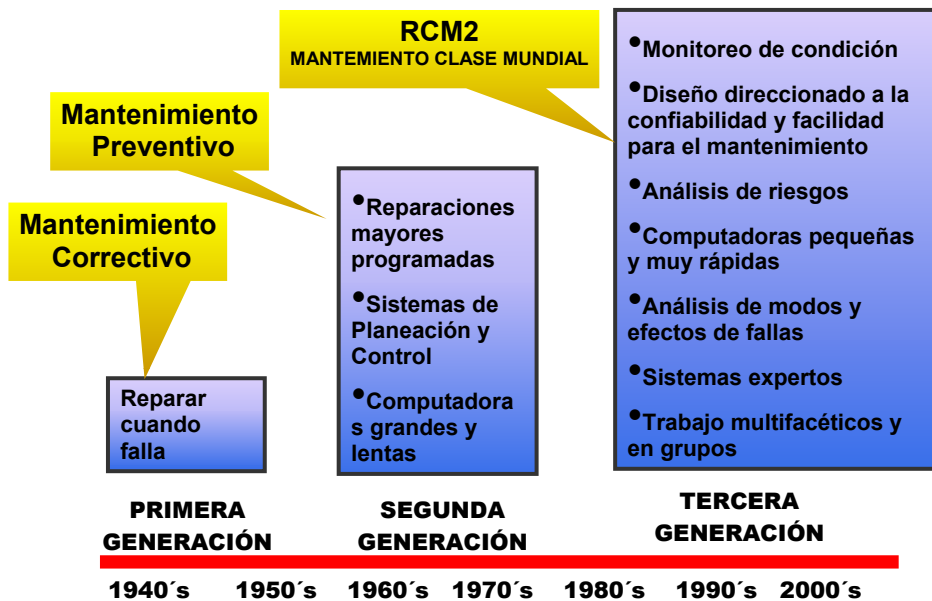
El tema del costo de mantenimiento no deja de ser una preocupación para los gerentes de empresas, ya que ha tenido una tendencia de crecimiento con el tiempo, tanto en términos absolutos y como en proporción al gasto total, llegando a ser en algunas empresas el segundo o primer rubro más alto. Con el paso del tiempo las expectativas de mantenimiento han sido crecientes, tal como se muestra en la Figura 13.

Figura 13 – Expectativas Crecientes del Mantenimiento



Así como han crecido las expectativas de Mantenimiento, igualmente se han llevado a cabo nuevas investigaciones, y han aparecido nuevas técnicas y desafíos. La Figura 14 muestra cómo han ido evolucionando las técnicas de mantenimiento con el paso del tiempo.

Figura 14 – Evolución de las Técnicas de Mantenimiento



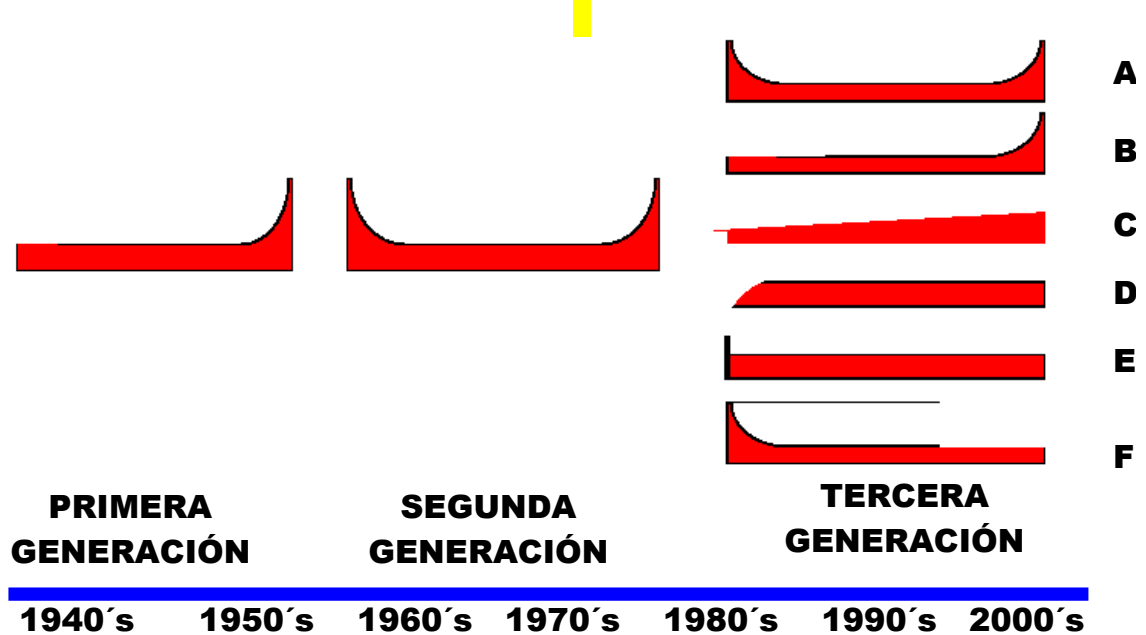
3.2.2 Patrones de Falla. Las investigaciones que se han desarrollado alrededor del tema de Mantenimiento han cambiado muchos paradigmas y creencias arraigadas que por mucho tiempo imperaron sobre la edad de los equipos y las fallas que experimentan, y cada vez se pone más en entredicho la noción que existía sobre la conexión entre la edad de los activos y su probabilidad de falla.

En principio, durante la Primera Generación, se consideraba que a medida que los activos envejecían eran más propensos a fallar. Posteriormente, durante la denominada Segunda Generación, comenzó a introducirse el concepto de “mortalidad infantil” y “curva de la bañera”, en los que se creaba conciencia de que los equipos también fallaban cuando estaban nuevos o recién se ponían en operación. Con la llegada de la Tercera Generación, se identifican hasta seis patrones de falla diferentes, dependiendo del tipo de activo analizado. La Figura 15 muestra la evolución de los patrones de falla de equipos, los cuales se clasifican de la siguiente forma:

- El patrón **A** es la conocida “curva de la bañera”, que comienza con una gran incidencia de falla (mortalidad infantil), seguido de una constante o ligero incremento de la probabilidad de falla y por último una zona de desgaste.
- El patrón **B** muestra la probabilidad de falla constante que determinan en una zona de desgaste.
- El patrón **C** muestra una probabilidad de falla que crece lentamente, pero no tiene una edad de desgaste claramente identificada.
- El patrón **D** muestra una baja probabilidad de falla cuando el equipo es nuevo y luego un incremento veloz hasta un nivel constante.
- El patrón **E** muestra una probabilidad de falla constante a todas las edades.
- El patrón **F** comienza con una alta mortalidad infantil que finalmente cae a una probabilidad de falla constante.

Estas investigaciones hicieron desarrollar nuevas técnicas, conceptos y herramientas de soporte para la toma de decisiones, tales como Estudio de Riesgo, Análisis de Causa Raíz, Análisis de Modos y Efectos de Falla, Sistemas Expertos, Monitoreo por Condición, Diseño de equipos con énfasis en la confiabilidad y facilidad para el mantenimiento.

Figura 15. Patrones de Falla de Equipos



Todos estos desarrollos trajeron consigo unos nuevos desafíos para los gerentes y el personal de Mantenimiento, ya que ante el universo de información y herramientas que cada día se ofrecen se requiere tener buen criterio para seleccionar lo que realmente se necesita en cada caso, situación y momento en particular.

Precisamente parte de lo que ofrece el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad – RCM es un sistema que permite poder responder de manera fácil y rápida a los nuevos desafíos planteados.

Por mucho tiempo, el diseño de equipo y ciclo de producción crearon un ambiente en que el mantenimiento de los equipos era menos importante que la operación hasta la falla. Hoy, sin embargo, el monitoreo de condición y el seguimiento de RCM han cambiado las reglas de juego.

Anteriormente la función de mantenimiento no era contemplada por los diseñadores de equipo, probablemente debido a lo poco complicado y naturaleza robusta de las maquinarias. Pero en la medida en que se avanzó hacia la obsolescencia se ha visto una progresión desde el mantenimiento preventivo y mantenimiento planeado, al monitoreo de condición, computarización y administración del ciclo de vida. Hoy, las características de los equipos están exigiendo prácticas de mantenimiento con tácticas predominantes de cambio de la operación hasta la falla hacia la prevención y ahora a la predicción. Se ha recorrido un largo camino.

3.2.3 Enfoque del Mantenimiento Tradicional vs. RCM

Todas las disciplinas de la Administración están siendo sometidas a cambios en el diseño de las organizaciones, en tecnología, en habilidades de liderazgo y en comunicación.

Quizá donde más se sienten estos cambios es en el campo de la administración de activos físicos. Un aspecto relevante de este fenómeno es el número de cambios que están ocurriendo simultáneamente. Algunos de estos cambios han ocurrido a nivel estratégico, mientras que otros han sido más de naturaleza técnica. Estos cambios no solo han implicado cambios radicales de dirección (en algunos casos en dirección diametralmente opuesta al pasado), sin que algunos de ellos han introducido conceptos completamente nuevos.

La Tabla 2 muestra catorce reglas de conducta general en las que se ven reflejados estos cambios. Estas reglas de conducta se han constituido en un nuevo paradigma de la administración del Mantenimiento, el paradigma de RCM.

Tabla 2. Reglas de conducta general del Mantenimiento Tradicional vs. RCM

ENFOQUE TRADICIONAL	ENFOQUE DE RCM 2
Repáralo	Mejóralo
Emergencias	Predicción, Planeación, Programación
Manejo de Defectos	Eliminación de Defectos
Reducción de Costo de Mantenimiento	Incremento de Disponibilidad
Programas Puntuales	Mejoramiento Continuo
Creer que las Fallas son Inevitables	Creer que las Fallas son excepcionales
Dar prioridad a las Paradas	Dar prioridad a la Eliminación de Fallas
Muchas Fallas	Pocas Fallas
Bajo nivel de Trabajos Planeados	Alto nivel de Trabajos Planeados
Alto nivel de Re-Trabajos	Bajo nivel de Re-Trabajos
Baja Confiabilidad	Alta Confiabilidad
Altos Costos de Mantenimiento	Bajos Costos de Mantenimiento
Planes a Corto Plazo	Planes a largo plazo
No ser Rentable	Atraer nuevas inversiones

3.3 LAS 7 PREGUNTAS DE RCM

El proceso de RCM plantea siete preguntas acerca del activo o sistema que se intenta analizar:

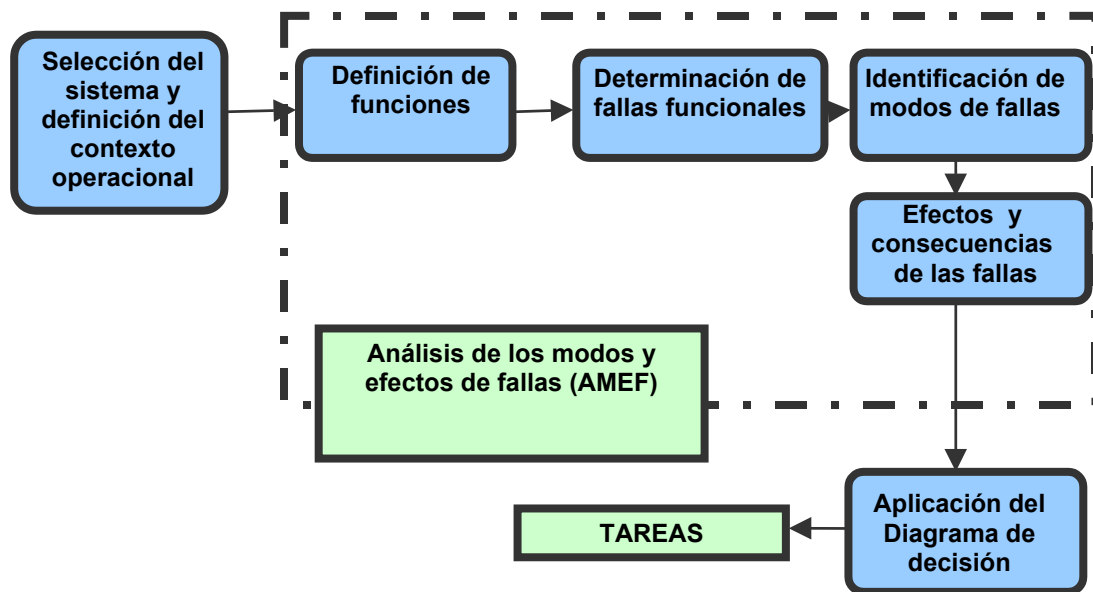
- **¿Cuales son las funciones y parámetros de funcionamiento asociados al equipo en su actual contexto operacional?**
- **¿Cuál es la causa de cada falla funcional?**
- **¿En que manera falla en satisfacer sus funciones?**
- **¿Qué pasa cuando cada falla ocurre?**
- **¿De que manera cada falla importa?**
- **¿Qué puede hacerse para prevenir o predecir cada falla?**
- **¿Qué debe hacerse si una adecuación tarea preactiva no se encuentra?**

En la siguiente sección se desarrolla en detalle cada una de estas preguntas.

3.4 METODOLOGÍA DE IMPLANTACIÓN DE RCM2

El proceso de implantación de RCM2 en la industria sigue unos pasos como el que se muestra en la Figura 16, y que se describirán a continuación.

Figura 16. Diagrama de Implantación de RCM2



3.4.1 Selección del Sistema y definición del Contexto Operacional

El contexto operacional afecta a todo el proceso de formulación de estrategias de mantenimiento, comenzando por la definición de funciones. Igualmente, influencia profundamente los requerimientos para las funciones secundarias.

Por ejemplo, en cada carrera de fórmula 1 las pistas donde se desarrollan las carreras cambian de una a otra creando contextos operacionales diferentes en cada una de las carreras, tales como el clima, estado de la pista, trayectoria del circuito, etc.

El contexto operacional no solo influye en gran modo las funciones y las expectativas de funcionamiento, si no que también afecta la naturaleza de los patrones de falla que pueden ocurrir, sus efectos y consecuencias, la periodicidad con los que pueden ocurrir, y qué debe hacerse para manejarlos.

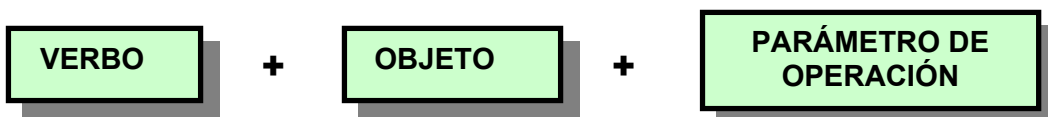
Todo esto significa que cualquiera que piense aplicar RCM a cualquier proceso o activo debe asegurarse de tener un claro entendimiento del contexto operacional antes de comenzar. Algunos de los factores importantes que deben ser considerados son:

- Si el activo es parte del proceso continuo o por lotes.
- La presencia de equipos redundantes o modos de producción alternos.
- Los parámetros de calidad que se consideren del producto terminado.
- El contexto operacional y los estándares ambientales.
- Riesgos para la seguridad.
- Turnos de trabajo.
- Volúmenes de almacenamiento de producto terminado y capacidad de producción.
- Políticas de repuestos de almacén.
- Tendencias y fluctuaciones estacionales en la demanda del mercado, y/o el ingreso de materias primas.

3.4.2 Definición de Funciones

- Funcionamiento. Los usuarios esperan que el activo cumpla con sus funciones y que lo hagan con un nivel de funcionamiento aceptable. Por lo tanto la definición de función no estaría completa a menos que se especifique el nivel de funcionamiento deseado por el usuario tan preciso como sea posible.

Normalmente una función debe definirse de la siguiente manera:



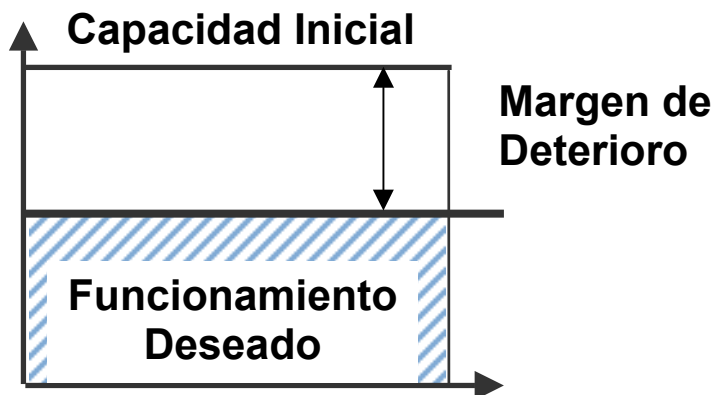
Ejemplo: Entregar 200 GPM de agua en una hora.

- **Parámetros de funcionamiento.** Un parámetro mínimo de funcionamiento es asegurarse de que los activos continúen haciendo lo que sus usuarios quieren que hagan.

Todo sistema esta expuesto al deterioro por lo tanto se deben tomar acciones que frenen este proceso. Por lo tanto, cualquier activo fijo que se ponga en funcionamiento debe ser capaz de rendir mucho mas que el parámetro mínimo deseado por el usuario, esto con el fin de tener un margen de deterioro que permita operarlo un buen tiempo ante de sacarlo por deterioro.

Lo que el activo es capaz de rendir es conocido como **CAPACIDAD INICIAL O CONFIABILIDAD INHERENTE**. La figura 17 muestra la relación correcta entre esta capacidad y el funcionamiento deseado.

Figura 17. Deterioro inevitable de los activos.



Por ejemplo, si el usuario desea transportar propileno a 10GPM con una bomba, ésta se debe especificar para una capacidad mayor a 10GPM para dejar un margen de deterioro.

Lo anterior significa que el funcionamiento puede ser definido de dos maneras:

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

Como una regla general, **el mantenimiento debe tratar de restituirle al activo su capacidad inicial**, y mediante adecuado programas de mantenimiento se puede mantener operando por encima del nivel de

funcionamiento deseado por el usuario. En la Figura 18 se puede ver un resumen de lo anterior.

Figura 18. Capacidad de funcionamiento de los activos.



- Parámetro de funcionamiento múltiple. Son las diferentes expectativas de funcionamiento del usuario que se deben cumplir simultáneamente. Por ejemplo calentar 100 Kg. de un producto A de 100°C a 200°C en una hora.
- Parámetro de funcionamiento cuantitativo. Son parámetros que se pueden medir siendo muchos más precisos de evaluar que los cualitativos.
- Parámetro cuantitativo. A veces al no ser posible definir parámetros cuantitativos utilizamos los cualitativos. Por ejemplo cuando se pinta algo de funcionamiento principal es verse "aceptable". Este calificativo es difícil de cuantificar pero entre el usuario y quien pinta deben llegar a un acuerdo de lo que significa el término "aceptable".
- Parámetro de funcionamiento absoluto. Es una descripción que no indica ningún parámetro de funcionamiento por lo general implica que se trata de un parámetro absoluto.

Por ejemplo: contener un líquido – la ausencia de parámetro de funcionamiento sugiere que el sistema debe contener a fondo el líquido y que cualquier pérdida se considera una falla.

- Parámetro de funcionamiento variable. Es cuando las expectativas de funcionamiento varían indefinidamente entre dos extremos. Por ejemplo, un bus de transporte con capacidad máxima de 40 pasajeros puede viajar con un nivel de ocupación que va desde cero hasta los 40 pasajeros.
- Límites superior e inferior. Debido a que algunos sistemas no pueden funcionar exactamente igual al estándar establecido cada vez que opera, se definen unos límites de funcionamiento que se conocen como límite de especificación superior e inferior. Los límites de capacidad de proceso son conocidos como límites de control superior e inferior.

3.4.3 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 esta función, entonces todas ellas deben ser identificadas junto con los parámetros de funcionamiento deseado.

Las funciones se definen en dos categorías principales: primarias y secundarias.

- Funciones primarias. La razón o las razones por la cual las empresas adquieren los activos se conocen como funciones primarias y son muy fáciles de reconocer.

El desafío real está en definir las expectativas de funcionamiento relacionado con su función primaria.

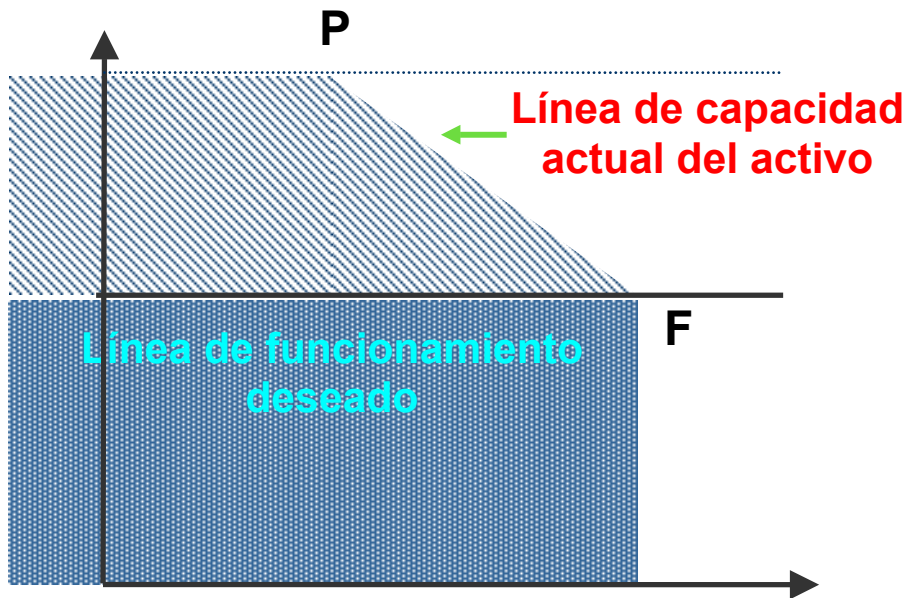
- Funciones secundarias. Son las funciones adicionales a la primaria que el usuario espera que un activo fijo cumpla. Estas funciones se dividen en siete categorías:
 - Ecológicas – integridad ambiental.
 - Seguridad.
 - Control/Confort/Contención.
 - Apariencia.
 - Protección
 - Eficiencia/Economía/Integridad estructural.
 - Funciones superfluas.

Aun las funciones secundarias son menos obvias que las primarias, la pérdida de una de ellas puede tener serias consecuencias, a veces más serias que la pérdida de una función primarias. Por lo anterior, esta debe ser identificada claramente.

3.5 DETERMINACIÓN DE FALLAS FUNCIONALES

Cuando un activo no hace lo que el usuario desea que haga se considera que ha fallado. Además como cada activo tiene más de una función y es posible que una de ellas falle, se concluye que el activo puede tener una variedad de estado de falla diferente. La Figura 19 muestra gráficamente el concepto de falla funcional.

Figura 19. Fallas Funcionales



El proceso de RCM utiliza el término de “falla funcional” para describir los estados de falla ya que ocurren cuando el activo no puede cumplir una función de acuerdo al parámetro de funcionamiento que el usuario considera aceptable.

3.5.1 Falla total y parcial. Una falla es total cuando el activo pierde totalmente la función por lo cual fue adquirid. También abarca situaciones en que el activo no alcanza a trabajar dentro de los límites admisibles de operación.

Una falla parcial proviene de una pérdida parcial de una función y casi siempre proviene de unos modos de falla diferentes a los que provoca una pérdida total. Por esta razón debe registrarse todas las fallas funcionales asociadas a cada función.

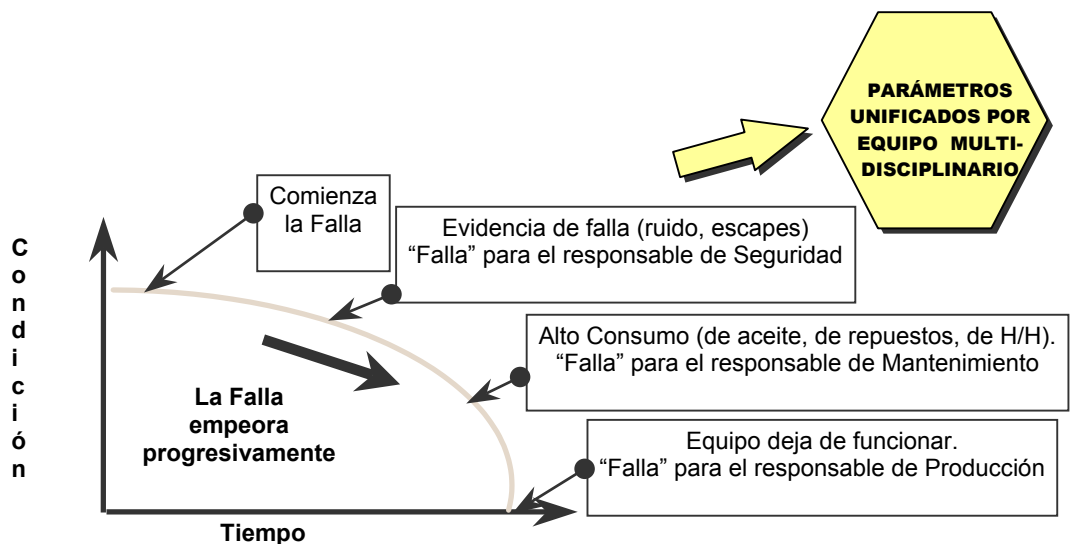
3.5.2 Límites superiores e inferiores. Algunos activos funcionan con parámetros de funcionamiento asociados a límite superior e inferior, y se considera que un activo ha fallado si produce productos que están por arriba del límite superior o por debajo del inferior

En la práctica de los estados de falla asociados a los límites superior e inferior pueden manifestarse de dos maneras a saber:

- El rango de capacidad podría ir más allá de los límites de especificación en una sola dirección.
- Otra posibilidad es que la capacidad vaya más allá de los rangos superiores e inferiores.

3.5.3 Establecimiento de Parámetros. No siempre hay unidad de criterio entre las diferentes personas que tienen que ver con una falla. De hecho, no siempre existe el mismo entendimiento sobre el concepto de falla. Esta diferencia de criterio puede tener consecuencias indeseables en la efectividad de los programas de mantenimiento de una empresa. La Figura 20 muestra gráficamente un ejemplo de lo que podría ser una situación de falta de uniformidad en la definición de parámetros de funcionamiento de un activo, para un representante de Producción, uno de Seguridad y uno de Mantenimiento.

Figura 20. Unificación de parámetros de funcionamiento



Todos los esfuerzos deben orientarse hacia la determinación de parámetros unificados de funcionamiento de los activos por equipos multidisciplinarios de las empresas.

3.6 IDENTIFICACIÓN DE MODOS DE FALLA

Al definir las funciones y los parámetros de funcionamiento deseados de cualquier activo, definimos los objetivos de mantenimiento en respecto al equipo.

La definición de fallas funcionales nos permite determinar exactamente que queremos decir con “falla”. Estos temas son considerados por las primeras dos preguntas del proceso de RCM.

Las próximas dos preguntas buscan identificar los modos de falla que probablemente causen cada falla asociados con cada modo de falla. Esto se realiza a través de un análisis de modos de fallas y sus efectos para cada falla funcional.

Qué es un modo de falla? Cualquier evento que pueda causar la falla de un equipo poder ser definido como “falla”. Se debe distinguir entre una “falla funcional” (Estado de falla) y un “modo falla” (Un evento que puede causar un modo de falla).

Por qué analizar Modos de Falla? Una máquina puede fallar por diversos motivos, al igual que un grupo de ellas puede fallar por cientos de razones más y una planta entera puede ascender a miles de fallas.

Debido a lo anterior, muchos gerentes abandonan la idea de identificación de fallas ante la idea del tiempo y el esfuerzo involucrado en esta labor. Al hacer esto pasan por alto que el mantenimiento día a día es manejado a nivel de modos de falla, por ejemplo:

- Las órdenes de trabajo se generan para cubrir unos modos de falla específicos.
- La planeación diaria del mantenimiento trata de tomar acciones para abordar estos modos de falla.
- En las reuniones Producción- Mantenimiento discuten sobre lo que ha fallado, que las causa, quien es el responsable, como se esta reparando y que debemos hacer para que no vuelva a suceder.

- Los sistemas de registros técnicos de los equipos llevan las fallas individuales o al menos que se hizo durante la reparación.

En la mayoría de estos casos, los modos de falla son discutidos, registrados y manejados luego de haber ocurrido. Esto es mantenimiento **reactivo**.

El mantenimiento proactivo maneja los eventos **antes** que ocurran. Estos eventos son los modos de fallas, y si queremos aplicar verdaderamente mantenimiento proactivo o cualquier activo, debemos identificar todos los modos de falla que pudiesen afectarlo. Lo ideal sería identificarlos antes de que ocurriesen, y si esto es posible, al menos antes de que vuelvan a ocurrir.

Una vez que los modos de falla de un sistema son identificados, entonces podemos considerar que ocurre cuando sucede la falla, evaluar las consecuencias y definir que se debe hacer para anticipar o prever dicha falla.

En la figura 21 se ilustra un ejemplo de análisis de modos de falla de un sistema de bombeo de agua.

Figura 21. Modos de falla de una bomba.

FUNCIÓN		FALLA FUNCIONAL		MODO DE FALLA	
1	Bombear Agua del tanque T-100 al T-200 a 100 GPM	A	No transfiere agua	1	Rodamientos trabados.
				2	<u><i>Impulsor suelto.</i></u>
				3	<u><i>Impulsor trabado por un objeto</i></u>
				4	Acople motor-bomba partido.
				5	Motor quemado
				6	Válvula succión o descarga cerrada.
		B	Bombeea menos de 100 GPM	1	<u><i>Impulsor des gastado.</i></u>
				2	Líneas parcialmente taponadas.

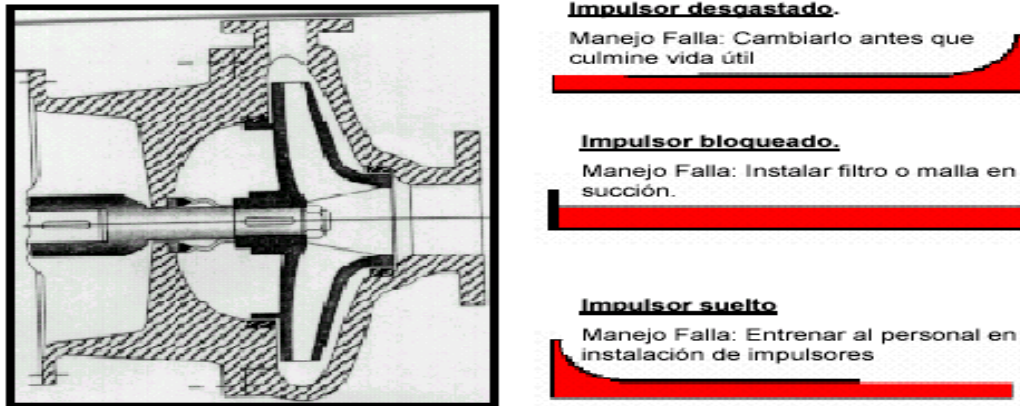
En el ejemplo anterior vemos tres modos de falla relacionados con el impulsor los cuales se pueden analizar a continuación:

Impulsor desgastado: Esta falla esta relacionada con la edad del impulsor por lo tanto su patrón de falla es de **B** tal y como se muestra en la figura 22.

Impulsor trabado por un objeto: En este caso la falla ocurre en cualquier momento de manera aleatoria sin guardar una relación con el tiempo que ha estado el impulsor en funcionamiento. El patrón de falla en este caso es el **E**, tal como lo muestra la figura 22.

Impulsor suelto: Si el mecanismo de ajuste al impulsar esta bien diseñado y aún así sigue quedando suelto, posiblemente fue porque no lo instalaron bien. Esto hace que la falla tenga lugar al poco tiempo de estar funcionando, como se muestra en la figura 22 (Patrón de falla F).

Figura 22. Fallas del impulsor de una bomba centrífuga.



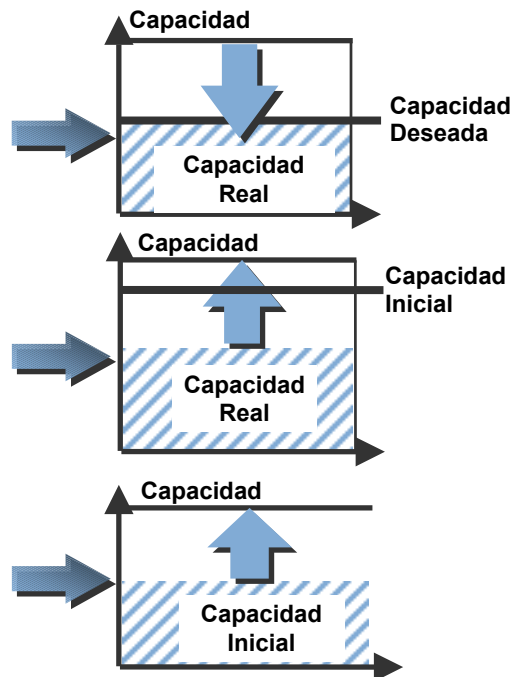
Los modos de falla pueden ser clasificados como se muestra en la Figura 23.

Figura 23. Clasificación de Modos de Falla.

☐ La capacidad del activo cae a niveles inferiores del desempeño deseado luego de puesto en servicio (proceso normal de deterioro).

☐ Las exigencias (operacionales) superan la capacidad esperada del activo luego de puesto en servicio (forma inesperada).

☐ El activo no es capaz de realizar la función deseada desde el inicio de las funciones (equipo inapropiado).



En la primera categoría de modos de falla, denominada como Capacidad Decreciente, las causas normalmente están asociadas con: Deterioro, fallas de lubricación, suciedad, desarme y errores humanos.

Las principales causas para los modos de falla de la segunda categoría, denominada como de Aumento del Funcionamiento Deseado, son: Sobrecarga sostenida deliberadamente, sobrecarga sostenida sin intención y sobrecarga repentina sin intención.

En la tercera categoría de modos de falla, denominada como de Capacidad Inicial, las causas se asocian con: deficiencias de diseño, fabricación y materiales.

3.7 EFECTOS Y CONSECUENCIAS DE LAS FALLAS

Consiste en una lista de los eventos que suceden al producirse cada modo de falla. La lista debe incluir toda la información necesaria para ayudar en la evaluación o análisis de la falla, tales como:

- Que síntoma hay que identifique que la falla ocurrió.
- De que modo represente una amenaza para la seguridad y el medio ambiente.
- De que manera afecta a la producción o a las operaciones.
- Que daños físicos han sido causados por las fallas.
- Que debe hacerse para reparar la falla.

A continuación se tratarán algunos de estos elementos de información. El fin último de este análisis es establecer si se hace necesario el mantenimiento proactivo.

3.7.1 Evidencia de falla. Para poder determinar si la falla es evidente o no a las operaciones de los activos, debe descubrirse los efectos de la falla muy detenidamente. Igualmente se debe indicar si la falla va precedida de una alarma luminosa y/o sonora, y donde se registra dicha alarma, si en el campo a en el cuarto de control.

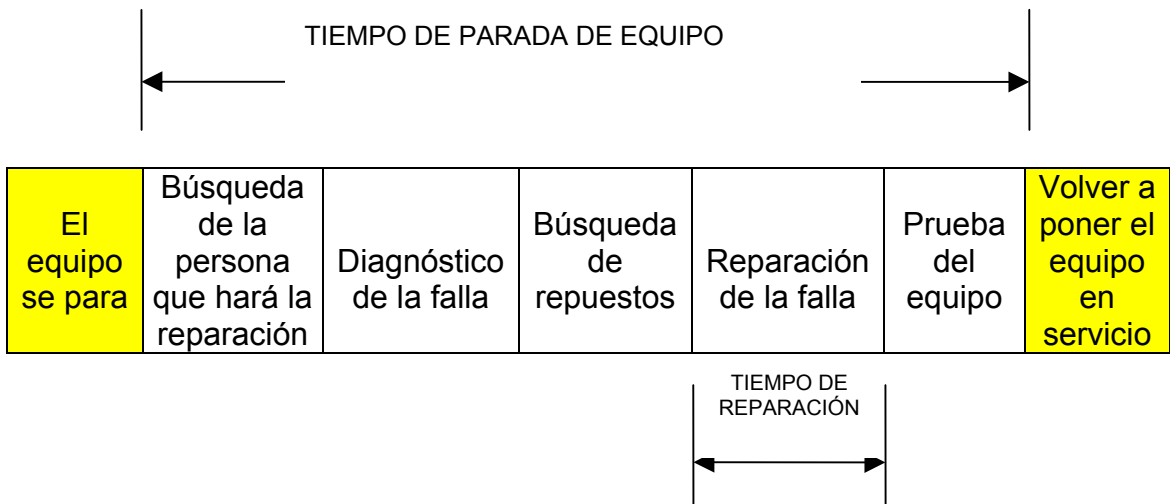
También se debe registrar si la falla genera síntomas que el operador puede reconocer como ruido, vibración, temperatura, fuga, olores extraños, etc. Al tratarse de equipo de protección, se debe indicar la consecuencia de tener dicha protección fuera de servicio.

3.7.2 Riesgo para la seguridad y el medio ambiente. A pesar de que los diseños de planta industriales han llegado al nivel de tener una baja probabilidad de afectar la seguridad o el medio ambiente, es importante redactar el efecto de la falla de tal forma que diga claramente si existe la posibilidad de que una persona muera como consecuencia de la falla, o que se viole una norma ambiental.

3.7.3 Daños secundarios y su efecto sobre la producción. Es importante determinar las consecuencias operacionales y no operacionales de los efectos de la falla. Se debe establecer cómo y en cuánto se afecta la producción, si aplica, lo cual está asociado al tiempo de parada de máquina generado por la falla.

El tiempo de parada de la máquina comienza desde el momento en que se produce la falla hasta el momento que entre nuevamente en operación. Tal y como se ve en la Figura 24, esto es generalmente mucho mas que el tiempo neto de reparación.

Figura 24. Tiempo de parada de máquina y tiempo de reparación



3.7.4 Acción correctiva. Dentro de las consecuencias de la falla se debe describir las acciones a seguir para reparar la falla.

3.7.5 Información sobre Modos y Efectos de Falla. Se debe hacer mucho énfasis tanto a lo que podría ocurrir como a lo ocurrido. Esto nos recuerda la necesidad de ser proactivo.

Las fuentes más comunes de información se describen a continuación:

- El fabricante o proveedor de equipo. La primera fuente de información para hacer un análisis de modos y efectos de falla es el fabricante, especialmente si es un equipo nuevo y único en la planta. Sin embargo, lo que los fabricantes pueden aportar, tiene un valor muy limitado porque el fabricante generalmente no está metido en la operación de sus equipos en plantas industriales, por lo que rara vez tiene acceso a información acerca de las fallas y sus causas, y adicionalmente tiene poca información acerca del contexto operacional del equipo y sus valores o parámetros de operación deseadas.

Como consecuencia de lo anterior, los análisis de efectos y modos de falla realizados por los fabricantes de equipo son genéricos y especulativos, lo que limita el uso de los valores.

- Listas genéricas de modo de falla. Son listados de modo de falla generales preparados por el fabricante que puede cubrir sistemas completos o solo un activo o uno de sus componentes. Se debe elaborar con precaución por las siguientes razones:

- El nivel de análisis no es el adecuado.
- El contexto operacional puede ser diferente.
- Los parámetros de funcionamiento puede cambiar.

- Otros usuarios de la misma máquina.

Esta es una fuente de información muy valiosa sobre lo que puede fallar de los activos, pero debe tenerse mucho cuidado con la información genérica al usarse este tipo de fuente.

- Registros de antecedente técnicos.

Estos registros a pesar de ser una buena fuente de información deben ser usados con cautela ya que frecuentemente son incompletos y a menudo describen la acción correctiva realizada y no la causa de la falla.

- Las personas que operan y mantienen el equipo.

Esta es la mejor fuente de información para preparar un análisis de modos y efectos de falla, ya que conocen el funcionamiento de los equipos y lo que suele sucederle. También conocen la importancia de cada falla y qué se debe hacer para repararla.

3.8 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 está asociada a sistemas de protección sin seguridad inherente.

3.8.1 Dispositivos de Seguridad. Su función principal es la de garantizar que las consecuencias de la falla sea menos grave de lo que sería sin protección.

Todo dispositivo cuenta con lo menos con dos funciones:

- La función protectora (el dispositivo de seguridad)
- La función protegida.

Dependiendo si el sistema de seguridad tienen o no seguridad inherente, así mismo se crean dos posibilidades de falla.

3.8.2 Dispositivos de protección con seguridad inherente. Que significa seguridad inherente? Significa que la falla del dispositivo por si sola se hará evidente para el grupo de operarios bajo circunstancias normales.

Un dispositivo de seguridad tiene tres posibilidades de falla:

- Que ningún dispositivo falla, todo es normal.
- La función protegida falla antes que el dispositivo de protección.
- El dispositivo de seguridad falla antes que la función protegida.

En la tercera posibilidad se hace evidente la falla del dispositivo ante del operador.

Las consecuencias de la falla de un dispositivo de seguridad con falla seguida caen en las categorías de “Operacionalidad” o “No operacionalidad”

3.8.3 Dispositivos de Seguridad que no son de falla segura. En un sistema que tenga un dispositivo que no es de falla segura, el hecho de que el dispositivo no sea capaz de cumplir su función no es evidente bajo circunstancias normales.

Lo anterior crea cuatro posibilidades de falla, dos de las cuales son similares de las que ocurren en los dispositivos con seguridad inherente.

- Que ningún dispositivo falla, todo es normal
- Falla la función protegida al momento que el dispositivo está funcionando. En este caso, el dispositivo funciona y las consecuencias son reducidas.

- Falla el dispositivo de seguridad mientras la función protegida sigue funcionando. En este caso la falla no tiene consecuencias directas, pero nadie sabe que el dispositivo de seguridad se encuentra en estado de falla.
- El dispositivo de seguridad falla y luego la función protegida también falla. Esta situación es conocida como falla múltiple.

3.8.4 La disponibilidad que requieren las funciones ocultas. Una de las consecuencias que podemos extraer hasta ahora es la única consecuencia de una falla oculta es la exposición al riesgo de una falla múltiple.

La probabilidad de una falla múltiple en cualquier momento debe estar dada por la probabilidad de que la función protegida falle, cuando el dispositivo de seguridad se encuentra en falla. Puede calcularse de la siguiente manera:

$$\text{Probabilidad de falla múltiple} = \text{Probabilidad de falla de la función protegida} \times \text{Indisponibilidad promedio del dispositivo de seguridad}$$

Generalmente la probabilidad de falla de la función protegida es un dato dado. Por lo tanto si se conocen todas estas dos variables, la no disponibilidad permitida puede ser expresada de la siguiente manera:

$$\text{Indisponibilidad promedio del dispositivo de seguridad} = \frac{\text{Probabilidad de falla múltiple}}{\text{Probabilidad de falla de la función protegida}}$$

Un elemento crucial del funcionamiento requerido de cualquier función oculta es la disponibilidad requerida para reducir las fallas múltiples asociadas a unos niveles tolerables.

Esta disponibilidad se determina en tres pasos:

- Establecer primero qué probabilidad de falla múltiple está la organización preparada a tolerar.
- Determinar la probabilidad de que falle la función protegida en el período en cuestión (conocido como rata de demanda).
- Determinar qué disponibilidad debe lograr la función oculta para reducir la probabilidad de falla múltiple a los niveles requeridos.

Generalmente es posible variar tanto la probabilidad de falla de la función protegida como la indisponibilidad del dispositivo protector adoptando políticas apropiadas de mantenimiento y de operaciones. Como resultado, también es posible reducir la probabilidad de la falla múltiple a casi cualquier nivel deseado que sea razonable.

3.8.5 Mantenimiento de rutina y funciones ocultas. En un sistema que incorpora un dispositivo de seguridad de falla segura, la probabilidad de una falla múltiple puede ser reducida de la siguiente manera:

- Reducir frecuencia de falla de la función protegida:
 - Haciendo 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 manteniendo proactivo,
 - Verificando periódicamente si el dispositivo de protección ha fallado,
 - Modificando el dispositivo de protección.

3.9 TAREAS DE MANTENIMIENTO

Las acciones o tareas que pueden tomarse para tratar las fallas se pueden dividir en dos categorías:

- Tareas Proactivas: son tareas que se realizan antes de que ocurra una falla, con el objeto de prevenir que el componente llegue al estado de falla. Comprenden lo que comúnmente se denomina mantenimiento predictivo y preventivo, pero en RCM-2 se utilizan los términos reacondicionamiento cíclico, sustitución cíclica, y mantenimiento a condición.

- Tareas a falta de: estas tratan 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, rediseño y mantenimiento a falla.

Estas dos categorías responden a la sexta y séptima de las siete preguntas del proceso de decisión de RCM-2:

- ¿Que puede hacerse para predecir o prevenir cada falla?
- ¿Que sucede si no puede encontrarse una tarea predictiva o preventiva apropiada?

3.9.1 Tareas Proactivas. Aunque mucha gente piensa que la mejor manera de optimizar la disponibilidad de la planta es mediante algún tipo de mantenimiento proactivo de rutina, basado en el pensamiento clásico que establece que los registros acerca de las fallas nos permite determinar y planear acciones preventivas un tiempo antes de que ellas ocurran. Este patrón es cierto para algunos equipos simples y para algunos ítems complejos con modos de falla dominante.

Fallas relacionadas con la edad normalmente están asociadas a la fatiga, la corrosión, abrasión y evaporación. Sin embargo, los equipos son mucho más complejos de lo que eran hacen 20 años, lo que ha traído cambios en los patrones de falla, como se muestra en la gráfica de la tercera generación, Figura 16, en donde se ve la probabilidad de falla respecto de la edad operacional para una variedad de elementos mecánicos y eléctricos.

Se ha demostrado, que en la aviación comercial, un 4% de los elementos corresponden el patrón A, un 2% al B, un 5% al C, un 7% al D, un 14% al E y no menos del 68% al F. Si bien a escala industrial estos patrones no guardan la misma proporción, es innegable que a medida que los elementos se hacen más complicados, encontramos más patrones E y F, los cuales contradicen la creencia de que siempre hay conexión entre la confiabilidad y la edad operacional.

Esta creencia dio origen a la idea de que cuanto mas seguido un ítem es reparado, menos posibilidades de falla tiene, lo cual es cierto en poco casos, a menos que exista un modo de falla dominante relacionado con la edad. De hecho, las reparaciones pueden aumentar las fallas al introducir la mortalidad infantil en sistemas que de otra manera serían estables. Sin embargo, cuando las consecuencias de las fallas son importantes, algo hay que hacer para prevenir ó predecir las fallas, y es esto lo que hacemos mediante las tareas proactivas y que RCM-2 divide en 3 categorías:

- Tarea de reacondicionamiento cíclica.
- Tarea de sustitución cíclica.
- Tarea de condición.

- Tarea de reacondicionamiento y de sustitución cíclica.

El reacondicionamiento cíclico implica la remanufactura de un componente ó la reparación total de un conjunto antes de un límite de edad específico sin importar su condición en ese momento. Igualmente, la sustitución cíclica implica cambiar un componente ante de un límite de edad sin tener en cuenta su condición actual. Estos dos tipos de tarea son conocido como mantenimiento preventivo, y es el mantenimiento proactivo más utilizado, sin embargo, por lo visto antes son menos usados ahora que 20 años atrás.

La frecuencia para estas tareas está gobernada por la edad a la que la pieza ó componente muestra un incremento en la probabilidad de falla.

Se puede decir que estas tareas son técnicamente factibles sí:

- Hay una edad identificable en la que la pieza ó parte muestra un incremento en la probabilidad de falla
- La mayoría de las piezas o partes sobreviven a ésta edad
- Se logra restaurar la resistencia original de la pieza a la falla.

Como se ve de lo anterior, estas tareas son aplicables para aquellos elementos ó partes cuyas fallas están relacionadas con la edad, de acuerdo a los patrones de falla A, B ó C. Las fallas relacionadas con la edad tienden a estar asociadas con la fatiga, la oxidación, la corrosión y la evaporación.

3.9.2 Tarea de Condición. Los nuevos tipos de manejo de falla se deben a la necesidad de prevenir cierto tipo de falla y la creciente ineficacia de las técnicas clásica para hacerlo. La mayoría de estas nuevas técnicas se basan en el hecho de que la mayoría de las fallas dan algún tipo de aviso de que están por ocurrir. Esto se denomina fallas potenciales.

Las nuevas técnicas son para detectar fallas potenciales y para evitar las consecuencias si se convierten en falla funcionales. Se llaman tarea de condición porque los componentes se dejan en servicio a condición de que continúen alcanzando parámetros de funcionamiento deseado. El mantenimiento a condición incluye el mantenimiento predictivo, mantenimiento basado en la condición y monitoreo de condición. Las tareas a condición son una buena forma de manejar las fallas, pero se pueden constituir en una costosa pérdida de tiempo. RCM permiten tomar estas decisiones con mucha confianza.

Para establecer las tareas en el mantenimiento a condición, es necesario determinar con precisión las frecuencias de las mismas para que sean efectivas y no se conviertan en un gasto exagerado. Para esto, se requiere conocer con la

mayor precisión el proceso de desarrollo de la falla, lo cual se ilustra en la llamada curva P-F, en la que se muestra como se inicia la falla, luego se deteriora al punto donde puede ser detectada (Punto P), y luego si no es detectada y corregida, continua el deterioro hasta el punto de falla F.

En la Figura 25 se ilustra este proceso. El punto donde es posible detectar que la falla está ocurriendo se conoce como falla potencial (Ej. Puntos calientes en el refractario de un horno ó una conexión eléctrica, vibraciones en un cojinete, etc.).

Si se detecta una falla potencial, es posible actuar para prevenir ó evitar las consecuencias de la falla funcional, entre el punto P y el punto F de la Figura. Las tareas para detectar fallas potenciales se conocen como tareas a condición, porque los elementos que se inspeccionan se dejan en funcionamiento a condición de que continúen cumpliendo con los parámetros de funcionamiento especificados. También se conoce como mantenimiento predictivo ó mantenimiento basado en condición.

El intervalo P-F como se mencionó antes, es el intervalo entre el momento en que ocurre la falla potencial P y la ocurrencia de la falla funcional F, y nos permite determinar la frecuencia para las tareas a condición. Si queremos evitar que la falla potencial se convierta en falla funcional, la frecuencia de la tarea de monitoreo de condición debe ser realizada a intervalos menores al intervalo P-F. Por ello es importante determinar con consistencia el intervalo P-F, para que la frecuencia de la tarea de monitoreo cumpla su objetivo, pues si es mayor que el intervalo P-F no evita la falla funcional, y si es mucho menor se convierte en un gasto innecesario.

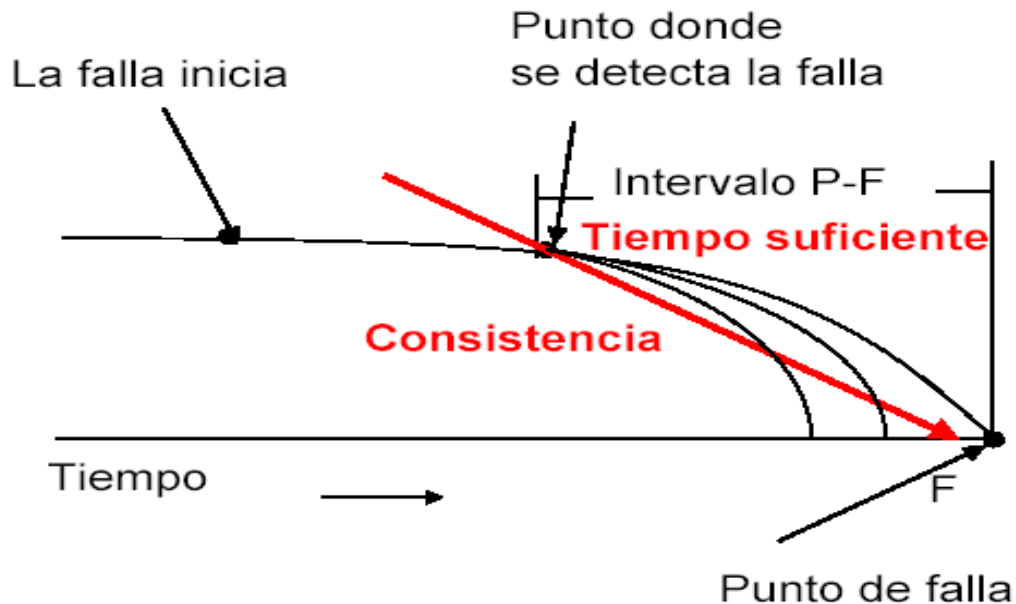
Dado que el intervalo P-F para una falla determinada no es constante, como se muestra en la Figura 25, se debe seleccionar un intervalo de la tarea que sea mas corto al menor de los intervalos P-F probables, para asegurar que la falla potencial se puede detectar antes de que se convierta en falla funcional. Por otra parte, si el intervalo P-F no es consistente, si no que varia mucho, no es posible establecer un intervalo de tarea que tenga sentido, y la tarea debe abandonarse a favor de alguna otra forma de tratamiento de la falla.

Estas tareas a condición son técnicamente factibles sí:

- Es posible definir una condición clara de falla potencial.
- El intervalo P-F es razonablemente consistente.
- Es práctico monitorear el elemento a intervalos menores al intervalo P-F.

- El intervalo P-F es suficientemente largo como para ser útil (suficientemente largo como para actuar a fin de reducir o eliminar las consecuencias de la falla funcional).

Figura 25. Intervalo P-F



3.9.3 Tareas “a falta de”. Anteriormente se mencionó que si no se puede hallar una tarea proactiva que sea técnicamente factible y que merezca la pena ser realizada para un modo de falla cualquiera, la acción “a falta de” que debe ser realizada está regida por las consecuencias de la falla así:

- Si no es posible una tarea proactiva que reduzca el riesgo de la falla múltiple asociada con la función oculta a un nivel tolerablemente bajo, entonces se debe realizar periódicamente una tarea de búsqueda de falla. Si no es posible una tarea de búsqueda de falla apropiada, la decisión “a falta de” puede resultar en la posibilidad de un rediseño.
- Si no es posible una tarea proactiva que reduzca el riesgo de una falla que podría afectar la seguridad o el medio ambiente a un nivel tolerablemente bajo, obligatoriamente debe ser rediseñado el componente o el proceso.
- Si no es posible una tarea proactiva que cueste menos, a través de un período de tiempo, que una falla que tiene consecuencias operacionales, la decisión “a falta de” es no realizar mantenimiento programado.

- Si no es posible una tarea proactiva que cueste menos, a través de un período de tiempo, que una falla que tiene consecuencias no operacionales, la decisión “a falta de” es no realizar mantenimiento programado.

RCM2 reconoce 3 categorías de acciones “a falta de”:

- Búsqueda de fallas: son tareas para revisar las funciones periódicamente para determinar si han fallado, diferente a las tareas basadas en condición que implica en revisar algo para ver si está por fallar.
- Rediseñar: significa hacer cambios a las capacidades iniciales de un sistema. Esto incluye modificaciones al equipo y cambio a los procedimientos.
- Mantenimiento no programado: aquí no se hace esfuerzo en tratar de anticipar o prevenir los modos de fallas a los que se aplican. Aquí se deja que la falla ocurra para luego repararla. Esta tarea también es conocida como mantenimiento correctivo o “a rotura”.

3.9.4 Selección de Tareas en RCM2. Una fortaleza de RCM2 es la forma en que provee criterio simple, precisos y fáciles para decidir cual de las tareas proactivas es técnicamente factible y determinar quien debe hacerla y con qué frecuencia.

Si una tarea proactiva es técnicamente factible o no depende de la característica de la tarea y de la falla que pretende prevenir. Si vale la pena hacerla o no depende de la consecuencia 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. En esencia, el proceso de selección de tarea es el siguiente:

- Para faltas ocultas, la tarea proactiva vale la pena si reduce significativamente el riesgo de falla múltiples asociados a esa función a un nivel tolerable. Si esto no es posible se debe realizar una tarea de búsqueda de falla y si tampoco se puede ésta, la decisión “a falta de” es que el componente sea rediseñado (Dependiendo de las consecuencias e la falla).
- Para fallas con consecuencias ambientales ó de seguridad, la tarea proactiva vale la pena si reduce el riesgo de la falla a un nivel muy bajo o lo elimina, de lo contrario, el componente debe ser rediseñado o modificar el proceso.
- Si la falla tiene consecuencias operacionales, la tarea proactiva vale la pena si el costo de realizarla en un periodo tiempo es menor al costo de las consecuencias operacionales y el costo de la reparación en el mismo periodo de tiempo. Si no se justifica, la decisión “a falta de” es ningún mantenimiento programado.

- Si la falla tiene consecuencias no operacionales, la tarea proactiva solo vale la pena si el costo de la tarea en un periodo de tiempo es menor al costo de reparación en el mismo periodo. De no ser así, la “tarea de “es ningún mantenimiento programado. Este enfoque hace que las tareas proactivas solo se definan para las fallas que realmente lo ameriten, lo que logra reducir la carga de trabajo rutinario y un mantenimiento más efectivo.

3.10 APLICACIÓN DEL DIAGRAMA DE DECISIÓN DE RCM2

La aplicación del Diagrama de Decisión de RCM2, el cual se ilustra en la Figura 29 del capítulo 4, permite dar respuesta a cada una de las preguntas que se formulan, en cuanto a qué mantenimiento rutinario hay que realizar (si es que se necesita), con qué frecuencia, y quién lo realizará. Adicionalmente, da respuesta en cuanto a qué fallas justifican un rediseño, y en qué casos se decide deliberadamente dejar que ocurran las fallas.

El Diagrama de Decisión se trabaja en conjunto con la Hoja de Información de RCM2, y la Hoja de Decisión, la cuales se muestran en las figuras 28 y 30 del capítulo 4, respectivamente.

La primera sección de la Hoja de Decisión, identificada como “Referencia de Información”, correlaciona los datos de Función, Falla Funcional y Modo de Falla de la Hoja de Información.

Las siguientes secciones de la Hoja de Decisión, desde la identificada como “Evaluación de las consecuencias”, hasta la identificada como “Tareas a Falta de”, se relacionan con las preguntas del Diagrama de Decisión, y permiten registrar en la Hoja de Decisión las respuestas a las preguntas concernientes a las consecuencias de cada modo de falla, a los tipos de tarea, y las acciones “a falta de”, si aplica.

Por último, se registra en la Hoja de Decisión las tareas que se seleccionan, la frecuencia con la que debe hacerse, y el responsable de realizarla.

La información que se registra en las Hojas de Información y de Decisión, son fácilmente manejadas en una Base de Datos computarizada, y es recomendable que así se haga, ya que la cantidad de información que se puede llegar a manejar es elevada, dependiendo del número de activos que hagan parte del sistema analizado. Igualmente, la posterior revisión, análisis y actualización de la información en el computador es mucho más fácil de manejar, y más confiable.

4. IMPLANTACIÓN DE RCM-2 EN PROPILCO S.A.

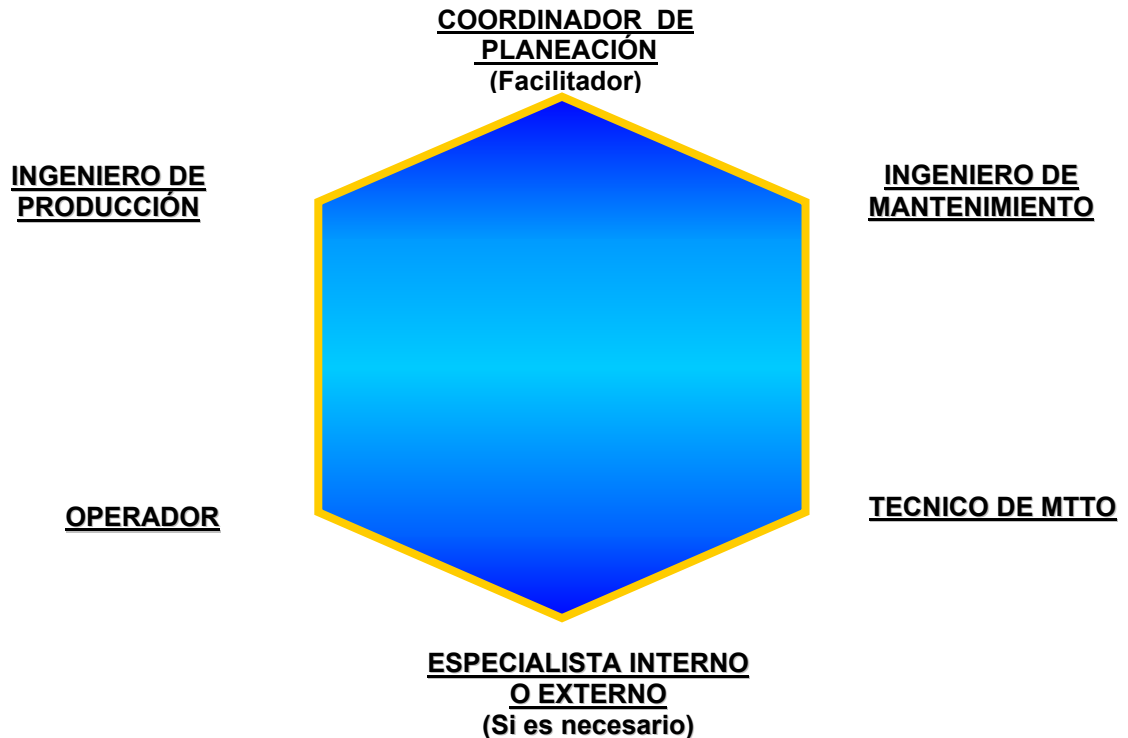
Para garantizar los buenos resultados esperados, y la sostenibilidad del proceso de RCM en el tiempo, se requiere cumplir con los siguientes cinco pasos:

- Auditar formalmente por parte de la alta gerencia, que en el caso de PROPILCO S.A. le correspondería a la Vicepresidencia de Operaciones, los contenidos de los programas de RCM, y si la auditoria se realiza correctamente, garantizará un marco sólido para el proceso de RCM que permitirá la formulación de estrategias para el manejo de los activos.
- Describir de forma clara y concisa todas las tareas rutinarias, incluyendo además de la descripción de la tarea misma, la descripción del activo, la definición de quien debe realizar la tarea, la frecuencia, si el equipo debe ser aislado para intervenirlo, las herramientas y repuestos que se necesitan.
- Identificar correctamente todas las acciones que requieran cambios puntuales o rediseño. Un determinado porcentaje de los modos de falla que se identifican con RCM tienen que ver con el rediseño. La implementación de estos cambios requieren la participación de un equipo multidisciplinario, cuyos miembros deben entender por qué se requieren los cambios para que estén preparados.
- Actualizar los procedimientos operativos y hacer aquellos que no se tengan para manejar las tareas rutinarias y los cambios puntuales cuando éstos se requieran..
- Revisar el sistema de planeación de las tareas de mantenimiento, incluyendo aquellas ejecutadas por los operadores.

La aplicación del proceso de RCM requiere de la participación de personas claves, que apliquen el proceso, divididos en pequeños grupos (denominados Grupos de Análisis). Un Grupo de Análisis típico está constituido por un número no inferior a cuatro personas, y no superior a siete, conformado por un Facilitador, un Ingeniero de Diseño, un Técnico de Mantenimiento, un Operador, un Supervisor o Ingeniero de Operaciones y un especialista interno o externo si es necesario. En el caso de PROPILCO S.A., el grupo estaría integrado tal y como se muestra en la Figura 26.

El objetivo de los Grupos de Análisis es determinar en consenso los requerimientos de mantenimiento de cada activo o componente en particular, bajo el contexto en que este activo se encuentra operando.

Figura 26. Grupo de trabajo en PROPILCO S.A

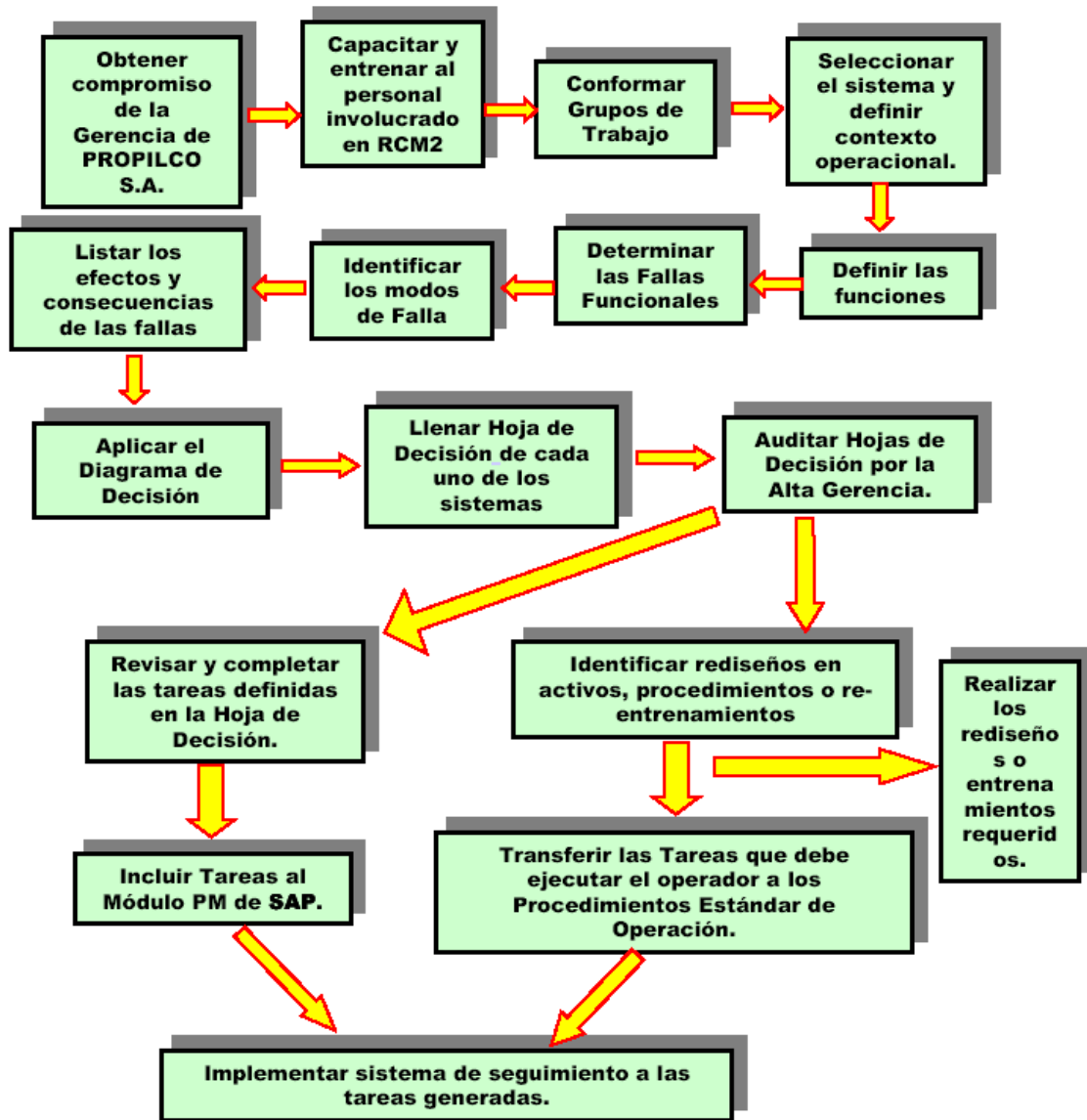


Para la aplicación del proceso de RCM seleccionamos el área de reacción tal y como se definió en el capítulo 2 dentro del planteamiento del problema.

El grupo de trabajo deberá seguir el diagrama de implantación de RCM-2 en PROPILCO S.A. mostrado en la figura 27, el cual se detalla a continuación:

- Selección del sistema y su contexto operacional: se deberá seleccionar los sistemas del área de reacción teniendo en cuenta su función en el proceso. En el caso particular cubierto en el marco de la monografía se sugiere dividirla así:
 - Alimento de propileno.
 - Alimento de SHAC
 - Alimentote TEAL.
 - Alimento de PEEB/NPTMS
 - Alimento de hidrógeno
 - Alimento de nitrógeno.
 - Alimento de etileno
 - Sistema de descarga.
 - Sistema de control de temperatura de reacción.

Figura 27. Diagrama de Implantación de RCM2 en PROPILCO S.A



- Llenar la hoja de trabajo identificada como “Hoja de información de RCM” mostrada en la figura 28, donde se definen las funciones, fallos funcionales, modos de fallos y efectos de los mismos explicados ampliamente en el capítulo 3 de esta monografía.
- Con ayuda del diagrama de decisión mostrado en la figura 29, se deberá llenar la hoja de decisión de RCM mostrada en la figura 30, para evaluar las consecuencias de las fallas y definir las tareas de mantenimiento adecuadas para prevenir futuros fallos funcionales. Así mismo, se debe definir las frecuencias de las tareas y los responsables de la ejecución.

4.1 RESULTADOS ESPERADOS CON LA IMPLANTACION DE RCM 2

Los resultados que se esperan obtener con la implantación de RCM2 en PROPILCO S.A. serán tangibles, y se pueden resumir así:

- Una vez implantada la metodología, se cubrirá el 100% de todos los sistemas tanto de Planta 1 como de Planta 2, y al final se tendrá la actualización de los programas de Mantenimiento en PROPILCO S.A. La meta es tener el 90% de los activos dentro del mantenimiento al final de la implementación total que deberá concluir en Julio del 2006.
- Revisión del 100% de los procedimientos operativos y de mantenimiento de los sistemas analizados.
- Aumentar las horas de capacitación sobre los procesos de la planta ya que la metodología conlleva un conocimiento detallado sobre las funciones de los activos. Se estima un total de 560 horas de capacitación acumuladas al concluir el área de Reacción de Planta 1 a finales del 2004.
- Aumentar la Disponibilidad de las plantas en al menos 1%, lo que significa 80 horas más de producción de Polipropileno por año que representan 1,500 TM/Año adicionales y ganancias aproximadas de US\$ 150,000.
- Aumentar el porcentaje de producción de Polipropileno calidad PRIME, pasando del 92% al 93% (1,400 TM adicionales por año), al disminuir las paradas imprevistas del sistema de reacción.

4.2. PRESUPUESTO DE INVERSIÓN

Si bien es cierto que los beneficios descritos en la sección anterior redundarán en mayores ingresos para la compañía, la implantación de RCM2 en PROPILCO S.A. demandará una fuerte inversión en recursos tanto humanos como económicos.

A continuación se detallarán los gastos que conlleva cada una de las etapas descritas en el diagrama de implantación de la figura 28.

Capacitación del personal: En ella se involucra a la alta gerencia y a los jefes de los departamentos de mantenimiento y producción, al igual que una gran parte del personal que hará parte del grupo de trabajo. Se deberá definir quien o quienes serán los facilitadores que estarán participando como líderes de los grupos de trabajo.

La capacitación inicial definida como introducción al RCM tiene una intensidad de tres (3) días con un valor de \$1'250.000 por participante.

Para los facilitadores, la capacitación es más intensa porque se enseña la metodología y las herramientas para dirigir a los grupos e implementar las tareas que salgan producto del análisis FMCA de los sistemas. Esta capacitación tiene una intensidad de siete (7) días y un costo de \$ 4'000.000 por facilitador.

La inversión presupuestada para esta etapa se resume en la tabla 3:

Tabla 3. Presupuesto de capacitación en RCM2

CURSO	PARTICIPANTES	COSTO	TRANSPORTE Y ALOJAMIENTO	TOTAL
Introducción al RCM	11	\$13'750.000	\$10'000.000	\$23'750.000
Facilitador	1	\$ 4'000.000	\$ 1'700.000	\$ 5'700.000
				\$29'450.000

Análisis de los sistemas y definición de tareas: Esta etapa tiene una duración estimada de cuatro (4) meses, tiempo durante el cual se reunirán una vez por semana durante 5 horas para analizar cada uno de los sistemas del Reactor No.1. La inversión asociada es generada por el tiempo del personal que conforma el grupo a lo largo del proyecto.

El grupo compuesto por el facilitador, dos (2) ingenieros y dos (2) técnicos tienen un valor en nómina en PROPILCO S.A. de \$179.000/Hr. El proyecto en esta etapa demandará 80 Horas del grupo que representan \$ 14'320.000.

Revisar, Completar las Tareas y Actualizar el sistema SAP: El Facilitador quien es el Coordinador de Planeación, dedicará 20 horas semanales durante esta etapa que representan \$22'360.000.

Resumen del Presupuesto:

En la tabla 4 presenta el resumen de los gastos que el proyecto demandará durante la implementación del programa piloto de RCM en el área de Reacción de planta 1.

Tabla 4. Presupuesto de Implantación del Proyecto Piloto de RCM2.

DETALLE	TOTAL
Capacitación	\$29'450.000
Análisis de Sistemas y Defición de Tareas	\$14'320.000
Revisar, Completar Tareas y Actualizar SAP	\$22'360.000
TOTAL	\$66'130.000

Este presupuesto solo incluye la inversión que se hará durante la implantación de RCM2 mas no las inversiones futuras que se deriven de los análisis de los sistemas.

Esta inversión se recuperara fácilmente con las ganancias que se obtendrán al aumentar la disponibilidad en la planta tal y como se explicó en la sección 4.1.

CONCLUSIONES

El trabajo de la presente monografía permitió revisar las diferentes áreas operativas de la empresa PROPILCO S.A., analizar el historial de fallas de sus equipos y sistemas operativos, y determinar que el área de reacción es el área más crítica desde el punto de vista de afectación de la producción, deterioro en la calidad de los productos producidos, y la seguridad de las personas y las instalaciones de la planta, debido a la cantidad y tipo de fallas presentadas.

Se pudo evidenciar que las prácticas actuales de mantenimiento de la empresa, mayormente de tipo preventivo y predictivo han tenido un comportamiento satisfactorio a lo largo del tiempo, sin embargo no se establece una identificación clara de las fallas de algunos sistemas, particularmente de instrumentos y controles, ni existe una metodología y procedimientos para la búsqueda de soluciones efectivas a cada una de las fallas cuando se presentan.

Se presentó la filosofía de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad como una alternativa para lograr un cambio positivo y efectivo en la gestión de mantenimiento de la empresa, confiando en que se producirán resultados muy rápidos. Con esta filosofía, y la metodología que la acompaña, en una fase posterior al desarrollo del trabajo de la presente monografía, se hará la implantación del proyecto piloto en el área seleccionada, lo cual permitirá volver a evaluar los requisitos de mantenimiento de los equipos existentes y revisar tanto los requisitos como la forma en que se percibe la función del mantenimiento, para transformarla en una operación integral. Se espera que el resultado visible sea una gestión de mantenimiento menos costosa, más armoniosa, más segura y más eficaz.

Todos estos factores forman parte de la evolución de la gestión del mantenimiento, y hacen parte de las metas de los programas de mejora planteados por la empresa PROPILCO S.A. La implantación de RCM-2 proveerá un marco de trabajo paso a paso efectivo, promoverá la participación de todo el que tenga algo que ver con los equipos de proceso, y permitirá en últimas, llevar la gestión de Mantenimiento de la empresa a tipo “CLASE MUNDIAL”

BIBLIOGRAFÍA

CAMPBELL, John D. Uptime: Strategies for Excellence in Maintenance Management. s.l. : Productivity Press, 1995. 204 p.

CAMPBELL, John D. The Reliability Handbook. Burlington, Ontario : Clifford/Elliott, 1999. 50 p.

DEKKER, Marcel. Maintenance Excellence: Optimizing Equipment Life Cycle Decision. s.l. : El autor, 2001. 495 p.

EBELING, Charles E. An introduction to Reliability and Maintainability Engineering. s.l. : McGraw-Hill Science, 1996. 576 p.

FRANKEL, Ernst G. Systems Reliability and Risk Analysis. s.l. : Kluwer Academic Publishers, 1988. 448 p.

GONZÁLEZ BOHÓRQUEZ, Carlos Ramón. Seminario IV: Evaluación de la Investigación. En : POSGRADO EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO. (2004 : Cartagena). Memorias del Seminario IV: Evaluación de la Investigación del Posgrado en Gerencia de Mantenimiento. Cartagena: UIS, 2004. 26 p.

GONZÁLEZ JAIMES, Isnardo. Seminario II: Monografía de Especialización. En : POSGRADO EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO. (2003 : Cartagena). Memorias del Seminario II: Monografía de Especialización del Posgrado en Gerencia de Mantenimiento. Cartagena: UIS, 2003. 95 p.

GONZÁLEZ JAIMES, Isnardo. Seminario III: Desarrollo de la Investigación. En : POSGRADO EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO. (2003 : Cartagena). Memorias del Seminario III: Desarrollo de la Investigación del Posgrado en Gerencia de Mantenimiento. Cartagena: UIS, 2003. 42 p.

HOFFMAN, Rick. The Top Myths Of Reliability Management. En : Reliability Magazine. (junio 2001); p. 10-15

MOUBRAY, John. Reliability-centered Maintenance. Nueva York : Industrial Press, 1997. 448 p.

ORTIZ, Germán. Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. En : POSGRADO EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO. (2003 : Cartagena). Memorias de la asignatura de Organizaciones de Mantenimiento del Posgrado en Gerencia de Mantenimiento. Cartagena: UIS, 2003. 142 p.

PEREZ J, Carlos Mario. Gerencia de Mantenimiento y Sistemas de Información.
Medellín : El autor, 1992. 120 p.

