The Engineering Society For Advancing Mobility Land Sea Air and Space®
INTERNATIONAL
400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA 15096-0001

PRÁCTICAS RECOMENDADAS PARA VEHICULOS AEROESPACIALES Y DE SUPERFICIE

SAE JA1012

EMITIDA ENE2002

Emitida 2002-01

Una Guía para la Norma de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC)

Prólogo— El Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC) fue documentado por primera vez en un reporte escrito por F.S. Nowlan y H.F. Heap y publicado por el Departamento de Defensa de U.S. en 1978. El mismo describió los procesos innovadores y actuales, para ese entonces, usados para desarrollar programas de mantenimiento para aviones comerciales. Desde entonces, el proceso MCC ha sido ampliamente utilizado por otras industrias, y desarrollado y mejorado ampliamente. Estas mejoras se han incorporado en numerosos documentos de aplicación, publicados por una variedad de organizaciones alrededor del mundo. Muchos de estos documentos permanecen fieles a los principios básicos del MCC expuestos por Nowlan y Heap.

Sin embargo, en el desarrollo de algunos de estos documentos, se han omitido o malinterpretado elementos claves del proceso MCC. Debido a la creciente popularidad de MCC, han surgido otros procesos a los cuales sus defensores les han dado el nombre de “MCC”, pero que no están basados en absoluto en Nowlan y Heap. Mientras que la mayoría de estos procesos pueden alcanzar algunas de las metas de MCC, otros pocos son activamente contraproducentes, y algunos son, incluso, dañinos.

Como resultado, a habido un crecimiento de la demanda internacional por una norma que imponga los criterios que cualquier proceso deba cumplir para ser llamado “MCC”. SAE JA1011 contempla esa necesidad. Sin embargo, SAE JA1011 presupone un alto grado de familiaridad con los conceptos y la terminología de MCC. Esta guía amplifica, y donde es necesario clarifica, estos conceptos claves y términos, especialmente aquellos que son únicos para MCC.

Nótese que esta guía no esta concebida para ser un manual o una guía de procedimiento para desarrollar MCC. Es para aquellos quienes deseen aplicar MCC, que estén sumamente animados a estudiar el asunto en gran detalle, y a desarrollar sus competencias bajo la guía de practicantes MCC experimentados.

Traducción al español de la norma SAE JA1012 “A Guide to the Reliability-Centered Maintenance (RCM) Standard” emitida en Enero de 2.002.

TABLA DE CONTENIDO

1. Alcance— SAE JA1012 ("A Guide to the Reliability-Centered Maintenance (RCM) Standard") amplifica y aclara cada uno de los criterios claves listados en SAE JA1011 ("Evaluation Criteria for RCM Processes"), y resume problemas adicionales que deben ser tomados en cuenta para aplicar MCC exitosamente.

1.1 Organización de la Guía— Las Secciones de la 5 a la 14, 16 y 17 de esta guía reflejan las secciones de SAE JA1011 en la mayoría de su contenido. La Sección 15 explica más detalladamente como se pueden combinar los elementos claves del proceso MCC para seleccionar políticas apropiadas de manejo individual de modos de falla y sus consecuencias. La Sección 18 toma en cuenta la gerencia y los aspectos relacionados con recursos esenciales para el desarrollo exitoso de MCC.

2. Referencias

2.1 Publicaciones Aplicables— Las siguientes publicaciones forman parte de este documento con una magnitud especificada en el mismo. A menos que sea indicado, aplicará la emisión más reciente de las publicaciones SAE. La emisión aplicable surtirá efecto a partir de la fecha de la orden de compra. En caso de existir algún conflicto entre el texto de este documento y las referencias citadas en el mismo, prevalece el texto de este documento. Nada en este documento; sin embargo, reemplaza leyes y regulaciones aplicables a menos que se haya obtenido una exención específica.

2.1.1 Publicaciones SAE— Disponible en SAE, 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA 15096-0001.

SAE JA1011—Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes

2.2 Publicaciones Relacionadas

2.2.1 PUBLICACIONES DEL DEPARTAMENTO DE COMERCIO DE U.S.— Disponible en NTIS, Port Royal Road, Springfield, VA 22161

Nowlan, F. Stanley, and Howard F. Heap, "Reliability-Centered Maintenance," Departamento de Defensa, Washington, D.C. 1978. Número de Reporte AD-A066579.

2.2.2 PUBLICACIONES DEL DEPARTAMENTO DE DEFENSA DE U.S.— Disponible en DODSSP, Subscription Services Desk, Building 4/Section D, 700 Robbins Avenue, Philadelphia, PA 19111-5098

MIL-STD 2173(AS)— "Reliability-Centered Maintenance Requirements for Naval Aircraft, Weapons Systems and Support Equipment" (U.S. Naval Air Systems Command)
NAVAIR 00-25-403— "Guidelines for the Naval Aviation Reliability Centered Maintenance Process" (U.S. Naval Air System Command)
MIL-P-24534— "Planned Maintenance System: Development of Maintenance Requirement Cards, Maintenance Index Pages, and Associated Documentation" (U.S. Naval Sea Systems Command)
S9081-AB-GIB-010/MAINT— "Reliability-Centered Maintenance Handbook" (U.S. Naval Sea Systems Command)

2.2.3 PUBLICACIONES DE LA PRENSA INDUSTRIAL— Disponible en Industrial Press, Inc., 200 Madison Avenue, New York City, New York, 10016 (también disponible en Butterworth-Heinemann, Linacre House, Jordan Hill, Oxford, Great Britain OX2 8DP).

Moubray, John, "Reliability-Centered Maintenance," 1997

2.2.4 PUBLICACIÓN DEL MINISTERIO DE DEFENSA DE U.K.— Disponible en Reliability-centred Maintenance Implementation Team, Ships Support Agency, Ministry of Defence (Navy), Room 22, Block K, Foxhill, Bath, BA1 5AB United Kingdom.

NES 45— Naval Engineering Standard 45, “Requirements for the Application of Reliability-Centred Maintenance Techniques to HM Ships, Royal Fleet Auxiliaries and other Naval Auxiliary Vessels”(Restricted-Commercial)

2.3 Otras Publicaciones— Las siguientes publicaciones fueron consultadas durante el desarrollo de esta SAE y no son una parte requerida de este documento.

Anderson, Ronald T. and Neri, Lewis, “Reliability-Centered Maintenance: Management and Engineering Methods,” Elsevier Applied Science, London and New York, 1990

Blanchard, B.S., Verma, D., and Peterson, E.L., “Maintainability: A Key to Effective Serviceability and Maintenance Management,” John Wiley and Sons, New York, 1995

Cox, S.J. and Tait, N.R.S., “Reliability, Safety and Risk Management,” Butterworth Heinemann, Oxford, 1991

“Dependability Management— Part 3-11: Application Guide— Reliability Centred Maintenance,” International Electrotechnical Commission, Geneva, Document No. 56/651/FDIS.

Jones, Richard B., “Risk-Based Management: A Reliability-Centered Approach,” Gulf Publishing Company, Houston, TX, 1995

MSG-3, “Maintenance Program Development Document,” Air transport Association, Washington DC, Revision 2 1993

“Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis,” Department of Defense, Washington, DC, Military Standard MIL-DTD. 1629A, Notice 2, 1984

“Reliability Centered Maintenance for Aircraft, Engines, and Equipment,” United States Air Force, MIL-STD-1843 (NOTA: Cancelado sin reemplazo en Agosto de 1995)

Smith, Anthony M., “Reliability Centered Maintenance,” McGraw-Hill, New York, 1993

Zwingelstein, G., “Reliability Centered Maintenance, A Practical Guide for Implementation,” Hermés, Paris, 1996

3. Definiciones

3.1 Cambio de especificaciones— Cualquier acción tomada para cambiar la configuración física de un activo o sistema (rediseño o modificación), cambiar el método utilizado por un operador o mantenedor para el desarrollo de una tarea específica, cambiar el contexto operacional del sistema, o cambiar la capacidad de un operador o mantenedor (entrenamiento).

3.2 Capacidad Inicial— El nivel de operación que el activo físico o sistema es capaz de lograr en el momento que entra en servicio.

3.3 Consecuencias Ambientales—Un modo de falla o falla múltiple tiene consecuencias ambientales si puede violar cualquier norma ambiental corporativa, municipal, regional, nacional o internacional, o la regulación que aplica para el activo físico o sistema en consideración.

3.4 Consecuencias de Falla— Los efectos que puede provocar un modo de falla o una falla múltiple (evidencia de falla, impacto en la seguridad, en el ambiente, en la capacidad operacional, en los costos de reparación directos o indirectos).

3.5 Consecuencias en la Seguridad— Un modo de falla o falla múltiple tiene consecuencias en la seguridad si puede dañar o matar a un ser humano.

3.6 Consecuencias No Operacionales— Una categoría de consecuencias de falla que no afecta adversamente la seguridad, el ambiente, o las operaciones, y que sólo requiere reparación o reemplazo de cualquier elemento (s) que podría ser afectado por la falla.

3.7 Consecuencias Operacionales— Una categoría de consecuencias de falla que afecta adversamente la capacidad operacional de un activo físico o sistema (producción, calidad del producto, servicio al consumidor, capacidad militar, o costos operacionales en adición al costo de reparación).

3.8 Contexto Operacional— Las circunstancias bajo las cuales se espera que opere el activo físico o sistema.

3.9 Desempeño deseado— El nivel de desempeño deseado por el dueño o usuario de un activo físico o sistema.

3.10 Desincorporación Programada— Una tarea programada que trae consigo la desincorporación de un componente en o antes de un límite de longevidad específico sin tener en cuenta su condición en el momento.

3.11 Dispositivo Protector o Sistema Protector— Un dispositivo o sistema que pretende evitar, eliminar, o minimizar las consecuencias de falla de cualquier otro sistema.

3.12 Dueño— Una persona u organización que puede sufrir o acarrear la responsabilidad de las consecuencias de un modo de falla en virtud de la propiedad del activo o sistema.

3.13 Efecto de Falla— Lo que pasa cuando ocurre un modo de falla.

3.14 Falla Evidente— Un modo de falla cuyos efectos se tornan evidentes para el personal de operaciones bajo circunstancias normales, si el modo de falla ocurre aislado.

3.15 Falla Funcional— Un estado en el que un activo físico o sistema no se encuentra disponible para ejercer una función específica a un nivel de desempeño deseado.

3.16 Falla Múltiple— Un evento que ocurre si una función protegida falla mientras su dispositivo o sistema protector se encuentra en estado de falla.

3.17 Falla Oculta— Un modo de falla cuyo efecto no es evidente para el personal de operaciones bajo circunstancias normales, si el modo de falla ocurre aislado.

3.18 Falla Potencial— Una condición identificable que indica que una falla funcional está a punto de ocurrir o está en proceso de ocurrir.

3.19 Función— Lo que el dueño o usuario desea que realice un activo físico o sistema

3.20 Función Evidente— Una función cuya falla aislada se vuelve evidente al personal de operaciones bajo circunstancias normales.

3.21 Función Oculta— Una función cuya falla aislada no se vuelve evidente para el personal de operaciones bajo circunstancias normales.

3.22 Función(es) Primaria(s)— La(s) función(es) que constituyen la(s) razón(es) principal(es) por las que el activo físico o sistema es adquirido por su dueño o usuario.

3.23 Funciones Secundarias— Las funciones que un activo físico o sistema tiene que cumplir a parte de su(s) función(es) primaria(s), así como aquellas que necesitan cumplir con los requerimientos reguladores o a las cuales conciernen los problemas de protección, control, contención, confort, apariencia, eficiencia de energía e integridad estructural.

3.24 Intervalo P-F— El intervalo entre el punto en que una falla potencial se hace detectable y el punto en que esta se degrada hasta una falla funcional (también conocido como "período para el desarrollo de falla" o "tiempo esperado para la falla").

3.25 Intervalo P-F Neto— El intervalo mínimo probable que trascurre entre la detección de una falla potencial y la ocurrencia de una falla funcional.

3.26 Longevidad— Una medida de exposición al esfuerzo calculada desde el momento en el cual un elemento o componente entra en servicio cuando nuevo o vuelve a entrar en servicio después de una tarea designada para restaurar su capacidad inicial, y puede ser medida en términos de tiempo de calendario, tiempo de operación, distancia recorrida, ciclos de durabilidad o unidades de producción o de rendimiento.

3.27 Mantenimiento Proactivo— Mantenimiento emprendido antes de que ocurra una falla, para prevenir que cualquier elemento entre en estado de falla (restauración programada, desincorporación programada y mantenimiento basado en condición)

3.28 Modo de Falla— Un evento único, que causa una falla funcional.

3.29 Operar hasta Fallar— Una política de manejo de fallas que permite que un modo de falla específico ocurra sin ningún esfuerzo para anticiparla o prevenirla.

3.30 Política de Manejo de Fallas— Un término genérico que abarca tareas basadas en condición, restauración programada, desincorporación programada, detección de falla, operar hasta fallar y cambio de especificaciones.

3.31 Probabilidad Condicional de Falla— La probabilidad de que una falla ocurra en un período específico, dado que el elemento involucrado ha sobrevivido al comienzo de ese período.

3.32 Programado— Se establece como fijo, a intervalos predeterminados, incluye "monitoreo continuo" (donde el intervalo es efectivamente cero).

3.33 Restauración Programada— Una tarea programada que restaura la capacidad de un elemento en (o antes de) un intervalo especificado (límite de longevidad), sin tener en cuenta su condición en el momento, a un nivel que proporciona una probabilidad tolerable de supervivencia hasta el final de otro intervalo especificado.

3.34 Tarea Apropiada— Una tarea que es técnicamente factible y al mismo tiempo vale la pena realizar (aplicable y efectiva).

3.35 Tarea Basada en Condición— Una tarea programada usada para detectar una falla potencial.

3.36 Tarea para Detectar Fallas— Una tarea programada utilizada para determinar si ha ocurrido una falla oculta específica.

3.37 Usuario— Una persona u organización que opera un activo o sistema y podría sufrir o acarrear la responsabilidad por las consecuencias de un modo de falla de ese sistema.

4. Siglas

EPI	Equipo de Prueba Incorporado
IDF	Intervalo de (tarea) Detección de Falla
AMEF	Análisis de Modo y Efectos de Falla
mm	Milímetros
TPEFM	Tiempo Promedio entre Fallas Múltiples

TPEF	Tiempo Promedio entre Fallas
TPDA	TPEF de la Función Protegida
TPRA	TPEF de la Función Protectora
psi	Libras por pulgada cuadrada
MCC	Mantenimiento Centrado en Confiabilidad
RPM	Revoluciones por Minuto
I_{TORA}	La indisponibilidad permitida por la función protectora

5. Definición de Activo— "MCC es un proceso específico utilizado para identificar las políticas que deben ser implementadas para el manejo de los modos de falla que pueden causar una falla funcional de cualquier activo físico en un contexto operacional dado" (SAE JA1011, sección 1.1).

Para identificar apropiadamente las políticas de manejo de fallas de un activo físico o sistema, se debe definir el activo o sistema. Esto incluye la selección del activo/sistema, la definición de sus límites, y la identificación del nivel de detalle más apropiado al cual se llevará a cabo el análisis.

SAE JA1011 se refiere al proceso utilizado para la selección adecuada de las políticas de manejo de fallas, bajo la suposición de que el activo/sistema involucrado ha sido ya seleccionado y definido. Esta no proporciona criterios de los procesos a ser utilizados en la selección y definición de activos o sistemas por si mismos, ya que tales procesos tienden a ser altamente dependientes del tipo de activo/sistema, para qué, y por quién están siendo (o son) usados. Sin embargo, en la sección 18 de esta guía se dan algunas orientaciones generales bajo esta óptica.

6. Funciones— Un proceso MCC que es elaborado conforme a la SAE JA1011 comienza por preguntarse "¿Cuáles son las funciones deseadas y los estándares de desempeño asociados del activo en su contexto operacional presente (funciones)?". Esta sección discute los siguientes cuatro conceptos claves concernientes a las funciones que son listadas en la Sección 5.1 de la SAE JA1011:

a. Contexto Operacional
b. Funciones primarias y secundarias
c. Enunciado de una función
d. Estándares de desempeño

6.1 Contexto Operacional— "Se debe definir el contexto operacional del activo". (SAE JA1011, sección 5.5.1)

Las funciones, los modos de falla, las consecuencias de falla y las políticas de manejo de fallas que serán aplicadas a cualquier activo dependerán no sólo de cual es el activo, sino también de las circunstancias exactas bajo las cuales será utilizado. Como resultado, se necesitan definir claramente estas circunstancias antes de intentar responder la pregunta citada anteriormente.

La definición de un contexto operacional de un activo físico típicamente incluye una descripción global breve de cómo se utilizará este activo, donde se utilizará, y los aspectos que gobiernan los criterios de desempeño global tales como producción, rendimiento, seguridad, integridad ambiental, y así sucesivamente. Los aspectos específicos que se deben documentar en la definición del contexto operacional, incluyen:

a. Proceso fluido versus proceso por lotes: si el activo está operando en un proceso por lotes (o intermitente) o un proceso fluido (o continuo).
b. Estándares de calidad: la calidad global o las expectativas de servicio al consumidor, en términos de aspectos tales como la tasa global de desperdicio, mediciones de satisfacción al cliente (como expectativas de operación a tiempo en sistemas de transporte, o tasa de las demandas de garantía de los artículos manufacturados), o preparación militar.
c. Estándares ambientales: que estándares ambientales organizacionales, regionales, nacionales, e internacionales aplican para el activo (si hay alguno).

d. Estándares de seguridad: si cualquier expectativa de seguridad predeterminada aplica al activo (en términos de lesiones globales o tasa de fatalidad).
e. Lugar de operaciones: características de la localidad en la cual el equipo será operado (ártico versus tropical, desértico versus selvático, costa adentro versus costa afuera, proximidad de las fuentes de suministro de partes y/o labor, etc.).
f. Intensidad de operaciones: en el caso de manufactura y minería, si el proceso del cual forma parte el equipo opera 24 horas por día, siete días a la semana, o a una intensidad menor. En el caso de utilidades, si el equipo opera bajo picos de carga o condiciones de baja carga. En el caso de equipos militares, si las políticas de manejo de fallas están diseñadas para operaciones en tiempos de paz o en tiempos de guerra.
g. Redundancia: si existe alguna capacidad redundante o en stand by, y en ese caso que forma toma.
h. Trabajo-durante-operación: La magnitud a la cual las actividades trabajo-durante-operación (si hay alguna) permite parar el equipo sin afectar la producción o el rendimiento.
i. Repuestos: si se deben tomar algunas decisiones en cuanto al inventario de repuestos claves que puedan afectar la subsiguiente selección de las políticas de manejo de fallas.
j. Demanda del mercado/suministro de materia prima: si las fluctuaciones cíclicas en la demanda del mercado y/o en el suministro de materia prima puedan afectar la subsiguiente selección de las políticas de manejo de fallas. (Tales fluctuaciones pueden ocurrir en el transcurso de un día en el caso de un negocio de transporte urbano, o en el transcurso de los años en el caso de una estación generadora de energía, un parque de diversiones, o una industria de procesamiento de alimentos).

En el caso de sistemas muy grandes y muy complicados, sería sensato estructurar el contexto operacional de modo jerárquico, si es necesario comenzar con la definición de la misión de la organización entera que está usando el activo.

6.2 Lista de Funciones— "Se deben identificar todas las funciones del activo/sistema (todas las funciones primarias y secundarias, incluyendo las funciones de todos los dispositivos de protección)". (SAE JA1011, sección 5.1.2).

El objetivo del proceso MCC es desarrollar una serie de políticas que preserven las funciones del activo o sistema en consideración, a los estándares de desempeño que son aceptables para el dueño/usuario. Como resultado, el proceso MCC comienza por la definición de todas las funciones del activo en su contexto operacional.

Las funciones deben ser divididas en dos categorías: funciones primarias y secundarias.

6.2.1 FUNCIONES PRIMARIAS— La razón por la que cualquier organización adquiere algún activo o sistema es para cumplir con una función o funciones específicas. Estas se conocen como funciones primarias del activo. Por ejemplo, la razón principal por la que alguien adquiere un carro puede ser "transportar cinco personas a 90 Km una hora en un buen camino".

6.2.2 FUNCIONES SECUNDARIAS— Se espera que la mayoría de los activos desarrollen otras funciones, además de las funciones primarias. Estas son conocidas como funciones secundarias. Las funciones secundarias normalmente son menos obvias que las funciones primarias. Pero la pérdida de una función secundaria también puede tener serias consecuencias, en ocasiones más serias que la pérdida de la función primaria. Como resultado, las funciones secundarias necesitan a menudo tanta, sino más, atención que las funciones primarias, por lo tanto deben estar claramente identificadas.

Cuando se identifican las funciones secundarias, se debe velar de no descuidar lo siguiente:

a. Integridad ambiental
b. Integridad de seguridad/estructural

c. Control/contención/confort
d. Apariencia
e. Dispositivos y sistemas protectores
f. Economía/eficiencia
g. Superfluos

Estos aspectos son discutidos con más detalle como sigue.

6.2.2.1 Integridad Ambiental— Estas funciones definen la magnitud de cumplimiento del activo con las normas o regulaciones ambientales corporativas, municipales, regionales, nacionales e internacionales que aplican al activo. Estas normas rigen cosas tales como la descarga de materiales de desecho al ambiente, y el ruido.

6.2.2.2 Seguridad— Algunas veces se hace necesario escribir el enunciado de una función que trata con una amenaza específica a la seguridad, que es inherente al diseño o a la operación del proceso (como opuesto a las amenazas de seguridad que son resultado de una falla funcional). Por ejemplo, la función de un aislante eléctrico de un artefacto doméstico es "prevenir a los usuarios de tocar los componentes energizados".

6.2.2.3 Integridad Estructural— Muchos activos tienen una función secundaria para proveer soporte o una cierta seguridad a otro elemento. Por ejemplo, mientras la función primaria de una pared puede ser proteger a las personas y a los equipos del clima, se puede esperar también que soporte el techo, o el peso de estantes y pinturas.

6.2.2.4 Control— En muchos casos, los usuarios no sólo desean que el activo cumpla las funciones de una norma de desempeño dada, también desean regular su desempeño. Esta expectativa se resume en los enunciados de funciones separados. Por ejemplo, una función de un sistema de enfriamiento puede ser regular la temperatura entre unas temperaturas específicas. La indicación y la retroalimentación forman un subconjunto importante de las categorías de control de las funciones.

6.2.2.5 Contención— Los sistemas en los cuales la función primaria es almacenar materiales deben también contenerlos. Similarmente, los sistemas que transfieren materiales –especialmente fluidos- también tienen una función de contención. Estas funciones también se deben especificar.

6.2.2.6 Confort— Dueños y usuarios generalmente esperan que sus activos o sistemas no causen pena o ansiedad a los operadores o mantenedores. Estos problemas, por supuesto, se deben tratar en la fase de diseño. Sin embargo, el deterioro o las expectativas cambiantes pueden llevar a niveles inaceptables de pena o ansiedad. La mejor manera de cerciorarse de que esto no pase es asegurar que los enunciados de una función asociada estén descritos de manera precisa y que reflejen los estándares actuales.

6.2.2.7 Apariencia— La apariencia frecuentemente constituye una función secundaria importante. Por ejemplo, la razón primordial de pintar la mayoría de los equipos industriales es protegerlos de la corrosión. Sin embargo, se puede seleccionar un color brillante para realzar su visibilidad por cuestiones de seguridad, y esta función también se debe documentar.

6.2.2.8 Protección— Las funciones protectoras evitan, eliminan, o minimizan las consecuencias de la falla de alguna otra función. Estas funciones están asociadas con dispositivos o sistemas que:

a. Advierten a los operadores de condiciones anormales (luces de advertencia o alarmas).
b. Detienen el equipo en caso de una falla funcional (mecanismos de parada).
c. Eliminan o relevan las condiciones anormales causadas por una falla funcional (mecanismos de alivio, sistemas apaga fuegos, preservadores de vida).
d. Realizan una función que haya fallado (componentes estructurales redundantes, plantas de emergencia).

e. Impiden, en primer lugar, el surgimiento de situaciones peligrosas (señales de advertencia, cubiertas protectoras).

Una función protectora asegura que la falla de la función que está siendo protegida sea menos seria de lo que sería sin protección. Los dispositivos asociados son incorporados en el sistema para reducir el riesgo, de modo que sus funciones se deben documentar con un cuidado especial.

6.2.2.9 Economía/eficiencia— En la mayoría de las organizaciones, los costos globales esperados son expresados en la forma de presupuestos de gastos. Sin embargo, para activos específicos, los costos esperados pueden ser tomados en cuenta directamente por los enunciados de las funciones secundarias concernientes, cosas tales como tasas de consumo de energía y tasa de desgaste de materiales de proceso.

6.2.2.10 Funciones Superfluas— Algunos sistemas incorporan elementos o componentes que se establecen para ser completamente superfluos. Esto pasa usualmente cuando el equipo o la manera en la cual es utilizado se ha modificado con el tiempo, o cuando se ha sobre-especificado el nuevo equipo.

Aunque tales elementos no tienen una función positiva y frecuentemente es costoso desincorporarlos, ellos pueden de hecho fallar y reducir la confiabilidad global del sistema. Para evitar esto, algunos pueden requerir mantenimiento y por ende, el consumo de recursos.

Si son desincorporados, los modos de falla asociados y los costos también serán desincorporados. Sin embargo, antes de que se recomiende con confianza su desincorporación, sus funciones deben estar claramente identificadas y entendidas.

6.2.2.11 Funciones "Confiables" — Frecuentemente existe una tendencia a escribir los enunciados de una función "confiable" tal como "para operar 7 días a la semana, 24 horas por día". De hecho, la confiabilidad no es una función en si misma, es un desempeño esperado que comprende todas las otras funciones. Las metas de confiabilidad/disponibilidad globales deben ser documentadas en la definición del contexto. La confiabilidad de un activo específico es de hecho manejada por el trato adecuado de cada uno de los modos de falla que pueden causar cada pérdida de la función.

6.3 Describiendo las Funciones— "Todas los enunciados de una función deben contener un verbo, un objeto, y un estándar de desempeño (cuantificado en cada caso en que se pueda hacer)" (SAE JA1011, sección 5.1.3)

Por ejemplo, la Figura 1 muestra una bomba para bombear agua de un tanque a otro. La capacidad nominal de la bomba es de 1000 litros por minuto, y el agua es succionada del tanque a una velocidad máxima de 800 litros por minuto. La función primaria de esta bomba se debe describir así: "bombear agua del tanque X al tanque Y, a no menos de 800 litros por minuto". Aquí el verbo es "bombear", el objeto es "agua", y el estándar de desempeño es "del tanque X al tanque Y, a no menos de 800 litros por minuto".

Los enunciados de las funciones protectoras necesitan un manejo especial. Estas funciones actúan en excepciones –en otras palabras, cuando algo va mal- entonces el enunciado de la función debe reflejar este hecho. Normalmente esto se hace incorporando las palabras "si" o "en el caso de", seguidas por un breve resumen de las circunstancias o evento que activarían la protección. Por ejemplo, la función de una válvula de alivio de presión debe ser descrita como sigue: "Ser capaz de aliviar la presión en la caldera si excede de 250 psi".

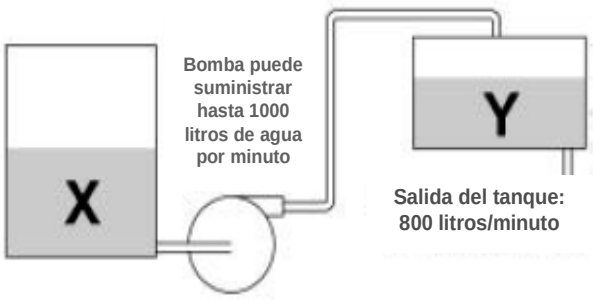

FIGURA 1— FUNCIÓN DE UNA BOMBA

6.4 Estándares de Desempeño— "Los estándares de desempeño incorporados en los enunciados de una función deben tener el nivel de desempeño deseado por el dueño o usuario del activo/sistema en su contexto operacional." (SAE JA1011, sección 5.1.4)

Cualquier sistema organizado expuesto al mundo real se deteriorará –hacia una desorganización total (también conocida como "caos" o "entropía")- a menos que se tomen ciertos pasos para tratar con cualquier proceso que esté causando el deterioro del sistema.

Por ejemplo, las bombas centrifugas son objeto de desgaste del impulsor (impeller). Esto pasa si una bomba desplaza ácido o aceite lubricante, y si el impulsor es de titanio o de acero dúctil. La única pregunta es cuán rápido se deteriorará el impulsor hasta el punto en el cual no pueda bombear fluido al caudal de flujo mínimo requerido.

Una vez que el desempeño de un activo cae por debajo del valor mínimo aceptable para el usuario, el activo ha fallado. Recíprocamente, si el desempeño del activo se mantiene por encima de este valor mínimo, continúa funcionando a un nivel que es satisfactorio para el usuario. En esta guía, "usuarios" incluye dueños de los activos, los usuarios de los activos –comúnmente los operadores- y la sociedad como un todo. Los dueños están satisfechos si sus activos generan un retorno satisfactorio de la inversión realizada para adquirirlos (normalmente el retorno financiero para operaciones comerciales, u otras mediciones para operaciones no-comerciales). Los usuarios están satisfechos si cada activo continua haciendo aquello que ellos desean que haga a un estándar de desempeño que ellos –los usuarios- consideran satisfactorio. Finalmente, la sociedad como un todo está satisfecha si el activo no falla de modo que amenace la seguridad pública o el ambiente.

En esencia, esto significa que si nosotros estamos en la búsqueda de encausar un activo para que continúe funcionando a un nivel que sea satisfactorio para el usuario, entonces el objetivo del mantenimiento es asegurar que el activo continúe operando por encima del nivel mínimo que es aceptable para estos usuarios. Si fuese posible disponer de un activo de modo que pudiese entregar el desempeño mínimo sin ningún deterioro, entonces él mismo podría estar disponible para trabajar continuamente, sin necesidad de mantenimiento.

Sin embargo, el deterioro es inevitable, por lo tanto debe estar permitido. Esto significa que cuando algún activo entra en servicio, debe estar disponible para entregar el estándar de desempeño mínimo deseado por el usuario. Lo que el activo esta disponible a entregar en este punto se conoce como capacidad inicial. La Figura 2 muestra la relación correcta entre esta capacidad y el desempeño deseado.

Esto significa que el desempeño puede ser definido de dos maneras:

a. Desempeño deseado (que desea el usuario que haga el activo).
b. Capacidad inicial (que puede hacer).

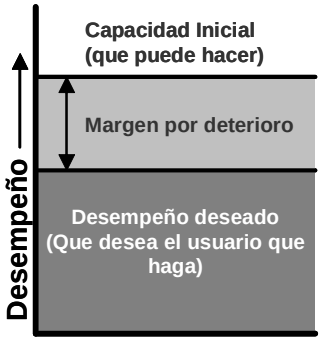

FIGURA 2— PERMITIENDO EL DETERIORO

El margen de deterioro debe ser suficientemente extenso para permitir un tiempo de uso razonable antes de que los componentes se degraden hacia una falla funcional, pero no tan extenso para que el sistema esté sobre diseñado y sea también demasiado costoso. En la práctica, el margen es adecuado en el caso de la mayoría de los componentes, sin embargo, normalmente es posible desarrollar programas de mantenimiento acordes.

Sin embargo, si el desempeño deseado es más alto que la capacidad inicial, ninguna cantidad de mantenimiento podrá entregar el desempeño deseado, en ese caso el activo no es mantenible.

Esto implica que para saber si un activo debe ser mantenido, necesitamos saber ambos tipos de comportamientos: capacidad inicial del activo y el desempeño mínimo que el usuario está dispuesto a aceptar en el contexto en el cual el activo será utilizado. Este desempeño mínimo es el desempeño estándar que debe ser incorporado en los enunciados de la función.

Por ejemplo, la capacidad inicial de la bomba de la Figura 1 es de 1000 litros por minuto, y la tasa a la cual el agua está siendo succionada del tanque (fuera del tanque) es de 800 litros por minuto. En este contexto, la bomba está cumpliendo las expectativas de su usuario con tal que continúe bombeando agua en el tanque más rápido de lo que el agua está siendo succionada. Como resultado, la función primaria de la bomba fue descrita como “bombear agua del tanque X al tanque Y, a no menos de 800 litros por minuto”, y no “bombear a 1000 litros por minuto”.

Nótese que si la misma bomba estuviese siendo usada en una situación en la que la succión del tanque fuera (dijera) 900 litros por minuto, entonces la función primaria debería leerse “bombear agua del tanque X al tanque Y, a no menos de 900 litros por minuto”, y el programa de mantenimiento debe ser cambiado para reflejar esta nueva expectativa operacional.

Nótese que los usuarios y mantenedores frecuentemente tienen puntos de vista significativamente diferentes acerca de lo que constituye un desempeño aceptable. Como resultado, para evitar malos entendidos en lo que constituye una “falla funcional”, los estándares mínimos de desempeño aceptable deben estar claramente definidos y entendidos por los usuarios y los mantenedores del activo, junto con cualquier otra persona que tenga un interés legitimo en el comportamiento del activo.

Los estándares de desempeño se deben cuantificar en los casos en que sea posible, ya que los estándares cuantitativos son más claros y más precisos que los cualitativos. Ocasionalmente sólo se utilizan estándares cualitativos cuando se trata de funciones relativas a la apariencia. En esos casos,

se debe cuidar especialmente de que los estándares cualitativos sean entendidos y aceptados por los usuarios y mantenedores del activo.

7. ***Fallas Funcionales—*** Un proceso MCC que sea conforme a la norma SAE JA1011 responde la pregunta, "¿De qué maneras puede fallar al cumplir sus funciones (fallas funcionales)?". Para responder satisfactoriamente esta pregunta, SAE JA1011 en la sección 5.2 declara que "Se deben definir todos los estados de falla asociados con cada función".

La sección 6 explica que un activo falla si es incapaz de hacer lo que el usuario desea que haga. También explica que el activo debe estar definido como una función, y que cada activo tiene más de una (y frecuentemente varias) funciones diferentes. Como para cada una de estas funciones existe la posibilidad de fallar, cualquier activo puede sufrir una variedad de estados de falla.

Por ejemplo, la función primaria de la bomba en la Figura 1 era "bombear agua del tanque X al tanque Y, a no menos de 800 litros por minuto", mientras que una función secundaria podría ser "contener el agua en la bomba". Es posible que tal bomba sea capaz de bombear la cantidad requerida de agua (no falla en términos de su función primaria) mientras gotea continuamente (falla en términos de su función secundaria). Recíprocamente, es equivalentemente posible que la bomba se deteriore al punto en el cual no pueda bombear el caudal requerido (falla en términos de su función primaria) mientras contiene el líquido requerido (no falla en términos de su función secundaria).

Por esta razón, definir la falla en términos de la pérdida de las funciones específicas es más preciso que definir la falla de un activo como un todo. Los ejemplos anteriores también muestran porque el proceso MCC utiliza el término "falla funcional" para describir estados de falla, en lugar de simplemente "falla". (Nótese que MCC distingue entre una falla funcional o estado de falla, y un "modo de falla" el cual es un evento que causa un estado de falla).

Dos puntos adicionales que se deben considerar cuando se definen las fallas funcionales son: falla parcial y total, y los límites superiores e inferiores.

7.1 Falla Total y Parcial— Las fallas funcionales que representan la falla total de la función son relativamente fáciles de identificar. Por ejemplo, está claro que la bomba mencionada en la sección 6.3, sufrirá una falla funcional si no bombea ninguna cantidad de agua ("falla total"). Sin embargo; la bomba también sufrirá una falla funcional si puede bombear agua a una tasa menor de 800 litros por minuto.

El segundo estado de falla en este ejemplo se conoce como "falla parcial". Las fallas parciales necesitan identificarse separadamente porque ellas son causadas casi siempre por modos de falla diferentes de las fallas totales, y porque las consecuencias casi siempre son también diferentes.

Tenga presente que la falla parcial no es igual que el deterioro por debajo de la capacidad inicial. Todo se deteriora por debajo de la capacidad inicial después de algún tiempo de uso, y tal deterioro puede ser tolerado con tal que no alcance el punto inaceptable para el usuario del activo, como se muestra en la Figura 2. El deterioro sólo se convierte en una falla funcional (parcial o total) cuando el desempeño cae por debajo del nivel mínimo requerido por el usuario.

7.2 Límites Superiores e Inferiores— Los estándares de desempeño asociados con algunas funciones incorporan límites superiores e inferiores. Estos límites implican que el activo ha fallado si opera por encima del límite superior o por debajo del límite inferior. En estos casos, la demarcación del límite superior necesita ser documentada separadamente de la demarcación del límite inferior. Esto es porque los modos de falla y/o consecuencias asociadas cuando se excede el límite superior son generalmente diferentes que los asociados cuando se está por debajo del límite inferior.

Por ejemplo, la función primaria de una máquina pulidora se puede definir como “Pulir cojinetes en un ciclo de tiempo de 3.00 minutos, a un diámetro de 75 mm ± 0.1 mm, con una superficie final no mayor de 0.2 Ra”. Esta máquina ha fallado si:

a. Si se detiene por completo.
b. Rectifica una pieza en un ciclo de tiempo mayor a 3.03 minutos.
c. Rectifica una pieza en un ciclo de tiempo menor a 2.97 minutos.
d. El diámetro excede 75.1 mm.
e. El diámetro es menor de 74.9 mm.
f. La superficie final es muy rugosa (excede 0.2 Ra)

8. ***Modos de falla—*** Un proceso MCC que cumple con la norma SAE JA1011 responde la pregunta, “¿Qué causa cada falla funcional (modos de falla)?” Esta sección discute los cinco conceptos claves siguientes concernientes a los modos de falla que están listados en la Sección 5.3 de SAE JA1011:

a. Identificar los modos de falla.
b. Establecer que se entiende por “probable”.
c. Niveles de causalidad.
d. Fuentes de información.
e. Tipos de modos de falla.

8.1 Identificando los Modos de Falla— “Se deben identificar los modos de falla probables que puedan causar cada falla funcional”. (SAE JA1011, sección 5.3)

La Sección 7 de esta guía menciona que el MCC distingue entre el estado de falla del activo (falla funcional) y los eventos que causan los estados de falla (modos de falla). Debido a que es imposible definir las causas de una falla hasta que se haya establecido exactamente que se entiende por “falla”, el proceso MCC identifica las fallas funcionales antes de definir los modos de falla. En la Figura 3 se muestra la manera usual de documentar esto para la función primaria de la bomba ilustrada en la Figura 1. La Figura 3 que lista las funciones de un activo, las fallas funcionales y los modos de falla, muestra casi todos los elementos de un Análisis de Modo y Efectos de Falla (AMEF). Los “efectos” de cada modo de falla son listados más adelante (ver la Sección 9 de esta guía).

La Figura 3 también muestra que la descripción de un modo de falla debe contener al menos un pronombre y un verbo. La descripción debe ser suficientemente detallada de modo que posibilite la selección de una política de manejo de fallas adecuada, pero no tan detallada que tome demasiado tiempo realizar el proceso de análisis.

En particular, los verbos utilizados para describir los modos de falla se deben seleccionar cuidadosamente, ya que tienen una gran influencia en el proceso de selección de las políticas de manejo de fallas. Por ejemplo, se debe usar muy poco verbos como “fallar” o “averiarse” o “malfuncionamiento”, ya que dan poca o ninguna indicación de cual podría ser la manera apropiada de manejar el modo de falla. El uso de verbos más específicos hace posible seleccionar las opciones de manejo de fallas a partir de un rango completo.

Por ejemplo, en la Figura 3 el modo de falla 1A4 podría llamarse “fallas del acople”. Sin embargo; tal frase no provee pistas de que podría hacerse para anticipar o prevenir el modo de falla. Si nosotros decimos “los pernos del acople están sueltos” o “el cubo del acople presenta cizallas debido a la fatiga”, entonces se torna mucho más fácil identificar una tarea proactiva.

ACTIVO: Sistema de Bombeo

FUNCIÓN		FALLA FUNCIONAL (Pérdida de la Función)		Modo de Falla (Causa de la Falla)	
1	Transferir agua del tanque X al tanque Y, a no menos de 800 litros por minuto.	A	No disponible para transferir ninguna cantidad de agua	1	Cojinete atascado
				2	Motor quemado
				3	Impulsor suelto
				4	Cizallas en el cubo del acople debido a la fatiga
				5	Válvula de entrada atascada en posición cerrada
				6	Impulsor atascado por un objeto extraño…….etc.
		B	Transfiere menos de 800 litros por minuto	1	Impulsor desgastado
				2	Línea de succión parcialmente bloqueada….etc.

FIGURA 3— MODOS DE FALLA DE UNA BOMBA

Para válvulas, interruptores, y dispositivos similares, la descripción del modo de falla debe indicar si la pérdida de la función es causada en la posición abierta o cerrada del elemento que falla. "Atascamiento de la válvula en posición cerrada" dice más que "Atascamiento de la válvula". Además, el propósito de identificar los modos de falla es identificar la causa de la falla funcional de modo que se encuentre la manera de anticiparla o prevenirla. Como resultado, a veces puede ser necesario tomar además otro paso, como por ejemplo "Atascamiento de la válvula en posición cerrada debido al óxido en el paso del tornillo". En este contexto, el uso de la palabra "óxido" sugiere que sería apropiado enfocar los esfuerzos de manejo de fallas en detectar o controlar el óxido.

8.2 Estableciendo Cuál es el Significado de "Probable"— "El método utilizado para decidir que constituye un modo de falla "probable" debe ser aceptado por el dueño o usuario del activo". (SAE JA1011, sección 5.3.2).

La sección 8.1 menciona que se deben identificar todos los modos de falla probables que pueden causar cada falla funcional. "Probabilidad razonable" significa: una probabilidad que encuentra una prueba de racionalidad, cuando es aplicada por personal conocedor y entrenado. (Un término utilizado en lugar de "razonable" en este contexto es el término "creíble".) Si las personas entrenadas para utilizar MCC, y quienes conocen el activo en su contexto operacional, acuerdan que la probabilidad a la que un modo de falla específico puede ocurrir es suficientemente alta para que garantice un análisis extenso entonces, el modo de falla debe ser listado.

En la práctica, algunas veces es muy difícil decidir si un modo de falla debe o no ser listado. Este problema está relacionado al mismo tiempo a la probabilidad de ocurrencia y al nivel de detalle utilizado para describir los modos de falla. Muy pocos modos de falla, y/o poco detalle, conducen a un análisis superficial y algunas veces peligroso. Muchos modos de falla, y/o mucho detalle, causan que el proceso MCC completo tome mucho más tiempo del necesario. En casos extremos, esto puede causar que el proceso tome dos o incluso tres veces más del tiempo necesario (un fenómeno conocido como "parálisis del análisis"), y puede también conducir a programas de mantenimiento excesivamente difíciles.

En situaciones, donde puedan existir dudas o desacuerdos sobre lo que constituye el umbral de "racionalidad", la decisión final debe ser tomada por la organización que posee o usa el activo, ya que dicha organización tendrá la responsabilidad de las consecuencias si ocurre el modo de falla.

Nótese que la decisión de listar un modo de falla debe ser regulada considerando sus consecuencias. Si es probable que las consecuencias sean de hecho muy severas, posiblemente deben listarse los modos de falla y deben estar sujetos a un análisis más extenso.

Por ejemplo, si la bomba descrita en la Figura 3 fuese instalada en una fábrica de alimentos o en una planta ensambladora de vehículos, el modo de falla "carcaza rota por un objeto que cayó del cielo" debe ser omitida inmediatamente por ser ridículamente improbable. Sin embargo; si la misma bomba fuese una bomba de enfriamiento primaria de un reactor nuclear en una planta de energía comercial, este modo de falla se debe tomar más en serio –incluso si pensamos que todavía es altamente improbable. (Las políticas de manejo de fallas apropiadas podrían prohibir que un avión vuele encima de la facilidad, o diseñar un techo que pueda resistir el choque de un avión. Esto por supuesto no es una simple especulación –ambas políticas son consideradas rutinariamente en estaciones de energía nuclear).

8.3 Niveles de Causalidad— "Se deben identificar los modos de falla en un nivel de causalidad que haga posible identificar una política de manejo de fallas apropiada." (SAE JA 1011, sección 5.3.3)

Las secciones previas de esta guía declaran que los modos de falla deben ser descritos con suficiente detalle para hacer posible la selección de una política de manejo de fallas apropiada, pero no en tanto detalle que se invierta demasiado tiempo en el proceso de análisis.

La magnitud a la cual los modos de falla se deben describir en diferentes niveles de detalle se ilustra en la Figura 4, basada en la bomba cuyas funciones y fallas funcionales fueron descritas en la Figura 3. La Figura 4 lista algunos de los modos de falla que podrían causar la falla funcional "no disponible para transferir ninguna cantidad de agua". En este ejemplo, estos modos de falla se consideran en siete niveles de detalle, comenzando con la falla de la bomba dispuesta como un conjunto.

El primer punto que surge de este ejemplo es la conexión entre el nivel de detalle y el número de modos de falla listados. El ejemplo muestra que mientras más profundo sea el Análisis de Modo y Efectos de Falla (AMEF), más grande será el número de modos de falla que pueden ser listados. Por ejemplo, hay tres modos de falla listados para la bomba al nivel 3 en la Figura 4, pero 20 al nivel 6.

Otro punto que surge de la Figura 4 es "causas raíz". Este se discutirá a continuación.

8.3.1 CAUSAS RAÍZ— El término "causa raíz" se utiliza frecuentemente en conexión con el análisis de fallas. Implica que es posible llegar al final y a un nivel de causalidad absoluto, si se profundiza lo suficiente. De hecho, esto no es sólo muy difícil de hacer, sino que también es comúnmente innecesario.

Por ejemplo, en la Figura 4 el modo de falla "tuerca del impulsor suelta" está listado en el nivel 4, que a su vez es causado por "tuerca del impulsor fracturada" en el nivel 5. Si nosotros fuésemos a un nivel más profundo, esto podría haber ocurrido por "apriete excesivo de la tuerca del impulsor" (nivel 6), lo que a su vez puede haber ocurrido por "error de ensamblaje" (nivel 7). El error de ensamblaje puede haber ocurrido porque el "técnico estaba distraído" (nivel 8). El pudo haber estado distraído porque su "niño estaba enfermo" (nivel 9). Este modo de falla puede haber ocurrido porque el "niño comió comida dañada en un restaurante" (nivel 10).

Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Nivel 5	Nivel 6	Nivel 7
Falla el conjunto de la bomba	Falla de la bomba	Falla del impulsor	Tuerca del impulsor suelta	Montaje de la tuerca desecho	Tuerca apretada incorrectamente	Error de ensamblaje
				Montaje de la tuerca desgastado	Tuerca erosionada/corroída	
					Tuerca fabricada con un material erróneo	Especificación errónea del material
						Suministro erróneo del material
				Tuerca del impulsor fracturada	Apriete excesivo de la tuerca del impulsor	Error de ensamblaje
					Tuerca fabricada con un material erróneo	Especificación errónea del material
						Suministro erróneo del material
				Cizallas en la chaveta del impulsor	Especificación errónea del acero de la chaveta	Error de diseño
					Suministro erróneo del acero de la chaveta	Error de procura
						Error de almacenamiento de la tienda
						Error de requisición
			Objeto rompe el impulsor	Parte en el sistema después del mantenimiento	Error de ensamblaje	Ver (error humano)
				Objeto extraño entra al sistema	Filtro de succión no instalado	Error de ensamblaje
					Filtro agujereado por la corrosión	
		Ruptura de la carcaza	Pernos de la carcaza sueltos	Poco apriete de los pernos de la carcaza	Error de ensamblaje	Ver (error humano)
				Pernos sueltos por la vibración		
				Pernos de la carcaza corroídos		
				Falla de los pernos debido a la fatiga		
			Falla de la junta de la carcaza	Juntas ajustadas incorrectamente	Error de ensamblaje	Ver (error humano)
				Falla de las juntas debido al roce		
			Rotura de la carcaza	Carcaza rota por vehículo	Error de operación	Ver (error humano)
				Rotura por objeto desde el cielo	Carcaza golpeada por un meteorito	
					Carcaza golpeada por una parte de avión	
		Falla del sello de la bomba	Rasgadura o desgaste normal	Desgaste del sello		
			Bomba trabaja en seco	Ver “fallas de suministro de agua” debajo		
			Sello desalineado	Error de ensamblaje	Ver (error humano)	
			Caras del sello secas	Error de ensamblaje	Ver (error humano)	
			Sello mal ajustado	Suministro erróneo del sello	Error de procura	Ver (error humano)
					Error de almacenamiento de la tienda	Ver (error humano)
				Especificación errónea del sello	Error de diseño	Ver (error humano)
			Sello instalado dañado	Sello de la bomba se cayó en la tienda	Error de almacenamiento de la tienda	Ver (error humano)
				Sello de la bomba dañado durante el transporte	Error de procura	Ver (error humano)
	Falla del motor	Etc.				
	Falla de la línea de succión	Etc.				
	Válvula cerrada	Etc.				
	Falla de energía	Etc.				

FIGURA 4— MODOS DE FALLA EN DIFERENTES NIVELES DE DETALLE

Claramente, este proceso de profundizar podría seguir casi para siempre –la vía más allá del punto al cual la organización responsable de la operación y el mantenimiento del activo, tiene algún control sobre los modos de falla. Esta es la razón por la que SAE JA1011 requiere de un proceso MCC para identificar los modos de falla a un nivel de causalidad que haga posible identificar una política de manejo de fallas apropiada. Este nivel variará para los diferentes modos de falla. Algunos modos de falla se deben identificar hasta un nivel 3, otros hasta un nivel 5, y el resto a otros niveles.

Nótese que algunos de los modos de falla mostrados en la Figura 4 podrían considerarse no probables en un contexto diferente al utilizado para desarrollar la Figura 4. En este caso, no habría ninguna razón para listarlos en absoluto. Recíprocamente, otros modos de falla que no son mostrados en la Figura 4 pero que se consideren probables en ese otro contexto deben ser agregados a la lista. Nótese también que los modos de falla listados en la Figura 4 sólo aplican a la falla funcional, "no disponible para transferir ninguna cantidad de agua". La Figura 4 no muestra los modos de falla que podrían causar otras fallas funcionales, tales como pérdida de contención o pérdida de protección.

8.4 Fuentes de Información de los Modos de Falla— "Las listas de los modos de falla deben incluir los modos de falla que han ocurrido antes, los modos de falla que están siendo prevenidos actualmente debido a la existencia de programas de mantenimiento, y los modos de falla que no han ocurrido aún pero que se piensan probables (creíbles) en el contexto operacional." (SAE JA1011, 5.3.4).

Los modos de falla que han ocurrido antes en los mismos activos o en activos similares, son los candidatos más obvios para ser incluidos en la lista de los modos de falla, a menos que se haya cambiado algo para que ese modo de falla no ocurra de nuevo. Las fuentes de información de estos modos de falla incluyen personas que conocen bien el activo (operadores, mantenedores, vendedores de equipos, u otros usuarios del mismo equipo), registros de historia técnica (memoria técnica) y bancos de datos.

Los modos de falla para los cuales existen rutinas de mantenimiento proactivas también se deben incorporar en la lista de modos de falla. Una manera de asegurar que ninguno de estos modos de falla haya sido descuidado, es estudiar la existencia del mantenimiento programado para activos idénticos o muy similares y preguntarse, "¿qué podría ocurrir si no se realizara esta tarea?". Sin embargo, la existencia de programaciones no debe ser sólo analizada como una revisión final después que se halla completado el resto del análisis MCC, de modo que se reduzca la posibilidad de perpetuar el status quo.

Finalmente, la lista de modos de falla debe incluir los modos de falla que no hayan ocurrido aún pero que se consideren como posibilidades reales en el contexto en consideración. Una característica esencial del mantenimiento proactivo y de la gerencia del riesgo en particular, es identificar y decidir como tratar con los modos de fallas que aún no han ocurrido. Este es también uno de los aspectos más desafiantes del proceso MCC, porque requiere un alto grado de juicio aplicado por personas experimentadas y conocedoras.

8.5 Tipos de Modos de Falla— "Las listas de los modos de falla deben incluir cualquier evento o proceso que probablemente pueda causar una falla funcional, incluyendo deterioro, defectos de diseño, y errores humanos que pueden ser causados por operadores o mantenedores (a menos que el error humano esté siendo activamente dirigido por un proceso analítico aparte del MCC)." (SAE JA1011, 5.3.5)

El deterioro ocurre cuando la capacidad de un activo está por encima del desempeño deseado para comenzar a operar, pero entonces cae por debajo del desempeño deseado después que el activo entra en servicio. Esto cubre todas las formas de "desgaste o rotura". Tales como fatiga, corrosión, abrasión, erosión, evaporación, degradación (especialmente de aislantes, lubricantes, etc.) y así

sucesivamente. Estos modos de falla deben, por supuesto, ser incluidos en una lista de modos de falla en la que se piensen sean probables, y al nivel de detalle más apropiado como se discutió en 8.3.

En algunos casos, el diseño de un activo o la configuración de un sistema pueden proporcionarlo de modo que sea incapaz de cumplir el rango completo de los requerimientos funcionales en el contexto en el cual se espera que opere. Si tales deficiencias se piensan que afecten el equipo existente, o si en el caso de un equipo nuevo, se piensa que el diseño existente y los procesos de manejo de construcción son improbables para descubrir y rectificar tales deficiencias, deben listarse estos modos de falla para que puedan identificarse las políticas de manejo de fallas apropiadas más adelante en el análisis.

Muchas fallas funcionales son causadas cuando el esfuerzo aplicado a un activo se incrementa por encima de su habilidad para resistir el esfuerzo. En la práctica estos incrementos del esfuerzo son aplicados frecuentemente por seres humanos. La literatura en esta materia clasifica tales errores humanos en una amplia variedad de maneras. Sin embargo; en el mundo de los activos físicos estos errores usualmente entran en las siguientes categorías:

a. Operación incorrecta. Esto usualmente toma dos formas. La primera es sobrecarga sostenida, frecuentemente deliberada (por ejemplo, si una máquina es operada a niveles de desempeño que alcancen o excedan su capacidad inicial, tal como un motor de automóvil que es operado persistentemente a unas RPM excesivas, causando su falla prematura). La segunda es sobrecarga repentina, usualmente no intencional, (por ejemplo, si un activo es simplemente operado incorrectamente, tal como un vehículo que es puesto en retroceso mientras se está moviendo hacia delante, dañando la caja).
b. Ensamblaje incorrecto (por ejemplo, si un mecánico deja una herramienta en una caja de engranajes o un electricista cablea un interruptor incorrectamente).
c. Daño externo (por ejemplo, si la carcaza de una bomba es golpeada por un camión montacargas)

Si tales incrementos en el esfuerzo aplicado se piensan probables en el contexto en consideración (y si ellos no se han tratado por un proceso analítico separado), también se deben incorporar en la lista de los modos de falla, de modo que se puedan identificar las políticas de manejo de fallas adecuadas.

9. ***Efectos de Falla—*** Un proceso MCC que esté conforme a la norma SAE JA1011 debe preguntarse "¿Qué pasa cuando ocurre cada falla funcional (efectos de falla)?" Esta sección discute los dos conceptos claves siguientes concernientes a los efectos de falla que son listados en la sección 5.4 de SAE JA1011:

a. Suposiciones básicas.
b. Información necesaria.

9.1 Suposiciones Básicas— "Los efectos de falla deben describir lo que puede pasar si no se realiza ninguna tarea especifica para anticipar, prevenir o detectar la falla." (SAE JA1011, sección 5.4.1)

Una definición de efecto de falla describe lo que puede pasar si ocurre el modo de falla. Nótese que el MCC hace una distinción clara entre un efecto de falla (que pasa) y una consecuencia de falla (como, y cuanto, afecta el modo de falla).

Como se explica en la Sección 10 de esta Guía, las definiciones de los efectos de falla son utilizadas para evaluar las consecuencias de cada modo de falla. Estas también proveen la información básica necesaria para decidir que políticas de manejo de fallas se deben implementar para evitar, eliminar o minimizar estas consecuencias para la satisfacción de los dueños/usuarios del activo.

Las principales opciones de las políticas de manejo de fallas incluyen tareas de mantenimiento proactivas (de monitoreo de condición, programadas, restauración, y desincorporación programada), junto con las frecuencias respectivas. Si nosotros deseamos identificar estas tareas correctamente, es esencial asumir que no se está llevando a cabo ningún mantenimiento proactivo cuando se están identificando los modos de falla y los efectos asociados. En otras palabras, para comenzar desde una verdadera base cero, es esencial asumir que el modo de falla causa de hecho, la falla funcional asociada. Se necesitan describir los modos de falla, y escribir las definiciones de los efectos de fallas, respectivamente.

9.2 Información Necesaria— "Los efectos de falla deben incluir toda la información necesaria para sustentar la evaluación de las consecuencias de la falla, tales como:

a. ¿Qué evidencia (si existe alguna) que la falla ha ocurrido (en el caso de funciones ocultas, que podría pasar si ocurre una falla múltiple)?
b. ¿Qué hace (si ocurre algo) para matar o dañar a alguien, o para tener efectos adversos en el ambiente?
c. ¿Qué hace (si ocurre algo) para tener un efecto adverso en la producción o en las operaciones?
d. ¿Qué daño físico (si existe alguno) causa la falla?
e. ¿Qué (si existe algo) se debe hacer para restaurar la función del sistema después de la falla?" (SAE JA1011, sección 5.4.2)

9.2.1 EVIDENCIA DE QUE HA OCURRIDO LA FALLA— Una definición de efecto de falla debe describir si hay alguna evidencia de que el modo de falla en consideración ha ocurrido. Si es así, la misma debe describir que forma toma esta evidencia. Por ejemplo, debe mencionar si el comportamiento del equipo cambia notablemente como resultado del modo de falla (luces de alarma, cambio en los niveles de ruido y velocidad, etc.). También debe describir si el modo de falla está acompañado (o precedido) por efectos físicos obvios, tales como, ruidos altos, fuego, humo, escapes de vapor, olores inusuales, o charcos de líquido en el piso.

Cuando se trata de protección, las descripciones de los efectos de falla deben definir brevemente lo que puede pasar si la función protectora falla mientras la protección está en estado de falla.

9.2.2 AMENAZAS A LA SEGURIDAD Y AL AMBIENTE— Si hay una posibilidad que alguien pueda ser herido o muerto como resultado directo del modo de falla, o se viola una norma o regulación ambiental, el efecto de falla debe describir como podría pasar esto. Una lista seleccionada de ejemplos incluye:

a. Incremento del riesgo de fuego o explosión.
b. El escape de químicos peligrosos.
c. Electrocución.
d. Accidentes vehiculares, descarrilamientos.
e. Ingreso de suciedad en productos alimenticios o farmacéuticos.
f. Exposición a bordes afilados o maquinaria en movimiento.

Cuando se listan estos efectos, se debe tener cuidado de no decir que el modo de falla "tiene consecuencias de seguridad" o "afecta el ambiente". Simplemente define que pasa, y deja la evaluación de las consecuencias para el próximo paso del proceso MCC.

9.2.3 EFECTO EN LA PRODUCCIÓN O EN LAS OPERACIONES — Las descripciones de los efectos de falla deberían indicar como se afecta la producción o las operaciones (si son afectadas), y por cuanto tiempo. Se deben considerar los siguientes puntos:

a. Tiempo fuera de servicio: cuanto tiempo el activo podría estar fuera de servicio debido a ese modo de falla, desde el momento que falla hasta el momento que entra de nuevo

completamente en operación. Para asegurar que el programa de manejo de fallas es razonablemente conservador (pero no demasiado conservador), se debe asumir que el modo de falla ocurre en una situación del "peor caso típico", por ejemplo, tarde en la noche en una fábrica, o si un equipo móvil está en una localidad más remota de lo usual.

b. Velocidad de operación: Si el equipo ha bajado su velocidad como resultado del modo de falla, y si es así, que tanto la ha bajado.
c. Calidad: Si el modo de falla afecta la calidad para la cual está configurada la función, tales como la guía de precisión o los sistemas de control, los parámetros de calidad del producto, e inclusive los asuntos de servicio al consumidor (operación a tiempo, etc.). La definición del efecto de falla debe indicar también si el modo de falla incrementa los desechos o los trozos de desperdicios, causa un aborto de la misión, o incurre en penalidades financieras contractuales significativas.
d. Otros sistemas: Si otro equipo o proceso se ha detenido, bajado su velocidad, o está afectado de cualquier otra manera por el modo de falla.
e. Costos de operación globales: Si el modo de falla causa cualquier otro incremento en los costos operacionales, tales como incremento del consumo de energía o desgaste excesivo de los materiales del proceso.

9.2.4 DAÑO SECUNDARIO— Si el modo de falla en consideración causa daños significativos a otros componentes o sistemas, los efectos de este daño secundario también se deben registrar.

9.2.5 ACCIÓN CORRECTIVA REQUERIDA— La descripción de los efectos de falla debe incluir una breve descripción de la acción que se requiere para corregir el modo de falla después que este ha ocurrido.

10. *Categorías de Consecuencia de Fallas*

10.1 Categorías de Consecuencias— "Las consecuencias de cada modo de falla deben ser formalmente categorizadas…." (SAE JA1011, sección 5.5.1)

Después que se ha identificado cada modo de falla y sus efectos a un nivel de detalle apropiado, el siguiente paso en el proceso MCC es evaluar las consecuencias de cada modo de falla. La fuente primordial de información utilizada para evaluar las consecuencias de falla es la descripción de los efectos de falla.

Algunos modos de falla afectan el rendimiento, la calidad del producto o el servicio al consumidor. Otros amenazan la seguridad o el ambiente. Algunos incrementan los costos operacionales, por ejemplo, el incremento del consumo de energía, mientras otros pocos impactan hasta cuatro, cinco o incluso todas estas seis áreas. Aún así, otros pueden aparecer y no tener efecto alguno si ocurren aislados, pero pueden exponer a la organización al riesgo de modos de falla mucho más serios.

Si cualquiera de estos modos de falla no se previenen o se anticipan, el tiempo y esfuerzo que se necesitará invertir para corregirlos también afecta la organización, ya que su reparación consume recursos que sería mejor utilizados en otra parte.

La naturaleza y la severidad de estos efectos rigen la manera como cada modo de falla es visto por la organización. El impacto preciso en cada caso –en otras palabras, la magnitud en que cada modo de falla afecta- depende del contexto operacional del activo, los estándares de desempeño que aplican a cada función, y los efectos físicos de cada modo de falla.

Esta combinación de contexto, estándares y efectos implica que todo modo de falla tiene un conjunto específico de consecuencias asociadas a él. Si las consecuencias son muy serias, entonces se deberán hacer esfuerzos considerables para prevenir el modo de falla, o al menos para anticiparlo en el tiempo con la finalidad de reducir o eliminar las consecuencias. Por otro lado, si el modo de falla

sólo tiene consecuencias menores, es posible que no se tome ninguna acción proactiva y el modo de falla simplemente se corregirá cada vez que ocurra.

Esto implica que las consecuencias de los modos de falla son más importantes que sus características técnicas. Esto también sugiere que la idea entera de manejo de falla no está muy cercana de anticipar o prevenir los modos de falla per se, más bien es cercana a evitar y reducir sus consecuencias.

El resto de esta sección considera el criterio utilizado para evaluar las consecuencias de los modos de falla, y el criterio para decidir si cualquier forma de manejo de falla vale la pena. Estas consecuencias están divididas en cuatro categorías en dos fases. La primera fase separa fallas ocultas de fallas evidentes.

10.1.1 FALLAS EVIDENTES Y OCULTAS— "El proceso de categorización de consecuencias debe separar los modos de falla ocultos de los modos de falla evidentes." (SAE JA1011, sección 5.5.1.1)

Algunos modos de falla ocurren de tal modo que nadie esta al tanto que el elemento se encuentra en estado de falla a menos, o hasta que ocurra también alguna otra falla (o evento anormal). Una falla oculta es un modo de falla cuyos efectos no son apreciables para el equipo de operadores en circunstancias normales si el modo de falla ocurre aislado. Recíprocamente, una falla evidente es un modo de falla cuyos efectos son apreciables para el equipo de operadores en circunstancias normales si el modo de falla ocurre aislado.

El MCC se aproxima a la evaluación de las consecuencias de fallas comenzando por la separación de las fallas ocultas de las fallas evidentes. Las fallas ocultas se pueden considerar para la mitad de los modos de falla que pueden afectar equipos modernos, los equipos complejos necesitan ser manejados con un cuidado especial. Los párrafos siguientes explican la relación entre fallas ocultas y protección e introducen el concepto de "falla múltiple".

Fallas Ocultas y Protección: la sección 6.2.2.8 de esta guía menciona que la función de cualquier protección es asegurar que las consecuencias de la falla de la función protegida sean mucho menos serias de lo que hubiesen sido si no tuviese protección. Así, cualquier función protectora es, de hecho parte de un sistema con al menos dos componentes:

a. La función protectora.
b. La función protegida.

La existencia de tales sistemas crea dos conjuntos de posibilidades de falla, dependiendo si la falla de la protección es evidente o no. Las implicaciones de cada conjunto son consideradas en los párrafos siguientes, empezando con dispositivos cuya falla es evidente.

10.1.1.1 Fallas evidentes de las Funciones Protectoras— En este contexto, una falla "evidente" de una función protectora es aquella mediante la cual los efectos del modo de falla aislado se vuelve apreciable para el equipo de operadores en circunstancias normales. La existencia de tales modos de falla crea tres escenarios posibles en cualquier período, como sigue.

La primera posibilidad es que ni la función protectora ni la función protegida fallen. En ese caso todo procede normalmente.

La segunda posibilidad es que la función protegida falle antes de la protección. Es ese caso la protección llevará a cabo su función, y dependiendo de la naturaleza de la protección, las consecuencias de falla de la función protegida son reducidas o eliminadas.

La tercera posibilidad es que la función protectora falle antes de la función protegida. Debido a que esta falla es "evidente", la pérdida de la protección se debe convertir en aparente. En esta

situación, la posibilidad de que la función protegida falle mientras la función protectora está en estado de falla, debe ser casi eliminada, bien sea por el paro de la función protegida o por proveer una protección alternativa hasta que se restaure la función protectora que falló, como se ilustra en la Figura 5. Esto implica a su vez, que las consecuencias de una falla evidente de una función protectora normalmente entra en las categorías "operacional" o "no operacional", como se discutirá en la sección 10.1.2

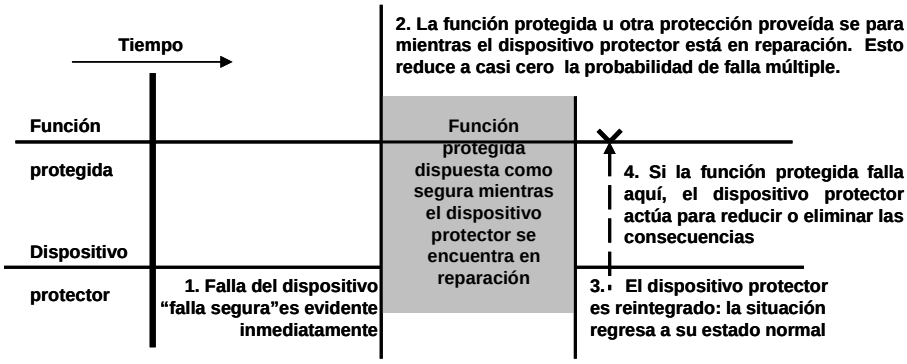

FIGURA 5— FALLA EVIDENTE DE UNA FUNCIÓN PROTECTORA

10.1.1.2 Funciones Protectoras cuya Falla no es Evidente— Las fallas ocultas se pueden identificar al hacerse la siguiente pregunta:

¿Algunos de los efectos de este modo se falla se harán evidentes para el equipo de operadores en circunstancias normales si el modo de falla ocurre aislado?

Si la respuesta a esta pregunta es no, el modo de falla es oculto. Si la respuesta es si, es evidente. Nótese que en este contexto, "aislado" significa que nada más ha fallado. Nótese también que en este punto del análisis se asume que no se está haciendo ningún esfuerzo para revisar si la función asociada está trabajando todavía. Esto es porque tales revisiones son una manera de mantenimiento programado, y el propósito total del análisis es hallar si tal mantenimiento es necesario.

Si ocurre tal modo de falla, el hecho de que la protección no esté disponible para cumplir su función, no se hace aparente en circunstancias normales. La existencia de tales modos de falla crea cuatro escenarios posibles en cualquier período, dos de los cuales también se aplican a las fallas evidentes de las funciones protectoras. El primero es en el que ninguna función falla, en cuyo caso todo procede normalmente como antes.

La segunda posibilidad es que la función protegida falla cuando la protección está funcionando. En este caso la protección también lleva a cabo la función premeditada, entonces las consecuencias de las fallas de la función protegida son de nuevo reducidas o eliminadas del todo.

La tercera posibilidad es que falle la protección mientras la función protegida está operando. En este caso, la pérdida de la protección no tiene consecuencias directas. De hecho, nadie sabe que la protección está en estado de falla.

La cuarta posibilidad durante cualquier ciclo es que falle la protección, entonces la función protegida falla mientras la protección está en estado de falla. Está situación se conoce como falla múltiple. (Esta es una posibilidad real simplemente porque la falla de la protección no es evidente, entonces

nadie podría estar consciente de la necesidad de tomar una acción correctiva –o alternativa- para evitar la falla múltiple.)

La secuencia de eventos que predomina en una falla múltiple se resume en la Figura 6.

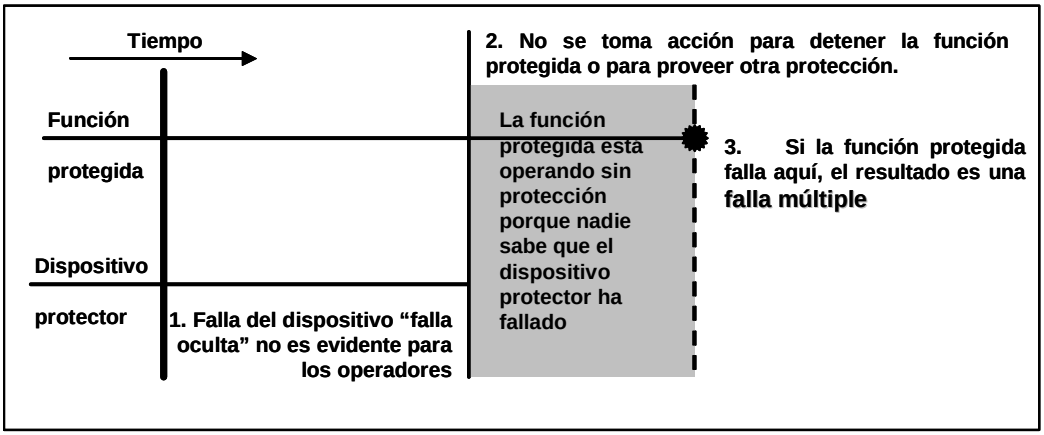

FIGURA 6— FALLA OCULTA DE UNA FUNCIÓN PROTECTORA

10.1.2 CONSECUENCIAS EN LA SEGURIDAD, EL AMBIENTE, OPERACIONALES Y NO OPERACIONALES— "El proceso de categorización de consecuencias debe distinguir claramente los eventos (modos de falla y fallas múltiples) que tengan consecuencias en la seguridad y/o en el ambiente de los que sólo tengan consecuencias económicas (consecuencias operacionales y no operacionales)." (SAE JA1011, sección 5.5.1.2)

Nota— A lo largo de esta sección, "falla" se refiere a un modo de falla o a una falla múltiple.

10.1.2.1 Consecuencias en la Seguridad— Una falla tiene consecuencias en la seguridad si existe una probabilidad intolerable de que pueda matar o dañar a un ser humano. La distinción entre una probabilidad "tolerable" e "intolerable" se discute con más detalle en la sección 12.1.3 de esta Guía.

10.1.2.2 Consecuencias Ambientales— A otro nivel, "seguridad" se refiere a la seguridad o el bienestar de la sociedad en general. Tales fallas tienden a ser clasificadas como aspectos "ambientales". Las expectativas de la sociedad adquieren la forma de normas ambientales municipales, regionales y nacionales. Algunas organizaciones también tienen sus propias normas corporativas, incluso más estrictas. Como resultado, una falla tiene consecuencias ambientales si existe una probabilidad intolerable de que puede violar cualquier norma o regulación ambiental conocida.

10.1.2.3 Consecuencias Operacionales— La función primaria de la mayoría de los equipos en el comercio y en la industria está usualmente conectada con la necesidad de obtener ingresos o para soportar actividades de ganancia de réditos. Las fallas que afectan las funciones primarias de estos activos afectan la capacidad de ingreso de réditos de la organización. La magnitud de estos efectos depende de que tanto se utilice el equipo y de la disponibilidad de las alternativas. Sin embargo; en casi todos los casos, los costos de estos efectos son mayores –frecuentemente mucho mayores- que el costo de reparar las fallas, y estos costos necesitan ser tomados en cuenta cuando se evalúa la relación costo-efectividad de cualquier política de manejo de fallas. En general, las fallas afectan las operaciones de cuatro maneras:

a. Afectan el rendimiento o la producción total.
b. Afectan la calidad del producto.

c. Afectan el servicio al consumidor (y pueden incurrir en penalidades financieras).
d. Incrementan los costos operacionales en adición a los costos directos de reparación.

En empresas sin fines de lucro como compañías militares, muchas fallas también afectan la disponibilidad de la organización para cumplir su función primaria, algunas veces con resultados devastadores. Mientras se hace difícil costear los resultados de la pérdida de una batalla o incluso una guerra, las fallas que pueden afectar la capacidad operacional aún tienen implicaciones económicas. Si esto ocurre muy frecuentemente, podría ser necesario desplegar (decir) 60 tanques de batalla en lugar de 50, o seis portaviones en lugar de cinco. La redundancia a esta escala podría ser muy costosa.

Por esta razón, si una falla evidente no constituye una amenaza a la seguridad o al ambiente, el proceso MCC se enfoca luego en las consecuencias operacionales de la falla.

Debido a que estas consecuencias tienden a ser económicas por naturaleza, comúnmente son evaluadas en términos económicos. Sin embargo; en casos más extremos (como la pérdida de una guerra), el "costo" puede haber sido evaluado sobre una base cualitativa. En la práctica, el efecto económico global de cualquier falla tiene consecuencias operacionales dependiendo de dos factores:

a. Cuanto cuesta la falla cada vez que ocurre, en términos de su efecto en la capacidad operacional más los costos de reparación de la falla (si hay algún daño secundario).
b. Qué tan frecuentemente ocurre esto.

10.1.2.4 Consecuencias No Operacionales— Las consecuencias de una falla evidente que no tienen efectos adversos directos en la seguridad, el ambiente o la capacidad operacional, son clasificadas como no operacionales. Las únicas consecuencias asociadas con estas fallas son los costos directos de reparación de las mismas y de cualquier daño secundario, entonces estas consecuencias son también económicas.

10.1.3 MCC Y LAS REGULACIONES/LEGISLACIONES DE SEGURIDAD— Una pregunta que surge frecuentemente concierne a la relación entre MCC y las tareas especificadas por las autoridades reguladoras (la legislación ambiental trata con ellas directamente).

La mayoría de las regulaciones que rigen la seguridad demandan simplemente que los usuarios sean capaces de demostrar que están haciendo cualquier cosa prudente para cerciorarse que sus activos sean seguros. Esto ha llevado rápidamente a un énfasis creciente del concepto de auditoría, la cual requiere básicamente que los usuarios de los activos tengan la capacidad de producir evidencia documental de que existe una base defendible, racional para sus programas de mantenimiento. En la vasta mayoría de los casos, MCC satisface totalmente este tipo de requerimiento.

Sin embargo; algunas regulaciones demandan que ciertas tareas específicas se deben hacer en ciertos tipos de equipos específicos a intervalos específicos. Muy a menudo el proceso MCC sugiere una tarea diferente y/o un intervalo diferente, y en la mayoría de los casos, la tarea derivada del MCC es una política de manejo de fallas superior. Sin embargo; en tales casos, es sabio continuar haciendo la tarea especificada por las regulaciones y discutir el cambio sugerido con las autoridades reguladoras correspondientes.

10.2 Evaluando las Consecuencias de Falla— "La valoración de las consecuencias de falla se debe realizar como si ninguna tarea específica se esté llevando a cabo actualmente para anticipar, prevenir o detectar la falla." (SAE JA1011, sección 5.5.2)

Por las razones explicadas en la sección 9.1 de esta guía, es esencial asumir que ningún mantenimiento proactivo se está llevando a cabo cuando se están identificando las consecuencias de falla.

11. ***Selección de las Políticas de Manejo de Fallas***

11.1 La Relación entre Longevidad y Falla— "El proceso de selección de manejo de fallas debe tomar en cuenta el hecho de que la probabilidad condicional de algunos modos de falla se incrementará con el tiempo (o con la exposición al esfuerzo), que la probabilidad condicional de otros no cambiará con el tiempo y que la probabilidad condicional de otros tampoco decrecerá con el tiempo." (SAE JA1011,sección 5.6.1)

Uno de los factores más importantes que afecta la selección de cualquier política de manejo de fallas es la relación entre la longevidad (o exposición al esfuerzo) y la falla. Existen seis conjuntos de maneras en las cuales la probabilidad condicional de falla varía a medida que un elemento envejece, como se muestra en la Figura 7.

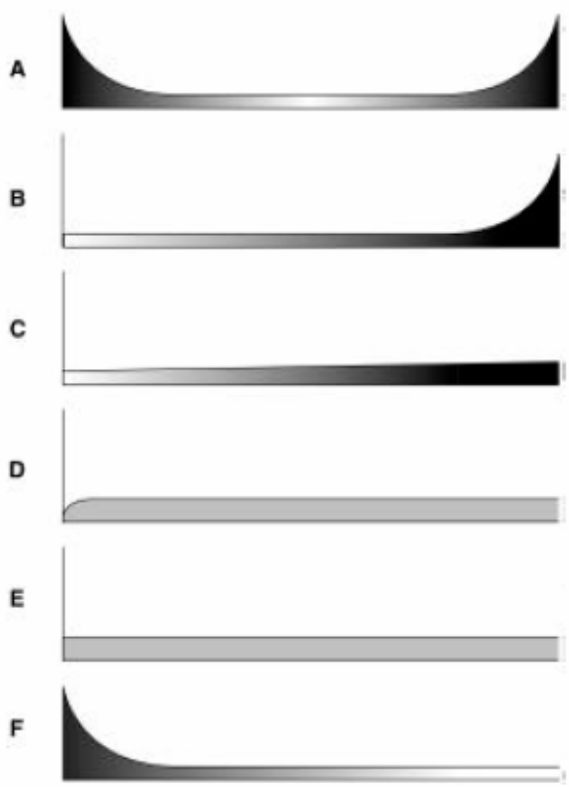

FIGURA 7— SEIS PATRONES DE FALLA

Los patrones A y B despliegan el punto al cual hay un incremento veloz de la probabilidad condicional de falla (a veces llamada "zona de desgaste"). El patrón C muestra un incremento sostenido en la probabilidad de falla, pero no distingue la zona de desgaste. El patrón D muestra una probabilidad condicional de falla baja cuando el elemento es nuevo o recién comprado, entonces ocurre un incremento rápido hacia un nivel que crece lento o constante, mientras que el patrón E muestra una probabilidad condicional de falla constante para toda la longevidad (falla aleatoria). El patrón F empieza con alta mortalidad infantil, cayendo a un decrecimiento constante o muy bajo de la probabilidad condicional de falla.

En general, los patrones de falla relacionados a la longevidad aplican a elementos que son muy simples, o elementos muy complejos que sufren un modo de falla dominante. En la práctica, están comúnmente asociados con el desgaste directo (más frecuente en donde los equipos entran en contacto directo con el producto), fatiga, corrosión, oxidación y evaporación.

11.2 Técnicamente Factible y Vale la Pena Hacerlo— "Todas las tareas programadas deben ser técnicamente factibles y deben valer la pena hacerlas (aplicables y efectivas)….." (JA1011, sección 5.6.2)

Cualquier tarea programada vale la pena hacerla sólo si reduce (evita, elimina o minimiza) las consecuencias del modo de falla a una magnitud que justifique los costos directos o indirectos de realizar la tarea. (Nótese que en este contexto los dispositivos de monitoreo incorporados constituyen una "tarea programada", ya que una se está ejecutando automáticamente -continuamente o a intervalos predeterminados- por el dispositivo de monitoreo. Por consiguiente están sujetas al mismo criterio de selección que cualquier otro tipo de tareas programadas. Note también que tales dispositivos por si mismos requieren diseño, instalación y mantenimiento, lo cual también se debe considerar cuando se evalúa su costo-efectividad).

Si no se puede hallar una tarea programada apropiada, y si las consecuencias del modo de falla no son aceptables por el dueño o usuario del activo, entonces se debe encontrar alguna otra manera de manejar las consecuencias de falla.

Por supuesto, esto también tiene que ser técnicamente posible para cualquier política de manejo de fallas que influencie las consecuencias de falla. El hecho de que tal política sea o no técnicamente factible (o aplicable) depende de las características técnicas de la política y del modo de falla en consideración. El criterio que rige la factibilidad técnica se discute más detalladamente en las Secciones de la 12 a la 14 de esta guía.

11.3 Efectividad de Costo— "Si dos o más políticas de manejo de fallas propuestas son técnicamente factibles y valen la pena hacerlas (aplicables y efectivas), se debe seleccionar la política que sea más costo-efectiva." (SAE JA1011, sección 5.6.3)

Dado el número de opciones de políticas de manejo de fallas (especialmente el mantenimiento predictivo o las técnicas de monitoreo de condición) que están disponibles actualmente, normalmente es tentador seleccionar una política basada solamente en la sofisticación técnica antes que en la base de costo-efectividad. Cuando más de una opción de política de manejo de fallas es apropiada técnicamente, para aplicar MCC correctamente, el trabajo siempre está en seleccionar la política que maneje satisfactoriamente las consecuencias del modo de falla en la forma más económica, antes que aquella que sea más sofisticada técnicamente.

11.4 Selección de las Políticas de Manejo de Fallas— "La selección de las políticas de manejo de fallas debe ser llevada a cabo como si ninguna tarea específica estuviese siendo realizada actualmente para anticipar, prevenir o detectar la falla." (SAE JA1011, sección 5.6.4)

De nuevo, por las razones explicadas en la sección 9.1 de esta guía, es esencial asumir que ningún mantenimiento proactivo se está llevando a cabo cuando se seleccionan las políticas de manejo de fallas.

12. *Manejo de las Consecuencias de Falla*

12.1 Modos de Falla Evidente con Consecuencias en el Ambiente o en la Seguridad— "En el caso de que un modo de falla evidente tenga consecuencias en la seguridad o en el ambiente, la tarea debe

reducir la probabilidad del modo de falla a un nivel que sea tolerable para el dueño o usuario del activo." (SAE JA1011, sección 5.7.1.1)

A la mayoría de las personas les gustaría vivir en un ambiente en el cual no exista ninguna probabilidad de muerte o daño físico, hay, de hecho, un elemento de riesgo en todas las cosas que hacemos. En otras palabras, el "cero" es inalcanzable. Entonces ¿qué es alcanzable?

Para responder a esta pregunta, la pregunta del riesgo debe ser considerada con más detalle.

La evaluación del riesgo consiste en tres elementos. La primera pregunta es que podría pasar si el evento en consideración ocurre. La segunda pregunta es que probabilidad existe de que el evento ocurra del todo. La combinación de estos dos elementos provee una medida del grado de riesgo. La tercera pregunta –y frecuentemente el elemento más contencioso- es si el riesgo es tolerable.

Por ejemplo, considere un modo de falla que pueda resultar en la muerte o el daño físico de 10 personas (¿qué puede pasar?). La probabilidad de que ocurra este modo de falla es de 1 en 1.000 en un año cualquiera (¿cuán probable es que ocurra?). Basados en estas cifras, el riesgo asociado con este modo de falla es:

10 x (1 en 1.000) = 1 accidente cada 100 años

Ahora considere un segundo modo de falla que puede causar 1.000 accidentes, pero la probabilidad de que ocurra este modo de falla es 1 en 100.000 en un año. El riesgo asociado con este modo de falla es:

1.000 x (1 en 100.000) = 1 accidente cada 100 años

En estos ejemplo, el riesgo es el mismo a pesar de que las cifras en las que se basan son muy diferentes. Nótese también que estos ejemplos no indican si el riesgo es tolerable –ellos sólo lo cuantifican. Si el riesgo es tolerable o no, es otra pregunta que se trata más adelante.

(Los términos "probabilidad" (1 en 10 oportunidades de un modo de falla en un año) y "tasa de falla" (una vez en 10 períodos en promedio, correspondiente a Tiempo Promedio Entre Fallas de 10 períodos) se utilizan frecuentemente si son intercambiables cuando aplican a fallas aleatorias. Estrictamente hablando, esto no es verdad. Sin embargo; si el TPEF es mayor de 4 períodos, la diferencia es tan pequeña que casi puede ignorarse).

Los párrafos siguientes consideran cada uno de estos tres elementos de riesgo en más detalle.

12.1.1 ¿QUÉ PUEDE PASAR SI OCURRE EL MODO DE FALLA?— Lo que suceda exactamente siempre y cuando ocurra cada modo de falla, se debe registrar como parte de la lista de los efectos de falla. En otras palabras, la definición del efecto de falla debe registrar si cualquier ocurrencia del modo de falla (se dice) tiene una de 10 posibilidades de matar a una persona o si es probable que mueran hasta 10 personas o si es posible que cause la pérdida de un miembro de un operador. Con la finalidad de ser razonablemente conservador, note que las definiciones del efecto de falla deben reflejar el "escenario del peor caso típico" (pero no el caso más extremo, ya que esto podría ser excesivamente conservador). Si surge la duda, las personas que desarrollan el análisis deben preguntarse, si ocurre el peor de los peores casos, que punto de vista probable finalmente será defendible ante cualquier autoridad y sus superiores responsables.

12.1.2 ¿CUÁL ES LA PROBABILIDAD DE QUE OCURRA EL MODO DE FALLA?— La Sección 8.1 de esta guía menciona que sólo los modos de falla que son probables de ocurrir en el contexto en cuestión deben ser registrados en el AMEF. Como resultado, si el AMEF se ha preparado sobre una base real, el mismo hecho de que un modo de falla haya sido listado sugiere que existe una probabilidad

finita de que ocurra. Idealmente esta probabilidad debe ser cuantificada como parte de la definición del efecto de falla o en una base de datos separada, de modo que el riesgo también pueda ser cuantificado. (Note que, en la práctica, los datos de falla histórica precisos no están disponibles en la mayoría de los casos, especialmente en los de equipos nuevos que incorporan cantidades sustanciales de nueva tecnología. En estos casos, la evaluación debe estar basada en estimaciones inteligentes por personas que entiendan claramente el equipo y el contexto en el cual están siendo utilizados).

12.1.3 ¿ES TOLERABLE EL RIESGO?— Como se mencionó anteriormente, el riesgo se mide por la probabilidad multiplicado por la severidad. Esto se expresa usualmente sobre una base anual (aunque puede ser expresado en términos de eventos por un número de ciclos u horas operacionales dadas o cualquier otro que tenga sentido en el contexto en cuestión). Decidir que es tolerable, es completamente otra materia.

Las creencias acerca del nivel tolerable de riesgo de matar o dañar físicamente varia ampliamente de individuo a individuo o de grupo a grupo. Muchos factores influencian estas creencias. Los dos factores más dominantes son el grado de control que cualquier individuo piensa tiene sobre la situación y el beneficio que las personas creen que los mismos derivaran al exponerse al riesgo. Esto a su vez influencia hasta que punto ellos podrían escoger exponerse al riesgo. Esta perspectiva tiene que ser llevada a un grado de riesgo que pueda ser tolerado por la población entera (todos los trabajadores en el sitio, todo los ciudadanos de un pueblo o incluso, la población entera de un país).

En otras palabras, si yo tolero una probabilidad de 1 en 100.000 (10^{-5}) de ser muerto en el trabajo en un año y tengo 1.000 compañeros de trabajo quienes comparten la misma perspectiva, entonces nosotros aceptaremos que un promedio de una persona en nuestro sitio morirá en el trabajo cada 100 años –y esa persona puedo ser yo, y puede pasar este año.

Tenga presente que cualquier cuantificación del riesgo de esta manera, puede ser solamente una aproximación brusca. En otras palabras, una probabilidad tolerable de 10^{-5} nunca es más que una aproximación. Con esto en mente, el próximo paso es llevar la probabilidad de que un individuo y sus compañeros de trabajo estén preparados para tolerar que uno de ellos pueda ser muerto por algún evento en el trabajo, a una probabilidad tolerable para cada evento simple (modo de falla o falla múltiple) que pueda matar a alguien.

Por ejemplo, continuando con la lógica del ejemplo previo, la probabilidad de que cualquiera de mis 1.000 compañeros de trabajo sean muertos en un año es de 1 en 100 (asumiendo que cualquiera en el sitio está expuesto a las mismas amenazas). Si las actividades llevadas a cabo en el sitio incluyen (se dice) 10.000 eventos que pueden matar a alguien, entonces la probabilidad promedio de que cada evento pueda matar a una persona debe ser reducida a 10^{-6} en un año. Esto significa que la probabilidad de un evento que es probable mate a 10 personas se debe reducir a 10^{-7}, mientras que la probabilidad de un evento que tiene una oportunidad de 1 en 100 de matar a una persona se debe reducir a 10^{-5}. (Las técnicas utilizadas para subir o bajar la jerarquía de la probabilidad de esta manera se conoce como evaluaciones del riesgo cuantitativo o probabilístico).

Aunque los puntos discutidos anteriormente dominan las decisiones acerca de la tolerancia del riesgo, no son los únicos puntos. Los factores adicionales que ayudan a decidir que es tolerable incluyen valores individuales, valores industriales, que tanto se conocen los efectos reales y las consecuencias de cada modo de falla, el valor colocado para la vida humana por los diferentes grupos culturales, valores religiosos, la edad y el estado civil del individuo.

12.1.4 ¿QUIÉNES DEBEN EVALUAR EL RIESGO?— La diversidad de factores discutidos previamente indican que en este punto, es comúnmente imposible para alguna persona –o incluso una organización- decidir que es “tolerable” en nombre de todas las personas expuestas a un riesgo en particular. Además, en el presente pocas organizaciones utilizan una metodología formal para

determinar que constituye un riesgo tolerable. En ausencia de tal metodología, lo que es tolerable puede ser determinado por un grupo representativo:

a. Personas que probablemente tienen un entendimiento claro del mecanismo de falla, los efectos de falla (especialmente la naturaleza de algunas amenazas), la probabilidad de que ocurra el modo de falla y las probables medidas que se puedan tomar para anticiparlo o prevenirlo.
b. Personas quienes tienen una visión genuina de la tolerabilidad u otra parte de los riesgos. Esto debe incluir representaciones de:

    1. Las probables victimas (operadores o mantenedores en el caso de amenazas directas a la seguridad, y la comunidad en general en el caso de amenazas al ambiente)
    2. Quienes tienen que acarrear con las consecuencias si alguien es lastimado o muerto o si se viola una norma ambiental (como la gerencia).

Sin embargo; si una organización ha establecido niveles de riesgo que se consideren tolerables por todas las partes involucradas, entonces estos niveles pueden ser utilizados cuando se evalúa si alguna política de manejo de fallas vale la pena aplicarla a los modos de falla con consecuencias en el ambiente o en la seguridad.

12.1.5 MANEJO DE FALLAS Y SEGURIDAD— Si existe un riesgo intolerable de que un modo de falla pueda afectar la seguridad o el ambiente, el proceso MCC estipula que nosotros debemos tratar de reducir la probabilidad del modo de falla, o sus consecuencias, o ambos, de modo que la magnitud del riesgo total descienda a un nivel tolerable. Esto sugiere que, para los modos de falla que tienen consecuencias en la seguridad o en el ambiente, una política de manejo de fallas sólo vale la pena aplicarla si reduce el riesgo del modo de falla a un nivel bajo tolerable.

Nótese que cuando se trata con modos de falla evidentes que tienen consecuencias en la seguridad o en el ambiente, MCC no considera el costo del modo de falla. Si el riesgo es intolerable entonces se debe reducir a un nivel tolerable, bien sea por la introducción de una tarea proactiva adecuada (o tareas), o por el cambio del diseño o de la operación del activo de tal modo que el riesgo se reduzca a un nivel tolerable.

12.2 Modos de Falla Oculta con Consecuencias en la Seguridad y en el Ambiente— "En el caso de un modo de falla oculta en el que la falla múltiple asociada tenga consecuencias en la seguridad o en el ambiente, la tarea debe reducir la probabilidad del modo de falla oculta a una magnitud que disminuya la probabilidad de la falla múltiple asociada a un nivel tolerable para el dueño o usuario del activo." (SAE JA1011, Sección 5.7.1.2)

Como se explicó anteriormente, una falla múltiple sólo ocurre si la función protegida falla mientras la protección está en estado de falla. Esto significa que la probabilidad de una falla múltiple en cualquier período es dada por la probabilidad de que la función protegida fallará mientras que la protección está en estado de falla durante el mismo período. Esto se puede calcular como se muestra en la Ecuación 1:

Probabilidad de una falla múltiple	=	Probabilidad de falla de la función protegida	x	Promedio de indisponibilidad de la protección	(Ec. 1)

Para fallas múltiples que tengan consecuencias en la seguridad y en el ambiente, se debe determinar la probabilidad tolerable como se describe en las secciones 12.1.3 y 12.1.4. La probabilidad de falla (o tasa de falla) de la función protegida normalmente es dada. Entonces, si esas dos variables son conocidas, la indisponibilidad permitida de la función protectora puede expresarse como se muestra en la Ecuación 2:

$$\text{Indisponibilidad permitida de la protección} = \frac{\text{Probabilidad tolerable de una falla múltiple}}{\text{Probabilidad de falla de la función protegida}} \quad \text{(Ec. 2)}$$

Así un elemento crucial del desempeño requerido de cualquier protección que pueda sufrir un modo de falla oculta es la máxima indisponibilidad que se puede permitir si la probabilidad de la falla múltiple asociada no excede el nivel tolerable. Esta indisponibilidad se determina en las siguientes tres fases:

a. Si no se ha determinado como se describe en 12.1.3. y 12.1.4, establezca cual es la probabilidad que la organización está dispuesta a tolerar para la falla múltiple.
b. Entonces, determine la probabilidad de que la función protegida falle en el período en consideración (esto también se conoce como "tasa de demanda").
c. Finalmente, determine la indisponibilidad (también conocida como "tiempo muerto parcial") de la protección que resulta en la probabilidad tolerable de la falla múltiple.

Nótese también que comúnmente es posible variar tanto la probabilidad de una falla no anticipada de la función protegida, como (especialmente) la indisponibilidad de la función protectora por adopción de políticas de manejo de fallas convenientes. Como resultado, también es posible reducir la probabilidad de una falla múltiple a casi cualquier nivel deseado en razón de adoptar tales políticas. (cero es, por supuesto, un ideal inalcanzable).

12.3 Modos de Falla Evidente con Consecuencias Económicas— "En el caso de un modo de falla evidente que no tenga consecuencias en la seguridad o el ambiente, los costos directos o indirectos de la tarea deben ser menores que los costos directos o indirectos del modo de falla cuando se calculan en períodos de tiempo comparables." (SAE JA1011, Sección 5.7.1.3)

Las secciones 10.1.2.3 y 10.1.2.4 describen los elementos claves de las consecuencias económicas de un modo de falla. Estas secciones también muestran que las consecuencias económicas comprenden consecuencias operacionales y no operacionales, y que ellas son evaluadas bajo la suposición de que no se está desarrollando ninguna tarea programada.

Si las consecuencias de falla son económicas, el costo total de la organización en un período de tiempo no sólo es afectado por la magnitud de las consecuencias que podrían ocurrir, sino también por cuan frecuente las consecuencias tienen probabilidad de ocurrencia. Similarmente, el costo total de la organización de realizar cualquier tarea programada es afectado también por el costo total de hacer la tarea y por cuan frecuente es realizada. En este contexto, el costo total de realizar la tarea debe tomar en cuenta el costo de hacer la tarea por si misma, más el hecho de que en ocasiones puede ser necesario un trabajo adicional al levantar la tarea. Por ejemplo, puede ser necesario revisar un cojinete por ruido una vez a la semana y reemplazar un cojinete ruidoso una vez cada cuatro o cinco años en promedio.

Consecuentemente, para evaluar la viabilidad económica de cualquier tarea, es necesario comparar el costo total del modo de falla en un período dado con el costo total de la política de manejo de falla en el mismo período. (En la mayoría de los casos, estos costos son comparados por la reducción de los mismos sobre una base anualizada).

Si el costo de realizar la tarea en ese período es menor que el costo total del modo de falla, entonces vale la pena hacerla. De lo contrario, la tarea no es apropiada y se debe considerar alguna otra política de manejo de falla.

Nótese que si existe un grado razonable de certeza de que la probabilidad condicional del modo de falla se incrementará con el tiempo, entonces el período utilizado para la comparación debe ser suficientemente largo para abarcar tanto la vida temprana como el período de incremento de la probabilidad de falla cuando se evalúa si vale la pena hacer la tarea programada.

Nótese también que si el resto de la vida útil del activo es significativamente más corta que el tiempo promedio entre las ocurrencias del modo de falla (especialmente en el caso de fallas relacionadas con la longevidad), entonces sería apropiado tomar esto en cuenta cuando se evalúa la viabilidad económica de la tarea programada.

12.4 Modos de Falla Oculta con Consecuencias Económicas— "En el caso de un modo de falla oculta en el que la falla múltiple asociada no tenga consecuencias en la seguridad o en el ambiente, los costos directos o indirectos de la tarea deben ser menores que los costos directos o indirectos de una falla múltiple más el costo de reparación del modo de falla oculta cuando se calculen en períodos de tiempo comparables." (SAE JA1011, Sección 5.7.1.4.)

Las fallas múltiples que sólo tienen consecuencias económicas (operacionales o no operacionales) cuestan dinero. El manejo de fallas también cuesta dinero. Como resultado, normalmente es posible identificar una política de manejo de fallas que reduzca el costo total de manejar la falla oculta a un valor mínimo. En tales casos, el primer paso es determinar que política de manejo de fallas conduce al costo mínimo total sobre una base anualizada, entonces determine si este riesgo financiero (aunque minimizado) es tolerable para los dueños/usuarios del activo.

13. ***Políticas de Manejo de Fallas—Tareas Programadas***

13.1 Tareas Basadas en Condición— "Cualquier tarea basada en condición que se seleccione (o predictiva, o basada en condición, o tarea de monitoreo de condición) debe satisfacer los siguientes criterios adicionales:

a. Debe existir una falla potencial claramente definida.
b. Debe existir un intervalo P-F identificable (o período para el desarrollo de falla).
c. El intervalo de la tarea debe ser menor que el intervalo P-F probable más corto.
d. Debe ser físicamente posible realizar la tarea en intervalos menores que el intervalo P-F.
e. El tiempo más corto entre la detección de una falla potencial y la ocurrencia de una falla funcional (el intervalo P-F menos el intervalo de la tarea) debe ser suficientemente largo para predeterminar la acción a ser tomada a fin de evitar, eliminar o minimizar las consecuencias del modo de falla." (SAE JA1011, Sección 5.7.2)

13.1.1 FALLAS POTENCIALES Y LA CURVA P-F— La mayoría de los modos de falla no ocurren instantáneamente del todo. En tales casos, es muy posible detectar que los elementos concernientes se encuentran en etapas finales de deterioro antes de alcanzar su estado de falla. Esta evidencia de falla inminente se conoce como "falla potencial", la cual se define como "una condición identificable que indica que una falla funcional está a punto de ocurrir o está en un proceso de ocurrencia". Si esta condición puede ser detectada, podría ser posible tomar acción para prevenir que el elemento falle completamente y/o evitar las consecuencias del modo de falla.

La Figura 8 ilustra lo que ocurre en las fases finales del proceso de falla. Esta se llama curva P-F, porque muestra como comienza una falla, deteriora hasta el punto en el cual puede ser detectada ("P") y entonces, si no es detectada y corregida, continúa deteriorándose –usualmente a una velocidad acelerada- hasta que alcanza el punto de falla funcional ("F").

Si se detecta una falla funcional entre el punto P y el punto F de la Figura 8, este es el punto al cual podría ser posible tomar acción para prevenir la falla funcional y/o evitar sus consecuencias. (si es posible o no tomar una acción significante dependerá de cuán rápido ocurre la falla funcional, como se discutirá más adelante). Las tareas diseñadas para detectar las fallas potenciales se conocen como tareas basadas en condición.

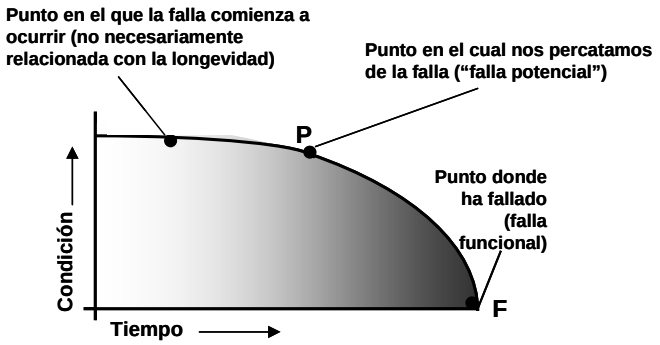

FIGURA 8— LA CURVA P-F

Las tareas basadas en condición se llaman así porque los elementos se inspeccionan y se dejan en servicio bajo la condición de que continúen obteniéndose los estándares de operación especificados –en otras palabras, bajo la condición que el modo de falla en consideración improbablemente ocurra antes de la próxima revisión. Esto también se conoce como mantenimiento predictivo (porque nosotros estamos tratando de predecir si –y posiblemente cuando- el elemento va a fallar en base a su comportamiento actual) o mantenimiento basado en condición (porque la necesidad de una acción correctiva o para evitar consecuencias está basada en una evaluación de la condición del elemento).

13.1.2 EL INTERVALO P-F— En adición a la falla potencial, también es necesario considerar la cantidad de tiempo (o el número de ciclos de esfuerzo) que transcurre entre el punto en el cual ocurre la falla potencial –en otras palabras, el punto en el cual se hace identificable- y el punto en el que se deteriora hacia una falla funcional. Como se muestra en la Figura 9, este intervalo se conoce como el intervalo P-F.

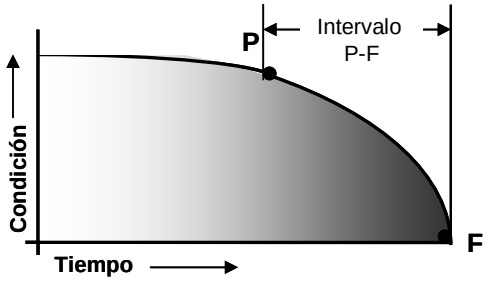

FIGURA 9— EL INTERVALO P-F

El intervalo P-F determina que tan frecuente se deben hacer las tareas basadas en condición. Para detectar la falla potencial antes que se convierta en una falla funcional, el intervalo entre revisiones debe ser menor que el intervalo P-F. También es esencial que la condición de la falla potencial sea lo suficientemente clara para tener la certeza de que la persona que está entrenada para realizar la revisión, detectará la falla potencial siempre y cuando ocurra (o al menos, que la probabilidad de que la falla potencial no sea detectada sea suficientemente baja para reducir la probabilidad de un modo de falla no anticipado a un nivel que sea tolerable para el dueño o usuario del activo).

El intervalo P-F también se conoce como período de advertencia, el tiempo que conduce hacia una falla funcional o el período de desarrollo de la falla. Este se puede medir en cualesquiera unidades que provean una indicación de la exposición al esfuerzo (tiempo de operación, unidades de

producción, ciclos parada-arranque, etc.). Para diferentes modos de falla, estos varían de fracciones de segundo a varias décadas.

Nótese que si se realiza una tarea basada en condición a intervalos que son más largos que el intervalo P-F, existe una posibilidad de que la falla potencial sea abandonada del todo. Por otro lado, si se realiza la tarea a fracciones muy pequeñas del intervalo P-F, los recursos serán gastados en el proceso de revisión.

En la práctica los intervalos de las tareas siempre se deben seleccionar para ser más cortos que el más corto intervalo P-F probable. En la mayoría de los casos, es suficiente seleccionar un intervalo de tarea igual a la mitad del intervalo P-F. Sin embargo, algunas veces es apropiado seleccionar intervalos de tarea que sean alguna otra fracción del intervalo P-F. Esto se puede regir por el intervalo P-F neto requerido (como se discute más adelante), o puede ser porque el usuario del activo tiene datos históricos relevantes que dictaminan que una fracción diferente es apropiada.

13.1.3 EL INTERVALO NETO P-F— El intervalo neto P-F es el intervalo mínimo probable que transcurre entre la detección de una falla potencial y la ocurrencia de la falla funcional. Esto se ilustra en la Figura 10, la cual muestra un proceso de falla con un intervalo P-F de nueve meses. La figura muestra que si el elemento es revisado mensualmente, el intervalo neto P-F es de 8 meses. Por otro lado, si es revisado semestralmente, el intervalo neto P-F debería ser de tres meses. Entonces, en el primer caso el tiempo mínimo disponible para realizar cualquier cosa con respecto a la falla potencial es cinco meses mayor que en el segundo, pero la tarea basada en condición tiene que ser realizada con una frecuencia seis veces mayor.

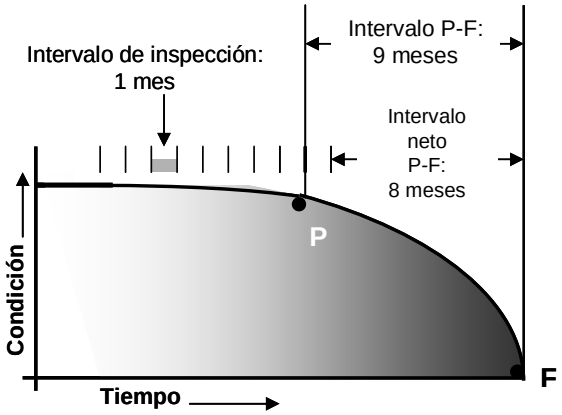

FIGURA 10— INTERVALO NETO P-F

El intervalo P-F rige la duración del período disponible para tomar cualquier acción necesaria con la finalidad de reducir o eliminar las consecuencias del modo de falla. Para que una tarea basada en condición sea técnicamente factible, el intervalo neto P-F debe ser mayor que el período requerido para evitar o reducir las consecuencias del modo de falla. Si el intervalo neto P-F es demasiado corto para tomar una acción sensata, entonces la tarea basada en condición no es técnicamente factible. En la práctica, el período requerido varía ampliamente. En algunos casos, puede ser una cuestión de horas (decir hasta el final de un ciclo de operación o el fin de un cambio) o incluso minutos (parar una máquina o para evacuar un edificio). En otros casos, pueden ser semanas o incluso meses (decir hasta un mantenimiento mayor). En general, se desean intervalos P-F mayores por dos razones:

a. Es posible hacer cualquier cosa necesaria para evitar las consecuencias del modo de falla (incluyendo la planeación de la acción correctiva) de una manera más considerada y por demás controlada.
b. Se requieren menos inspecciones basadas en condición.

Por esta razón se invierte mucha energía para encontrar las condiciones de la falla potencial y las técnicas basadas en condición que suministran posibles intervalos P-F mayores. Sin embargo; en algunos casos, es posible utilizar intervalos P-F muy cortos.

13.1.4 LA RELACIÓN ENTRE EL INTERVALO P-F Y LA LONGEVIDAD

13.1.4.1 Intervalos P-F y Fallas Aleatorias— Cuando se aplican estos principios por primera vez, las personas frecuentemente tienen la dificultad de distinguir entre la "vida" de un componente y el intervalo P-F. Esto los lleva a basar las frecuencias de las tareas basadas en condición en la "vida" real o imaginaria del elemento. Si el esto existe, esta vida normalmente es mucho mayor que el intervalo P-F, de modo que la tarea logra poco o nada. En la realidad, nosotros medimos la vida de un componente hacia delante desde el momento en que entra en servicio. El intervalo P-F se mide hacia atrás desde la falla funcional, así los dos conceptos comúnmente no están relacionados. La distinción es importante ya que los modos de falla que no están relacionados con la longevidad (en otras palabras, fallas aleatorias) tienen la misma probabilidad de ser advertidos como de no serlos.

Por ejemplo, la Figura 11 muestra un componente que conforma el patrón de una falla aleatoria (patrón E). Uno de los componentes falla después de los cinco años, el segundo falla después de seis meses y un tercero después de dos años. En cada caso, la falla funcional estuvo precedida por una falla potencial con un intervalo P-F de cuatro meses.

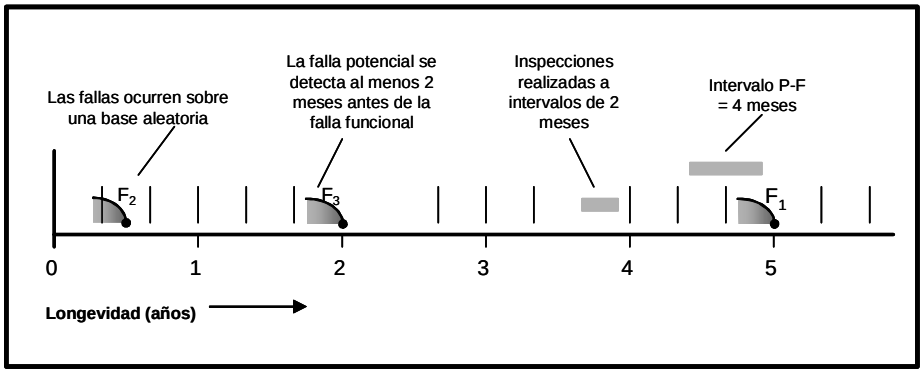

FIGURA 11— FALLAS ALEATORIAS Y EL INTERVALO P-F

La Figura 11 muestra que con el fin de detectar la falla potencial, necesitamos realizar una tarea de inspección cada 2 meses. Debido a que los modos de falla ocurren sobre una base aleatoria, no sabemos cuando ocurrirá el próximo, así el ciclo de inspecciones debe comenzar tan pronto como el elemento entra en servicio. En otras palabras, la medida del tiempo de las inspecciones no tiene nada que ver con la longevidad o vida del componente.

Sin embargo; esto no significa que las tareas basadas en condición aplican sólo a elementos que fallan sobre una base aleatoria. Estas también se deben aplicar a elementos que sufren modos de falla relacionados con la longevidad, como se discutió anteriormente.

13.1.4.2 Intervalos P-F y Modos de Falla Relacionados con la Longevidad— Si un elemento se deteriora de una manera más o menos lineal a lo largo de su vida, está supuesto razonar que las fases finales

de deterioro serán también más o menos lineales. Esto es probable que sea verdadero para modos de falla relacionados con la longevidad.

Por ejemplo, considere el uso de un neumático. Es probable que la superficie de un neumático se desgaste de una manera más o menos lineal hasta que la profundidad de la banda de rodamiento alcance el mínimo aceptable. Si este mínimo es (se dice) 2 mm, es posible especificar una profundidad de rodamiento mayor a 2 mm que provea una advertencia adecuada para la ocurrencia inminente de la falla funcional. Este es, por supuesto, el nivel de la falla potencial.

Si la falla potencial es fijada en (se dice) 3 mm, entonces el Intervalo P-F es la distancia que el neumático podría viajar hasta que su profundidad de rodamiento se desgaste de 3 mm a 2 mm, como se ilustra en la Figura 12.

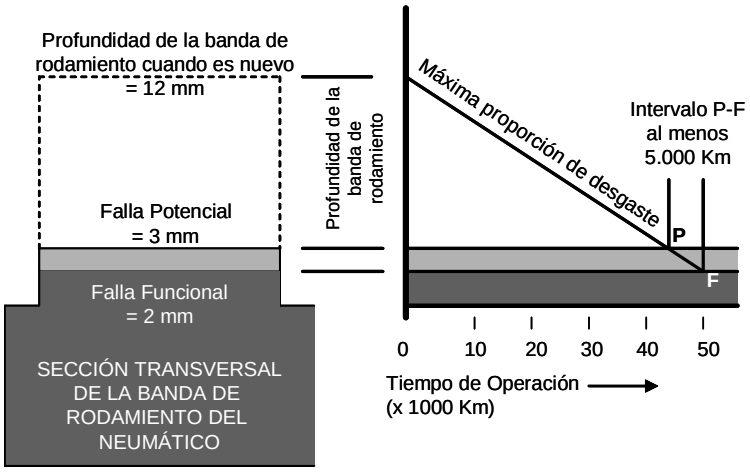

FIGURA 12— UNA CURVA P-F LINEAL

La Figura 12 también sugiere que si el neumático entra en servicio con una profundidad de banda de rodamiento de (se dice) 12 mm, podría ser posible predecir el intervalo P-F basándose en la distancia total cubierta comúnmente antes de que el neumático tenga que ser reencauchado . Por ejemplo, si los neumáticos duran al menos 50.000 Km antes de que sean reencauchados, es razonable concluir que la banda de rodamiento se desgasta a una proporción máxima de 1 mm por cada 5.000 Km de recorrido. Estas cantidades a un intervalo P–F de 5.000 Km. La tarea basada en condición asociada podría ser llamada por el conductor: "Revisar la profundidad de la banda de rodamiento cada 2.500 Km y reportar los neumáticos cuya profundidad de banda de rodamiento sea menor de 3 mm".

Esta tarea no sólo asegurará que se detecte el desgaste antes de exceder el límite legal, sino que también permite el tiempo suficiente -2.500 km en este caso- para que los operadores del vehículo planeen retirar el neumático antes de alcanzar el límite.

En general, el deterioro lineal entre "P" y "F" probablemente sólo se encuentra en los casos en los cuales los mecanismos de falla estén intrínsecamente relacionados con la longevidad.

13.1.5 CONSISTENCIA DEL INTERVALO P-F— Las curvas P-F ilustradas hasta ahora en esta sección de la guía indican que el intervalo P-F es constante para cualquier modo de falla dado. De hecho, este no es el caso –algunos realmente varían en un amplio rango de valores, como se muestra en la Figura 13. En esos casos se debe seleccionar un intervalo de tarea que sea menor que los

intervalos probables P-F más cortos. Esto asegura un grado razonable de certeza al detectar la falla potencial antes que se convierta en una falla funcional. Si el intervalo neto P-F asociado con este intervalo mínimo es lo suficientemente grande para tomar una acción que maneje las consecuencias del modo de falla, la tarea basada en condición es técnicamente factible.

Por otro lado, si el intervalo P-F es muy inconsistente, no es posible establecer un intervalo de tarea significativo, y se debe abandonar la tarea a favor de alguna otra manera de manejar el modo de falla.

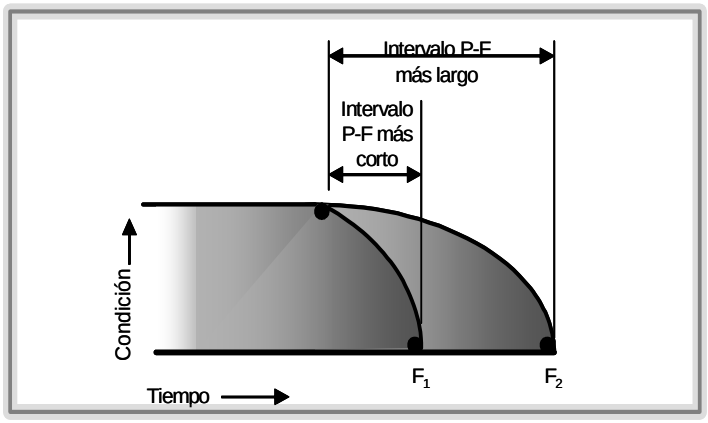

FIGURA 13— INTERVALOS P-F INCONSISTENTES

13.1.6 CATEGORÍAS DE TÉCNICAS BASADAS EN CONDICIÓN— Las cuatro categorías mayores de técnicas basadas en condición son las siguientes:

a. Las técnicas basadas en las variaciones de la calidad del producto. En muchos casos, la emergencia de un defecto en un artículo producido por una máquina está directamente relacionada a un modo de falla de la misma. Muchos otros defectos surgen gradualmente, y así proveen evidencia oportuna de fallas potenciales.
b. Técnicas de monitoreo de efectos primarios. Los efectos primarios (velocidad, caudal de flujo, presión, temperatura, potencia, corriente, etc.) son otras fuentes de información acerca de las condiciones del equipo. Los efectos pueden ser monitoreados por una persona a través de la lectura de un indicador, por un computador como parte de un sistema de control de procesos, o por un registrador de mapas.
c. Técnicas basadas en los sentidos humanos (observar, escuchar, sentir, y oler).
d. Técnicas de monitoreo de condición. Estas son técnicas para detectar fallas potenciales que involucran el uso de equipo especializado (el cual algunas veces, se incorpora al equipo que se está monitoreando). Estas técnicas son conocidas como monitoreo de condición para distinguirlas de otros tipos de mantenimiento basados en condición.

Muchos modos de falla son precedidos por más de una –frecuentemente varias- fallas potenciales diferentes, así podría ser apropiada más de una categoría de tareas basadas en condición. Cada una de ellas tendrá un intervalo P-F diferente, y cada una requerirá diferentes tipos y niveles de habilidades. Esto significa que ninguna categoría de tareas por sí sola será siempre la más costo-efectiva. Entonces, para evitar inclinaciones innecesarias en la selección de la tarea, es esencial:

a. Considerar todos los fenómenos detectables que probablemente precedan cada modo de falla, junto al rango total de tareas basadas en condición que puedan utilizarse para detectar esas advertencias.

b. Aplicar el criterio de selección de tareas del MCC rigurosamente para determinar cuales tareas (si existen) probablemente sean la manera más costo-efectiva de anticipar el modo de falla en consideración.

Nótese que cualquier dispositivo incorporado para determinar si un modo de falla está en proceso de ocurrir, debe satisfacer el mismo criterio para la factibilidad técnica y vale la pena hacerlo de cualquier mantenimiento basado en condición, con modos de falla adicionales, y se deben analizar conforme a ello.

13.2 Tareas de Restauración Programada y de Desincorporación Programada— "Cualquier tarea de desincorporación programada seleccionada debe satisfacer los siguientes criterios adicionales:

a. Debe estar claramente definida (preferiblemente demostrable) la longevidad en la cual hay un incremento en la probabilidad condicional del modo de falla en consideración.
b. Debe existir una proporción suficientemente grande de las ocurrencias de este modo de falla después de esta longevidad para reducir la probabilidad de una falla prematura a un nivel que sea tolerable para el dueño o usuario del activo." (SAE JA1011, Sección 5.7.3)

"Cualquier tarea de restauración programada seleccionada debe satisfacer los siguientes criterios adicionales:

a. Debe estar claramente definida (preferiblemente demostrable) la longevidad a la cual hay un incremento en la probabilidad condicional del modo de falla en consideración.
b. Debe existir una proporción suficientemente grande de las ocurrencias de este modo de falla después de esta longevidad para reducir la probabilidad de una falla prematura a un nivel que sea tolerable para el dueño o usuario del activo.
c. La tarea debe restaurar la resistencia a fallar (condición) del componente a un nivel que sea tolerable para el dueño o usuario del activo." (SAE JA1011, Sección 5.7.4)

Las tareas de restauración programada y de desincorporación programada tienen un número de características en común, así esta parte de la guía considera primero sus características comunes, luego revisa las diferencias.

La restauración programada vincula la toma de acciones periódicas para restaurar la capacidad de un elemento a (o antes de) un intervalo especificado (límite de longevidad), indiferentemente de su condición en el momento, a un nivel que provea una probabilidad tolerable de supervivencia hasta el final o hasta otro intervalo especificado (el cual no tiene que ser necesariamente igual al intervalo inicial). Esta acción usualmente trae consigo tanto la refabricación de un sólo componente como la verificación del ensamblaje completo.

La desincorporación programada significa desincorporar un elemento o componente a (o antes de) un límite de longevidad especificado, indiferentemente de su condición en el momento. Esto se hace en el supuesto de que al reemplazar un viejo componente con uno nuevo se restaurará la resistencia original a fallar.

Si el modo de falla en consideración es conforme a los Patrones A y B, es posible identificar la longevidad a la que comienza el deterioro. La tarea de restauración programada o de desincorporación programada se debe hacer en intervalos menores a esta longevidad. En otras palabras, la frecuencia de la tarea de restauración programada o de desincorporación programada es determinada por la longevidad a la cual el elemento o componente muestra un incremento rápido en la probabilidad condicional de falla.

En el caso del Patrón C, se requieren técnicas analíticas más complejas. Estas técnicas están más allá del alcance de esta guía. Nótese que dos tipos de límites de vida aplican a las tareas de

restauración programada y de desincorporación programada. Estos son límites de vida-segura y de vida-económica.

13.2.1 LÍMITES DE VIDA-SEGURA— Los límites de vida-segura sólo aplican a modos de falla que tienen consecuencias en la seguridad o en el ambiente, así las tareas asociadas deben reducir a un nivel tolerable la probabilidad de que ocurra un modo de falla antes del límite de vida. (Un método de decisión que fuese tolerable se discutió en la sección 12.1.3 de esta guía. En la práctica, las probabilidades tan bajas como 10^{-6} y algunas veces, incluso 10^{-9} se utilizan frecuentemente en este contexto.) Este requerimiento implica que estos límites de vida-segura no se pueden aplicar a cualquier modo de falla que tenga una probabilidad significativa de ocurrencia cuando el elemento entra en servicio.

Idealmente, los límites de vida-segura se deben determinar antes de que un elemento nuevo entre en servicio. Se deben establecer probando estadísticamente una muestra adecuada de elementos en un ambiente de operación simulado para determinar que vida realmente se logra. Algunas industrias aplican una fracción conservadora de esta vida (típicamente un tercio o un cuarto) como límite de vida-segura, como se ilustra en la Figura 14.

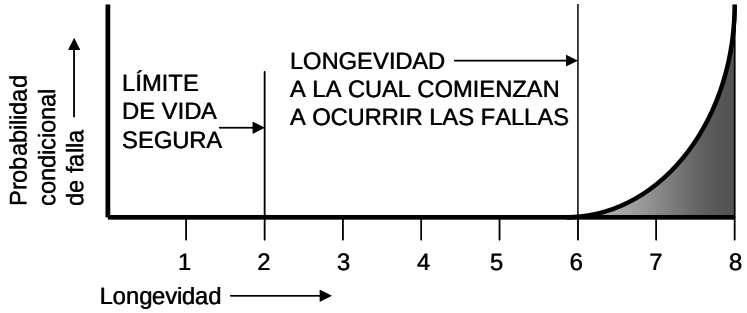

FIGURA 14— LÍMITES DE VIDA-SEGURA

13.2.2 LÍMITES DE VIDA-ECONÓMICA— La experiencia en operaciones algunas veces sugiere que la restauración programada o la desincorporación programada es deseable en términos económicos. Esto se conoce como un límite de vida-económica. Está basado en la relación longevidad-confiabilidad actual del elemento, en lugar de una fracción de la longevidad a la cual existe un incremento en la probabilidad condicional de falla. Una cantidad suficientemente mayor de elementos deben sobrevivir al límite de vida-económica para que la tarea sea justificable en términos económicos.

13.3 Tareas de Detección de Fallas— "Cualquier tarea de detección de fallas seleccionada debe satisfacer los siguientes criterios adicionales (detección de fallas no aplica para modos de falla evidentes):

a. La base sobre la cual se selecciona el intervalo de tarea debe tomar en cuenta la necesidad de reducir la probabilidad de una falla múltiple del sistema protector asociado a un nivel que sea tolerable para el dueño o usuario del activo.
b. La tarea debe confirmar que todos los componentes cubiertos por la descripción del modo de falla sean funcionales.
c. La tarea de detección de falla y el proceso de selección del intervalo asociado deben tomar en cuenta cualquier probabilidad de que la tarea por si misma pueda dejar la función oculta en un estado de falla.

d. Debe ser físicamente probable hacer la tarea en los intervalos especificados." (SAE JA1011, Sección 5.7.5)

13.3.1 FALLAS MÚLTIPLES Y DETECCIÓN DE FALLAS— Como se mencionó en la sección 10.1.1.2, una falla múltiple ocurre si una función protegida falla mientras la protección está en estado de falla. Este fenómeno fue ilustrado en la Figura 5. La Ecuación 1, repetida abajo como Ecuación 3, muestra como se puede calcular la probabilidad de una falla múltiple.

Probabilidad de una falla múltiple	=	Probabilidad de falla de la función protegida	x	Promedio de indisponibilidad de la protección	(Ec. 3)

Esto lleva a concluir que la probabilidad de una falla múltiple se puede reducir al disminuir la indisponibilidad de la protección –en otras palabras, por el incremento de su disponibilidad.

La mejor manera de hacer esto es prevenir que la función protectora entre en estado de falla aplicando algún tipo de mantenimiento proactivo. Sin embargo; pocas tareas proactivas satisfacen el criterio de factibilidad técnica cuando se aplican a fallas ocultas. No obstante, aunque el mantenimiento proactivo es frecuentemente impropio, todavía es esencial hacer algo para reducir la probabilidad de una falla múltiple a un nivel requerido. Esto se puede hacer revisando periódicamente si ha ocurrido la falla. Tales revisiones son conocidas como tareas de detección de fallas.

13.3.2 ASPECTOS TÉCNICOS DE LA DETECCIÓN DE FALLAS— El objetivo de la detección de fallas es determinar si un modo de falla oculta o la combinación de modos de falla oculta han proporcionado una función protectora incapaz de proveer la protección requerida si es llamada a hacerla. (Esta es la razón por la que las tareas de detección de fallas también se conocen como revisiones funcionales). Los párrafos siguientes consideran algunos de los puntos claves en esta área.

13.3.2.1 Revise la Función Protectora en su Totalidad— Una tarea de detección de fallas debe asegurar la detección de todos los modos de falla oculta a los cuales se dirige. Esto es verdad especialmente en dispositivos complejos, tales como los compuestos por sensores, circuitos eléctricos, y actuadores. Idealmente, esto se debe hacer simulando las condiciones que el sensor debe detectar, y revisar si el actuador proporciona la respuesta correcta. El intervalo de detección de fallas se debe establecer acorde a esto.

13.3.2.2 No Altere— Desarmar algo siempre crea la posibilidad de ensamblarlo incorrectamente. Si esto pasa a un dispositivo protector en el que ocurren fallas ocultas, el hecho de que los modos de falla sean ocultos implica que nadie sabrá si algo se ha dejado en estado de falla hasta la próxima revisión (o hasta que se necesite). Por esta razón, siempre busque la manera de revisar las funciones de los dispositivos protectores sin desconectarlos o cualquier otra manera de alterarlos.

Se ha dicho que algunos dispositivos simplemente tienden a ser desarmados o removidos del todo para revisar si están trabajando apropiadamente. En esos casos, se debe tener mucho cuidado de realizar la tarea de tal manera que los dispositivos todavía trabajarán cuando retornen al servicio.

13.3.2.3 Debe ser Físicamente Posible Realizar la Revisión de la Función— En un número muy pequeño pero aún significativo de casos, es imposible llevar a cabo una tarea detección de fallas de cualquier tipo. Estos son:

a. En el caso en el cual es imposible tener acceso al dispositivo protector para revisar su función (esto es casi siempre resultado de un diseño insensato), y
b. Cuando la función del dispositivo no puede ser revisada sin destruirlo (como en el caso de dispositivos fusibles y los discos de seguridad). En la mayoría de esos casos, están

disponibles otras tecnologías (tales como cortacircuitos en lugar de fusibles). Sin embargo; en uno o dos casos las únicas opciones son encontrar otra manera de manejar los riesgos asociados con protección no probada hasta que algo mejor pase a lo largo del proceso concerniente o al abandonarlo.

13.3.2.4 Minimice el Riesgo Mientras se Realiza la Tarea— Puede ser posible llevar a cabo una tarea de detección de fallas sin incrementar significativamente el riesgo de una falla múltiple. Si el dispositivo protector ha de estar desactivado para realizar la tarea de detección de fallas, o si tal dispositivo se revisa y se encuentra en estado de falla, entonces se debe proveer una protección alternativa o se debe detener la función protegida hasta que se restablezca la protección original.

13.3.2.5 La Frecuencia debe ser Práctica— Debe ser práctico realizar la tarea de detección de fallas a los intervalos requeridos. Esto se discutirá en la sección 13.3.3. Sin embargo; antes de poder decidir si un intervalo requerido es práctico, necesitamos determinar que intervalo es realmente "requerido".

13.3.3 INTERVALOS DE TAREAS DE DETECCIÓN DE FALLAS

13.3.3.1 Intervalos de Detección de Fallas, Disponibilidad y Confiabilidad— Nada más que dos variables –disponibilidad y confiabilidad- se utilizan para establecer los intervalos de detección de fallas. Se puede demostrar que existe una correlación lineal entre la indisponibilidad, el intervalo de detección de fallas y la confiabilidad de la función protectora dada por su TPEF, como sigue en la Ecuación 4:

$$\text{Indisponibilidad} = 0{,}5 \times \frac{\text{Intervalo de deteción de fallas}}{\text{TPEF de la función protectora}} \qquad \text{(Ec. 4)}$$

También se puede demostrar que esta relación lineal es válida para todas las indisponibilidades menores al 5%, con tal que la función protectora conforme una distribución de supervivencia exponencial.[1]

13.3.3.2 Excluyendo el Tiempo de la Tarea y el Tiempo de la Reparación— La "indisponibilidad" de la función protectora en la Ecuación 4 no incluye alguna indisponibilidad incurrida mientras se está realizando la tarea de detección de fallas, ni incluye cualquier indisponibilidad causada por la necesidad de restaurar la función si se encuentra en estado de falla. Esto es así por dos razones:

a. La indisponibilidad requerida para realizar la tarea de detección de fallas y para efectuar cualquier reparación es probable que sea relativamente pequeña con respecto a la indisponibilidad no revelada entre tareas, a una magnitud que normalmente será despreciable sólo en términos matemáticos.
b. Tanto la tarea de detección de fallas y cualquier reparación que podría ser necesaria se deben realizar bajo condiciones estrictamente controladas. Estas condiciones deben reducir enormemente –si no la elimina por completo- la posibilidad de una falla múltiple mientras la intervención está en marcha. Esto incluye tanto la parada del sistema protegido como el arranque de una función protectora hasta que se restaure por completo el sistema. Si esto se hace apropiadamente, la indisponibilidad resultante de la intervención (controlada) se puede ignorar en cualquier evaluación de la probabilidad de una falla múltiple.

En el proceso de decisión del MCC, el último punto es cubierto por el criterio para evaluar si una tarea de detección de fallas vale la pena hacerla. Si hay un incremento significativo de la probabilidad de una falla múltiple mientras la tarea está en marcha, la respuesta a la pregunta "¿La tarea reduce la probabilidad de una falla múltiple a un nivel tolerable?" Será "no".

[1] Vea Cox y Tait o Andrews y Moss

13.3.3.3 Cálculo del IDF Utilizando sólo Disponibilidad y Confiabilidad— Si utilizamos la abreviatura "IDF" para escribir el Intervalo de Detección de Fallas y "TPRA" para describir el TPEF de una función protectora, la Ecuación 4 puede ser reacomodada como se muestra en la Ecuación 5:

$$IDF = 2 \times \text{Indisponibilidad} \times TPRA \qquad \text{(Ec. 5)}$$

Esto significa que para determinar el intervalo de detección de fallas para una sola función protectora, es necesario encontrar su tiempo promedio entre fallas y la disponibilidad deseada de la función (de la cual es posible computar la indisponibilidad a ser utilizada en la fórmula). Para quienes se sienten incómodos con formulaciones matemáticas, se puede utilizar la Ecuación 5 para desarrollar una tabla simple, como se muestra en la Figura 15:

Disponibilidad que se requiere para la función protectora	99.99%	99.95%	99.9%	99.5%	99%	98%	95%
Intervalo de detección de fallas (como % del TPEF)	0.02%	0.1%	0.2%	1%	2%	4%	10%

FIGURA 15— INTERVALO DE DETECCIÓN DE FALLAS, DISPONIBILIDAD Y CONFIABILIDAD

13.3.3.4 Métodos Rigurosos para el Cálculo del IDF— Una fórmula sencilla para determinar los intervalos de detección de fallas que incorpora todas las variables consideradas hasta ahora se puede desarrollar por la combinación de las Ecuaciones 1 y 5, como se explica en los párrafos siguientes. Para hacer esto, se necesitan definir más términos como sigue:

a. Una probabilidad de una falla múltiple de 1 en 1.000.000 en un año implica un tiempo promedio entre fallas múltiples de 1.000.000 de años. Si esto se llama T_{FM}, la probabilidad de ocurrencia de una falla múltiple en cualquier año es $1/T_{FM}$.
b. Si la tasa de demanda de la función protegida es (se dice) una en 200 años, esto corresponde a la probabilidad de falla para la función protegida de 1 en 200 en cualquier año, o un tiempo promedio entre fallas de la función protegida de 200 años. Si esta es llamada T_{GIDA}, la probabilidad de falla de la función protegida en cualquier año será $1/T_{GIDA}$. Esto también se conoce como tasa de demanda.
c. T_{TORA} es el tiempo promedio entre fallas de la función protectora e IDF es el intervalo de la tarea de detección de fallas.
d. I_{TORA} es la indisponibilidad permitida de la función protectora.

Si se sustituyen las expresiones previas en la Ecuación 5, tenemos:

$$1/T_{FM} = (1/T_{GIDA}) \times I_{TORA} \qquad \text{(Ec. 6)}$$

Esto se puede reacomodar como sigue en la Ecuación 7:

$$I_{TORA} = \frac{T_{GIDA}}{T_{FM}} \qquad \text{(Ec. 7)}$$

Sustituyendo I_{TORA} de la Ecuación 7 en la Ecuación 5, obtenemos la Ecuación 8:

$$IDF = \frac{(2 \times T_{TORA} \times T_{GIDA})}{T_{FM}} \qquad \text{(Ec. 8)}$$

Esta fórmula permite determinar en un sólo paso el intervalo de detección de fallas, independientemente de la función protectora.

13.3.3.4.1 Modos de Falla Múltiple de una Sola Función Protectora— A lo largo de esta sección, todas las posibilidades de falla que podrían causar la falla de cualquier función protectora se han agrupado como un solo modo de falla ("falla de la bomba de respaldo"). La vasta mayoría de las funciones protectoras se pueden tratar de esta manera, debido a que todos los modos de falla que podrían causar la falla de una función protectora son revisados cuando se examina la función del dispositivo como un todo.

Sin embargo; algunas veces es apropiado realizar un AMEF detallado de la función protectora para identificar modos de falla individuales, cada uno de los cuales por si mismo podrían causar que el dispositivo o sistema protector no esté en disposición de proveer la protección requerida. Esto normalmente se hace bajo sólo dos conjuntos de circunstancias:

a. Cuando se conoce que algunos de los modos de falla son susceptibles al mantenimiento basado en condición o a las tareas de restauración programada o de desincorporación programada, pero otros no son predecibles ni prevenibles. En esos casos, la tarea apropiada de desincorporación/restauración programada o basada en condición, se debe aplicar a los modos de falla que califiquen, y aplicar la detección de fallas al resto de los modos de falla.
b. Cuando el dispositivo protector es nuevo y los únicos datos de falla que están disponibles (provenientes de bancos de datos, suplidores del componente o cualquier otra fuente) aplican a partes del dispositivo pero no al dispositivo como un todo.

En esas circunstancias, la Ecuación 8 se debe modificar para adecuar la combinación de modos de falla individuales que son objeto de la tarea de detección de fallas, a través de la determinación de un tiempo promedio entre fallas compuesto de la función protectora basado en los TPEF de cada modo de falla.

13.3.3.4.2 Métodos de Cálculo de los Intervalos de Detección de Fallas para Otros Tipos de Funciones Protectoras— Las técnicas para fijar los intervalos de detección de fallas descritas previamente son enfoques basados en riesgo para funciones protectoras solas. El manejo de funciones protectoras múltiples y el manejo de fallas múltiples que sólo tienen consecuencias económicas están fuera del alcance de esta guía.

13.3.3.5 La Viabilidad de los Intervalos de Tareas de Detección de Fallas— Los métodos descritos hasta ahora para el cálculo de los intervalos de detección de fallas algunas veces producen intervalos muy cortos o muy largos, con las siguientes implicaciones:

a. Un intervalo de detección de fallas muy corto tiene dos implicaciones principales:

    1. Algunas veces el intervalo es simplemente demasiado corto para ser práctico. Un ejemplo podría ser una tarea de detección de fallas que emplaza a un elemento grande de una planta de proceso a que se pare cada pocos días.
    2. La tarea puede causar acostumbramiento (lo cual puede pasar si una alarma contraincendio se prueba muy frecuentemente).

    En estos casos, se debe rechazar la tarea propuesta y se debe encontrar alguna otra manera de reducir la probabilidad de una falla múltiple a un nivel tolerable.

b. Un intervalo de detección de fallas muy largo también tiene dos implicaciones principales:

1. Para intervalos que son sustancialmente mayores que el resto de la vida útil proyectada del activo: tales intervalos sugieren que no hay ninguna necesidad de realizar una tarea de detección de fallas programada en absoluto (aunque todavía es necesario determinar durante las participaciones que el dispositivo se ha instalado correctamente).
2. Para intervalos que son mayores que el horizonte máximo de planeación de los sistemas de planeación de mantenimiento existentes, pero son menores que el resto de la vida útil proyectada del activo: En estos casos, se debe tener cuidado de no reducir los intervalos asociados simplemente por ajuste de los límites de los sistemas de planeación existentes, si sólo porque las tareas de detección de fallas puedan algunas veces inducir los modos de falla los cuales están destinadas a detectar.

c. Nótese que el intervalo de las tareas de detección de fallas puede exceder el intervalo promedio entre fallas de la función protegida. Debido al incremento de la cantidad por la que el intervalo de detección de fallas excede al intervalo de falla, el valor de detección de fallas disminuye rápidamente, hasta el punto en el que hay poco o ningún efecto en la probabilidad de la falla múltiple. Si cualquiera de las fórmulas anteriores produce un intervalo en este punto o más allá de él, se debe encontrar alguna otra manera de reducir la probabilidad de la falla múltiple a un nivel tolerable.

13.4 Combinación de Tareas— Si un modo de falla o una falla múltiple puede afectar la seguridad o el ambiente y no se puede encontrar ninguna tarea programada que por si misma reduzca el riesgo de falla a un nivel bajo tolerable, a veces es posible que la combinación de tareas (normalmente desde dos categorías de tareas diferentes, tales como una tarea basada en condición y una tarea de desincorporación programada), pueda reducir el riesgo del modo de falla a un nivel tolerable.

Cuando se consideran tales combinaciones, se debe tener cuidado de asegurar que cada tarea por si misma satisfará el criterio de factibilidad técnica apropiado para cada tipo de tarea, y que cada tarea se realice a una frecuencia adecuada para esa tarea. También se debe cuidar de asegurar que las dos tareas combinadas reducirán de hecho, las consecuencias a un nivel tolerable. Sin embargo; debe enfatizarse que las situaciones en las que se necesite la combinación de tareas son muy raras, y se debe cuidar de no emplear tales combinaciones indiscriminadamente.

14. Políticas de Manejo de Fallas— Cambio de Especificaciones y Operar Hasta Fallar

14.1 Cambio de especificaciones— "El proceso MCC se esfuerza por obtener el desempeño deseado del sistema como está configurado y operado actualmente a través de la aplicación de tareas programadas apropiadas." (SAE JA1011, Sección 5.8.1.1)

"En los casos donde tales tareas no estén disponibles, pueden ser necesarios cambios de especificaciones del activo o sistema, sujetos a los siguientes criterios:

a. En los casos donde la falla es oculta, y la falla múltiple asociada tiene consecuencias en la seguridad y en el ambiente, son mandatorios cambios de especificaciones que reduzcan la probabilidad de una falla múltiple a un nivel tolerable para el dueño o usuario del activo.
b. En los casos donde el modo de falla es evidente y tiene consecuencias en la seguridad y en el ambiente, son mandatorios cambios de especificaciones que reduzcan la probabilidad de una falla múltiple a un nivel tolerable para el dueño o usuario del activo.
c. En casos donde el modo de falla es oculto y la falla múltiple asociada no tiene consecuencias en la seguridad ni en el ambiente, cualquier cambio de especificaciones debe ser costo-efectivo en opinión del dueño o usuario del activo.
d. En casos donde el modo de falla es evidente y no tiene consecuencias en la seguridad ni en el ambiente, cualquier cambio de especificaciones debe ser costo-efectivo en opinión del dueño o usuario del activo." (SAE JA1011, Sección 5.8.1.2)

En secciones anteriores de esta guía se enfatiza que la capacidad inicial (o confiabilidad inherente) de cualquier activo es establecida según su diseño y el modo en que es fabricado, y el mantenimiento no puede producir confiabilidad más allá de la inherente en el diseño. Esto lleva a dos conclusiones:

Primeramente, si la capacidad inicial de un activo es mayor que el desempeño deseado, el mantenimiento debe ayudar a lograr el desempeño deseado. La mayoría de los equipos están adecuadamente especificados, diseñados y ensamblados, de modo que normalmente es posible desarrollar programas de mantenimiento satisfactorios, como se describió previamente. En otras palabras, en la mayoría de los casos, MCC nos ayuda a obtener el desempeño deseado del activo en su configuración actual.

En segundo lugar, si el desempeño deseado excede la capacidad inicial, entonces ninguna cantidad de mantenimiento podrá entregar el desempeño deseado. En estos casos el "mejor" mantenimiento no podrá solventar el problema, de modo que se hace necesario ver más allá del mantenimiento para encontrar las soluciones. En la mayoría de los casos, esto produce cambios en la capacidad de uno de los tres elementos del sistema:

a. Un cambio de la configuración física del activo (que normalmente se refiere a un "rediseño" o "modificación"). Esto es, cualquier acción que deba producir un cambio de diseño o un cambio en la lista de las partes. Esto incluye el cambio en las especificaciones de un componente, agregar un nuevo elemento, reemplazar una máquina completa por una fabricada de otra manera o de otro tipo, o una re-localización de una máquina. (Nótese que si cualquiera de tales cambios se hacen, el proceso MCC necesitará ser aplicado completamente al nuevo diseño para asegurar que continúe la función para la cual es pretendido).
b. Un cambio de un proceso o procedimiento que afecta la operación del activo.
c. Un cambio en la capacidad de una de las personas envueltas en la operación o mantenimiento del equipo (esto normalmente vincula el entrenamiento de la persona involucrada como un método de tratar con un modo de falla específico).

El término "cambio de especificaciones" se utiliza en esta guía para referirse a estas intervenciones porque normalmente se hacen una sola vez en cualquier sistema específico, como oposición a las tareas programadas las cuales se realizan en intervalos regulares. Los siguientes párrafos bosquejan los objetivos concretos de los cambios de especificaciones para cada una de las principales categorías de consecuencias de falla.

14.1.1 CONSECUENCIAS EN LA SEGURIDAD O EL AMBIENTE— Si un modo de falla puede afectar la seguridad o el ambiente y no se puede encontrar una tarea programada o una combinación de tareas que reduzca el riesgo de falla a un nivel tolerable, se debe cambiar algo, simplemente porque ahora estamos tratando con una amenaza a la seguridad o al ambiente que no puede ser prevenida adecuadamente. En estos casos, normalmente se emprende el rediseño con uno de estos dos objetivos:

a. Para reducir la probabilidad de ocurrencia de un modo de falla no anticipado a un nivel que sea tolerable. Esto se hace normalmente tanto por el reemplazo del componente afectado por uno más fuerte o más confiable, como por hacer posible anticipar el modo de falla.
b. Para cambiar el elemento o el proceso de manera que el modo de falla no tenga consecuencias en la seguridad o en el ambiente. Esto se hace en la mayoría de las casos por la instalación de un dispositivo protector adecuado. Recuerde que si se añade tal dispositivo, sus requerimientos de mantenimiento también se deben analizar.

Las consecuencias en la seguridad o en el ambiente también se pueden reducir eliminando las amenazas materiales de un proceso, o incluso por el abandono total de un proceso peligroso. En esencia, si el nivel de riesgo asociado con cualquier modo de falla se considera como intolerable, MCC nos obliga tanto a prevenir la ocurrencia del modo de falla como a verificar que el proceso sea

seguro. La alternativa es aceptar las condiciones que se conocen como inseguras o que contaminan el ambiente. Esto ya no es aceptable en la mayoría de las industrias.

14.1.2 FALLAS OCULTAS — En el caso de falla ocultas, se puede reducir el riesgo de una falla múltiple realizando cualquiera de los siguientes cambios de especificaciones:

a. Hacer la falla oculta evidente adicionando otro dispositivo: Ciertas fallas ocultas se pueden hacer evidentes por adición de otro dispositivo (tales como “Equipo de Prueba Incorporado,” o EPI), que atraiga la atención del operador hacia la falla oculta. Se necesita un cuidado especial en esta área, debido a que las fallas de funciones extras instaladas con este propósito, también tienden a ser ocultas. Si se adicionan muchas categorías de protección, se hace excesivamente difícil –si no imposible- definir tareas de detección de fallas sensatas. Un enfoque más efectivo consiste en sustituir una función evidente para la función oculta, como se explica en el siguiente párrafo.
b. Sustituir una función protectora cuya falla es evidente para la función oculta: En la mayoría de los casos esto significa sustituir un dispositivo o sistema cuya falla es genuinamente evidente por uno cuya falla no es evidente.
c. Sustituir el dispositivo protector existente por un dispositivo más confiable (pero todavía oculto): Un dispositivo más confiable (en otras palabras, uno que tenga un tiempo promedio entre fallas más alto) facultará a la organización para lograr uno de tres objetivos:

    1. Reducir la probabilidad de una falla múltiple sin cambiar los intervalos de las tareas de detección de fallas. Esto incrementa el nivel de protección.
    2. Incrementar el intervalo entre tareas sin cambiar la probabilidad de una falla múltiple. Esto reduce los requerimientos de los recursos.
    3. Reducir la probabilidad de la falla múltiple e incrementar los intervalos de tarea.

d. Duplicar la función oculta: Si no es posible encontrar un solo dispositivo protector que tenga un TPEF suficiente alto para entregar el nivel de protección deseado, aún es posible lograr cualquiera de los tres objetivos anteriores por la duplicación (o incluso triplicación) de la función oculta. Sin embargo; tenga presente que la función de todos estos dispositivos podría aún necesitar estar sujeta a un análisis con la finalidad de identificar una política de manejo de fallas adecuada.
e. Hacer lo posible para ejecutar una tarea (por ejemplo por la mejora del acceso al dispositivo o sistema protector).
f. Reducir la tasa de demanda de la función protegida: Dependiendo de los modos de falla que lleven a la demanda de protección, al cambio de la configuración física del sistema y/o al cambio en la capacidad del operador o mantenedor de tal manera que el sistema probablemente requiera la protección con menos frecuencia.

14.1.3 CONSECUENCIAS OPERACIONALES Y NO OPERACIONALES— Para algunos modos de falla con consecuencias operacionales y no operacionales, la política de manejo de fallas más costo-efectiva podría ser cambiar el sistema para reducir los costos totales. Para lograr esto, los cambios deben buscar:

a. Reducir el número de veces que ocurre el modo de falla, o posiblemente eliminarlo del todo, de nuevo, por el robustecimiento de algún elemento del sistema, o por hacerlo más confiable.
b. Reducir o eliminar las consecuencias del modo de falla (por ejemplo, proveyendo una capacidad auxiliar).
c. Realizar una tarea programada costo-efectiva (por ejemplo, haciendo un componente más accesible).

Note que en este caso, las modificaciones deben ser costo-justificadas, considerando que son compulsivas si no hay ninguna otra manera de reducir el riesgo de fallas que tengan consecuencias en la seguridad o el ambiente a un nivel tolerable.

14.2 Operar hasta Fallar— "Cualquier política de operar hasta fallar seleccionada debe satisfacer los criterios apropiados como sigue:

a. En casos donde la falla es oculta y no hay ninguna tarea programada apropiada, la falla múltiple asociada no debe tener consecuencias en la seguridad ni el ambiente.
b. En casos donde la falla es evidente y no hay ninguna tarea programada apropiada, el modo de falla asociado no debe tener consecuencias en la seguridad ni en el ambiente." (SAE JA1011, Sección 5.8.2)

En el caso de algunas fallas que son evidentes y que no afectan la seguridad o el ambiente, o que son ocultas y la falla múltiple no afecta la seguridad o el ambiente, la política de manejo de falla más costo-efectiva podría ser simplemente permitir que las fallas ocurran y entonces tomar los pasos apropiados para repararlas. En otras palabras, "operar hasta fallar" es válido sólo si:

a. No se puede encontrar una tarea programada conveniente para una falla oculta, y la falla múltiple asociada no tiene consecuencias en la seguridad o el ambiente, y
b. No se puede encontrar una tarea proactiva costo-efectiva para fallas con consecuencias operacionales y no operacionales.

15. Selección de la Política de Manejo de Fallas

15.1 Dos Aproximaciones — Las últimas tres preguntas en el proceso MCC, discutidas en las secciones de la 10 a la 14 de esta guía, vinculan la selección de las políticas de manejo de fallas adecuadas para cada modo de falla identificado en el AMEF. Se pueden utilizar dos aproximaciones distintas para seleccionar las políticas de manejo de fallas. La primera es una aproximación rigurosa y la segunda es una aproximación de diagrama de decisión.

La aproximación rigurosa es más completa y produce una política de manejo de fallas totalmente costo-optimizada para tratar con cada modo de falla en el AMEF. Los diagramas de decisión son populares ya que son más rápidos y más económicos que la aproximación rigurosa. Sin embargo; cualquier enfoque de diagrama de decisión debe direccionar totalmente las consecuencias en la seguridad y en el ambiente de cada modo de falla. También se debe tener presente que el uso de diagramas de decisiones introduce un elemento de sub-optimización al proceso de selección de la política de manejo de fallas, desde el punto de vista del costo.

Note que cuando se aplican estas aproximaciones, la mayoría de las decisiones se deben hacer en ausencia de datos completos. Esto puede llevar a la tentación de confiar excesivamente en la "lógica predefinida", en que las decisiones se hacen automáticamente si los datos comprensivos no se encuentran disponibles rápidamente. Sin embargo; la aplicación de tal lógica puede llevar a decisiones incorrectas, especialmente en la evaluación de las consecuencias. En la práctica, la visión se debe dirigir, si es posible, hacia las repercusiones de tolerar demasiada incertidumbre, entonces las acciones deben girar en torno al cambio de las consecuencias del modo de falla – antes que contar con las decisiones predefinidas.

15.2 Aproximación Rigurosa— La aproximación rigurosa para la selección de la política de manejo de fallas requiere que los usuarios, al evaluar las consecuencias económicas y en la seguridad/ambiente de cada modo de falla, consideren todas las opciones de políticas de manejo de fallas técnicamente factibles que se puedan aplicar a cada modo de falla, y seleccionar una política de manejo de fallas que se ajuste más efectivamente tanto a las consecuencias económicas como a las consecuencias en la seguridad/ambiente. Este enfoque se aplica en las siguientes fases:

a. Separar las fallas evidentes de las fallas ocultas.
b. Para cada falla evidente:

1. Establecer la probabilidad real de que el modo de falla pueda dañar o matar a alguien.
2. Establecer la probabilidad tolerable de que el modo de falla pueda dañar o matar a alguien.
3. Establecer la probabilidad real de que el modo de falla pueda violar un estándar o una regulación ambiental.
4. Establecer la probabilidad tolerable de que el modo de falla pueda violar ese estándar o regulación.
5. Establecer las consecuencias operacionales y no operacionales totales del modo de falla.
6. En el caso de modos de falla que puedan tener consecuencias en la seguridad o en el ambiente, y en los que la probabilidad real de incurrir en estas consecuencias es mayor que la probabilidad tolerable, la identificación de todas las políticas de manejo de fallas podría reducir la probabilidad a un nivel tolerable.
7. Identificar todas las políticas de manejo de fallas (si existen) que puedan ser menos costosas que las consecuencias económicas del modo de falla cuando se comparan en el mismo período de tiempo.
8. Seleccionar la política de manejo de fallas que se ajuste más costo-efectivamente a las consecuencias económicas y en la seguridad/ambiente del modo de falla.

c. Para cada falla oculta:

1. Establecer la probabilidad real que la falla múltiple asociada pueda dañar o matar a alguien.
2. Establecer la probabilidad tolerable de que la falla múltiple pueda dañar o matar a alguien.
3. Establecer la probabilidad real de que la falla múltiple pueda violar un estándar o una regulación ambiental.
4. Establecer la probabilidad tolerable de que la falla múltiple pueda violar ese estándar o regulación.
5. Establecer las consecuencias operacionales y no operacionales totales del modo de falla y de la falla múltiple asociada.
6. En el caso de fallas múltiples que puedan tener consecuencias en la seguridad o en el ambiente, y en las que la probabilidad real de incurrir en estas consecuencias es mayor que la probabilidad tolerable, la identificación de todas las políticas de manejo de fallas podrían reducir la probabilidad de la falla múltiple a un nivel tolerable.
7. Identificar todas las políticas de manejo de fallas (si existen) que podrían ser menos costosas que las consecuencias económicas del modo de falla y de la falla múltiple combinadas cuando se comparan en el mismo período de tiempo.
8. Seleccionar la política de manejo de fallas que se ajuste más costo-efectivamente a las consecuencias económicas y en la seguridad/ambiente del modo de falla y de la falla múltiple.

15.3 Aproximación del Diagrama de Decisión— Todas las aproximaciones hacia el MCC de diagrama de decisión que cumplen con SAE JA1011 están basadas en la suposición de que las consecuencias en la seguridad/ambiente deben estar previamente ajustadas con las consecuencias económicas. Otra suposición fundada en la mayoría de estos diagramas es que algunas categorías de las políticas de manejo de fallas siempre son más costo-efectivas que otras.

Estas dos suposiciones se utilizan para establecer las jerarquías en las cuales los usuarios están alentados a seleccionar una política de manejo de fallas desde la primera categoría en la jerarquía que se considere técnicamente factible y que valga la pena hacer. Las suposiciones claves que se hacen durante el establecimiento de tales jerarquías se discutirán en los párrafos siguientes.

NOTA— A lo largo de esta sección, “falla” se refiere al modo de falla o a una falla múltiple.

15.3.1 JERARQUÍA DE CONSECUENCIAS— Toda aproximación hacia el MCC de diagrama de decisión válida asume que si una política de manejo de fallas trata satisfactoriamente con una falla que tiene consecuencias en la seguridad o en el ambiente, entonces tratará satisfactoriamente con las consecuencias económicas (operacionales y no operacionales) de esta falla. En la mayoría de los casos, esta suposición es válida, pero no es verdadera en todos los casos.

El resultado de esta suposición es que estos diagramas de decisión para MCC válidos son construidos de tal manera que si se consideran intolerables las consecuencias en la seguridad o en el ambiente, entonces los usuarios están obligados a encontrar una política de manejo de fallas que reduzca las consecuencias en la seguridad o en el ambiente a un nivel tolerable sin considerar las consecuencias económicas de la falla. Esta aproximación es inherentemente conservadora, con esto se asegura que las consecuencias en la seguridad y en el ambiente de cada falla son tratadas con propiedad. Como resultado, esto lleva a un programa de mantenimiento bueno ambientalmente y seguro que contiene un pequeño número de políticas de manejo de fallas que son más costosas de lo que necesitan ser.

15.3.2 JERARQUÍA DE POLÍTICAS— Dos suposiciones claves se incorporan al diseño de la mayoría de los diagramas de decisión para MCC. La primera suposición es que algunas categorías de política de manejo de fallas son inherentemente más costo-efectivas que otras. La segunda suposición es que algunas son inherentemente más conservadoras que otras. Si un diagrama de decisión utiliza una aproximación jerárquica para la selección de la política, las siguientes jerarquías reflejan con más precisión estas suposiciones:

a. Para modos de falla evidentes que puedan afectar la seguridad o el ambiente, las políticas de manejo de fallas se consideran en el siguiente orden: tareas basadas en condición, tareas de desincorporación/restauración programadas, combinación de tareas (usualmente basadas en condición y desincorporación programada), cambio de especificaciones.
b. Para modos de falla evidentes que no puedan afectar la seguridad o el ambiente, las políticas de manejo de fallas se consideran en el siguiente orden: tareas basadas en condición, tareas de desincorporación/restauración programadas, mantenimiento no programado, cambio de especificaciones.
c. Para modos de falla ocultos en los que la falla múltiple pueda afectar la seguridad o el ambiente, las políticas de manejo de fallas se consideran en el siguiente orden: tareas basadas en condición, tareas de desincorporación/restauración programada, detección de fallas, mantenimiento no programado, cambio de especificaciones.
d. Para modos de falla oculta en los que la falla múltiple no pueda afectar la seguridad o el ambiente, las políticas de manejo de fallas se consideran en el siguiente orden: tareas basadas en condición, tareas de desincorporación/restauración programadas, detección de fallas, mantenimiento no programado, cambio de especificaciones.

Las razones para direccionar las políticas de manejo de fallas en esa secuencia se discuten en los siguientes párrafos.

15.3.2.1 Tareas Basadas en Condición— Las tareas basadas en condición se consideran en primer lugar en el proceso de selección de tareas, por las siguientes razones:

a. Se pueden desarrollar casi siempre sin mover el activo desde su posición de instalación y normalmente mientras está en operación, así ellas pocas veces interfieren con las operaciones.
b. Normalmente son más fáciles de organizar.
c. Ellas identifican las condiciones de las fallas potenciales específicas para que las acciones correctivas estén claramente definidas antes de que comience el trabajo. Esto reduce la cantidad de trabajos de reparación a efectuar, y permite que sean realizadas más rápidamente.

d. Por la identificación del equipo en el punto de falla potencial, permiten comprender casi toda su vida útil.

15.3.2.2 *Tareas de Desincorporación Programada y Restauración Programada*— Si no se puede encontrar una tarea basada en condición conveniente para una falla en particular, la próxima opción es una tareas de desincorporación programada y restauración programada. Las desventajas de la restauración programada y de la desincorporación programada son estas:

a. En casi todos los casos, sólo se pueden hacer cuando los elementos están parados y (normalmente) se envían al taller, así las tareas casi siempre afectan las operaciones de alguna manera;
b. La longevidad límite aplica a todos los elementos, así muchos elementos o componentes que puedan haber sobrevivido a longevidades mayores serán removidos; y
c. Las tareas de restauración involucran talleres de reparación, así ellas generan un trabajo mucho mayor que las tareas basadas en condición.

Como se mencionó en la sección 13.2 de esta guía, la restauración programada y la desincorporación programada normalmente se consideran juntas porque ellas tienen mucho en común. Cuando estas tareas se encuentran en la práctica, comúnmente es obvio que el componente involucrado deba manejarse por una desincorporación programada o una restauración programada. Sin embargo, en el caso de algunos modos de falla, ambas categorías de tareas pueden satisfacer el criterio para la factibilidad técnica. En esos casos, se debe seleccionar la más costo-efectiva de las dos.

15.3.2.3 Detección de Fallas— El mantenimiento proactivo exitoso previene las fallas de los elementos, por cuanto la detección de fallas acepta que se invertirá algún tiempo –aunque no demasiado- en un estado de falla. Esto significa que el mantenimiento proactivo es inherentemente más conservador (en otras palabras, más seguro) que la detección de fallas, así esta última sólo se debe especificar si no se encuentra una tarea proactiva más efectiva. Por esta razón, los diagramas de decisión para MCC deben anteponer siempre las tres categorías de tareas proactivas ante la detección de fallas en el proceso de selección de tareas.

15.3.2.4 Combinación de Tareas— Hasta este punto, los diagramas de decisión tratan de encontrar una sola tarea que se relacionará apropiadamente con las consecuencias del modo de falla en consideración. Sin embargo; como se mencionó en la sección 13.4, algunas veces ocurre que no se puede encontrar una sola tarea que por si misma reduzca el riesgo de falla a un nivel bajo tolerable. En este punto, podría ser apropiado buscar una combinación de tareas, como se explicó en la sección 13.4. La mayor desventaja de la combinación de tareas es que es inevitablemente más costosa que las tareas solas.

15.3.2.5 Operar hasta Fallar— Cuando se evalúa la efectividad de las tareas proactivas concebidas para tratar con los modos de falla que tienen consecuencias económicas, la comparación siempre se hace entre el costo de la tarea y los costos asociados con el modo de falla no anticipado. En estos casos, sólo se seleccionan las tareas que reducen los costos totales de la falla. Si no se puede encontrar tal tarea, permitir que el modo de falla ocurra sería menos costoso que el mantenimiento proactivo, y de ahora en adelante se debe seleccionar el permitir que ocurra el modo de falla (operar hasta fallar) como una política de manejo de fallas apropiada. (Si los costos de permitir que ocurra el modo de falla se consideran aún muy excesivos, entonces la única opción es implementar un cambio de especificaciones como se discutió previamente). Como se explicó en la sección 14.2 de esta guía, operar hasta fallar no es una opción para modos de falla solos o para fallas múltiples que tengan consecuencias en la seguridad o el ambiente.

15.3.2.6 Cambio de Especificaciones— La confiabilidad, el diseño, y el mantenimiento están relacionados intrínsecamente. Esto puede llevar a la tentación de realizar cambios de especificaciones a los

sistemas existentes (especialmente modificaciones a equipos) antes de considerar sus requerimientos de mantenimiento. De hecho, todos los diagramas de decisión para MCC consideran el mantenimiento antes de los cambios de especificaciones por cuatro razones, como sigue:

a. La mayoría de las modificaciones toman de seis meses a tres años desde su concepción hasta su cometido, dependiendo del costo y de la complejidad del nuevo diseño. Por otro lado, la persona de mantenimiento debe mantener el equipo tal como existe hoy, no como lo que debería estar allí o lo que podría estar allí algún tiempo en el futuro. Así que las realidades de hoy deben tratarse con anterioridad a los cambios de diseño de mañana.
b. La mayoría de las organizaciones encaran muchos más las oportunidades de mejora de diseño deseables que son física y económicamente factibles. Por enfocarse en las consecuencias de la falla, el MCC es de gran ayuda en el desarrollo de un conjunto racional de prioridades para estos proyectos, especialmente porque separa los que son esenciales de aquellos que son meramente deseables. Claramente, tales prioridades sólo se pueden establecer después que se ha completado la revisión.
c. Los cambios de especificaciones son costosos. Estos incluyen el costo de desarrollar la nueva idea (el diseño de una nueva máquina, la incorporación de un nuevo procedimiento operacional), el costo de llevar la idea a la realidad (la fabricación de una parte nueva, la compra de una nueva máquina, la compilación de un nuevo programa de entrenamiento). Adicionalmente se incurre en costos indirectos si el equipo o las personas tienen que estar fuera de servicio mientas se está implementando el cambio.
d. Existe un riesgo de que el cambio fallará en la eliminación o incluso en el alivio del problema que está supuesto a resolver. En algunos casos, puede incluso crear más problemas.

Por todas estas razones las aproximaciones de los diagramas de decisión hacia el MCC buscan obtener el desempeño deseado de cualquier sistema en su configuración actual antes de intentar cambiar la configuración del sistema.

15.3.3 APLICANDO LA APROXIMACIÓN DEL DIAGRAMA DE DECISIÓN HACIA EL MCC— Alrededor del mundo se utilizan muchos diagramas de decisión diferentes. Algunos de estos diagramas están conformados muy cercanamente a los principios discutidos previamente, mientras que otros divergen sustancialmente (en algunos casos, a tal magnitud que no cumplen en absoluto con SAE JA011). Algunos de estos diagramas son propios, mientras que otros son del dominio público. Por estas razones, esta Guía no transmite ningún diagrama de decisión específico. Sin embargo; sólo con propósitos ilustrativos, en las Figuras 16 y 17 se dan dos ejemplos de diagramas de decisión que cumplen con los principios discutidos en 15.3.1 y 15.3.2. (Note los comentarios en 18.6, acerca de la necesidad de entrenamiento antes de utilizar cualquier diagrama de decisión).

Estos diagramas de decisión se aplican típicamente en tres fases, como sigue:

a. Trabajando desde el principio, utilice el diagrama de decisión para determinar las categorías de consecuencias que aplican al modo de falla en consideración.
b. Luego trabajando la columna de consecuencias relevantes, utilice el criterio de factibilidad técnica discutido en las Secciones de la 12 a la 14 de esta guía para evaluar la factibilidad técnica de las posibles políticas de manejo de fallas en cada categoría.
c. Seleccione una política de manejo de fallas desde la primera categoría que satisfaga el criterio de factibilidad técnica y que tratará efectivamente con las consecuencias del modo de falla en consideración.

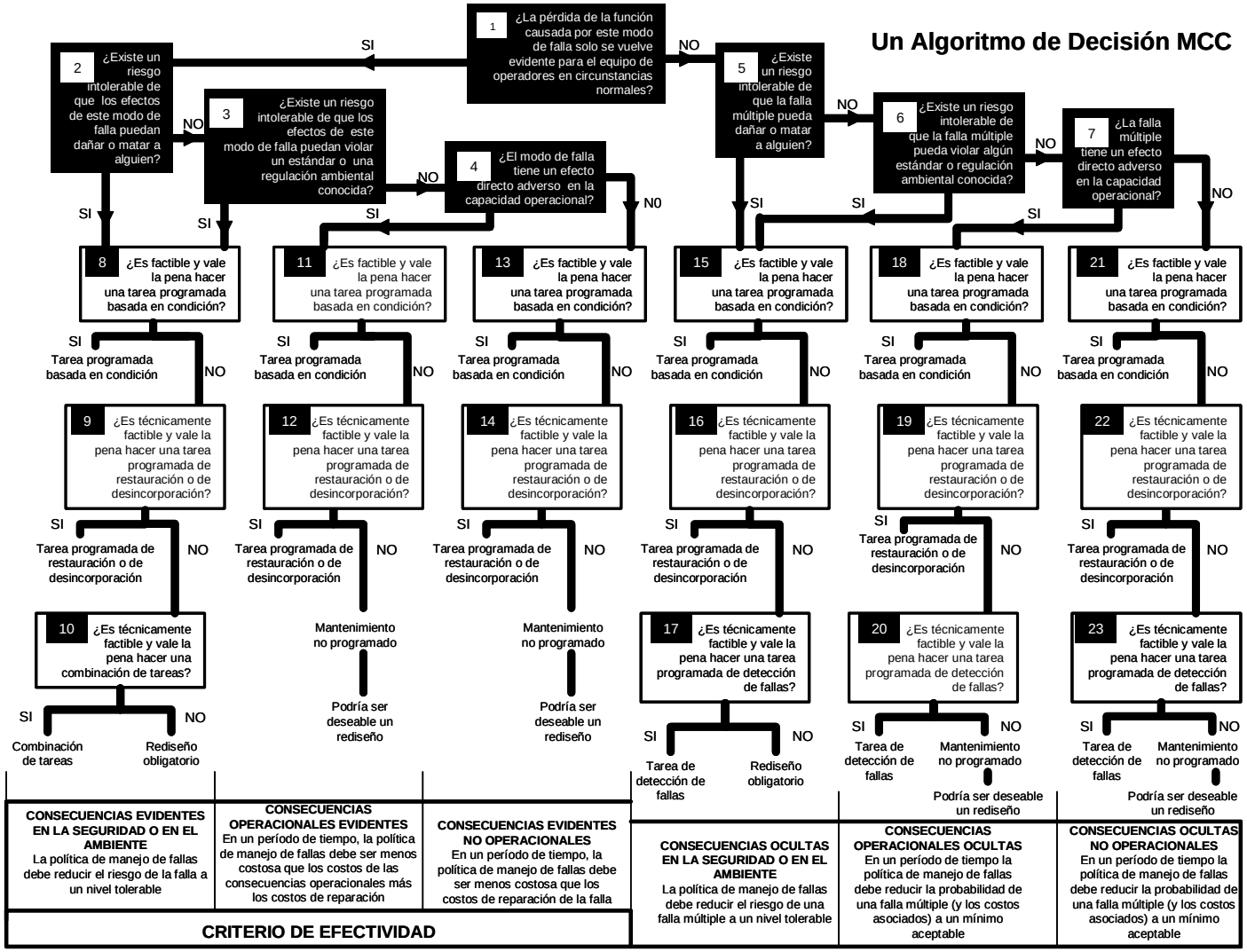

FIGURA 16— PRIMER EJEMPLO DE DIAGRAMA DE DECISIÓN

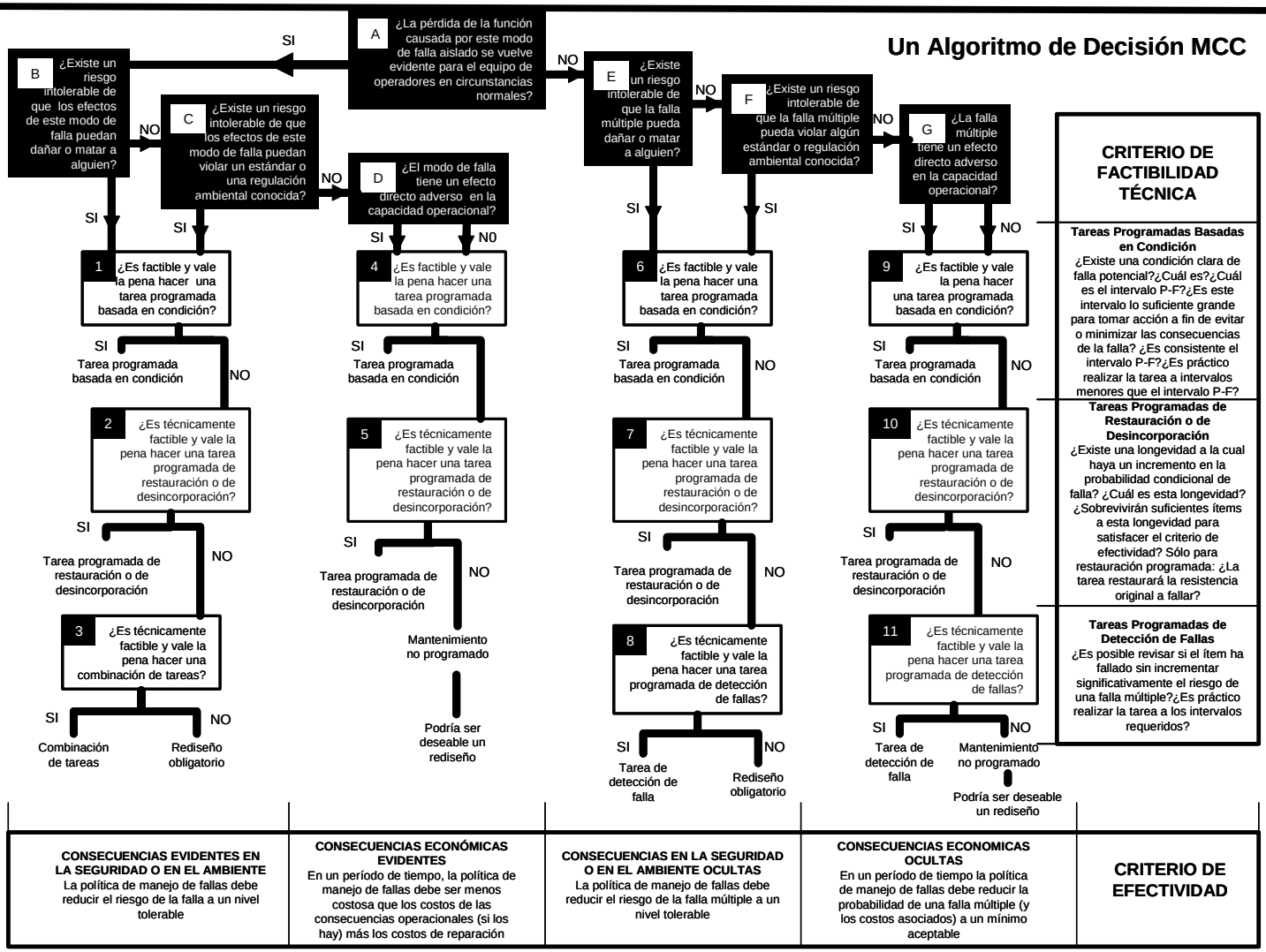

FIGURA 17— SEGUNDO EJEMPLO DE DIAGRAMA DE DECISIÓN

16. ***Un Programa de Vida —*** "Este documento reconoce que (a) Muchos de los datos usados en el análisis inicial son inherentemente imprecisos, y que los datos más precisos estarán disponibles en el tiempo, (b) La manera en la cual el activo es utilizado, junto a las expectativas de desempeño asociadas, también cambiarán con el tiempo, y (c) La tecnología de mantenimiento continúa evolucionando. De modo que, una revisión periódica es necesaria si el programa de manejo de activos del MCC derivado es asegurar que los activos continúen cumpliendo las expectativas funcionales actuales de sus dueños y usuarios." (SAE JA10111, sección 5.9.1)

"Por consiguiente cualquier proceso MCC debe proveer una revisión periódica de las decisiones y al mismo tiempo, de la información utilizada para soportar dichas decisiones. El proceso suele conducir de tal manera que una revisión debe asegurar que todas las siete preguntas de la sección 5 continúen siendo respondidas satisfactoriamente y en una manera consistente con el criterio que parte desde 5.1 hasta 5.8. [de SAE JA1011]." (SAE JA1011, sección 5.9.2)

Para asegurarse de que las siete preguntas de SAE JA1011 "continúan siendo respondidas satisfactoriamente y de manera consistente con el criterio que parte" de este documento, se deben responder preguntas específicas, incluyendo las siguientes:

a. Contexto operacional: ¿El contexto operacional del equipo ha cambiado suficiente para reemplazar alguna información registrada o las decisiones realizadas durante el intervalo inicial? (Por ejemplo, un cambio de una operación una guardia/5-días a una operación 24-horas/7-días, o viceversa.)
b. Expectativas operacionales: ¿Las expectativas operacionales han cambiado lo suficiente de modo que sea necesario revisar los estándares operacionales que fueron definidos durante el análisis inicial?
c. Modos de falla: Desde el análisis previo, ¿Ha resultado que algunos modos de falla existentes fuesen registrados incorrectamente, o han ocurrido algunos modos de falla no anticipados que deberían ser registrados?
d. Efectos de falla: ¿Algo debe ser agregado o cambiado en las descripciones de los efectos de falla? (Esto aplica especialmente a la evidencia de falla y los estimados de tiempos fuera de servicio.)
e. Consecuencias de falla: ¿Ha ocurrido algo que lleve a cualquier persona a creer que las consecuencias de falla se deben evaluar de una manera diferente? (Las posibilidades aquí incluyen cambios en las regulaciones ambientales, y el cambio en la percepción de los niveles tolerables de riesgo.)
f. Políticas de manejo de fallas: ¿Existe alguna razón para creer que alguna de las políticas de manejo de fallas seleccionada inicialmente ya no es apropiada?
g. Tareas programadas: ¿Alguien se ha concientizado de un método de desarrollo de una tarea programada que pueda ser superior a una de estas seleccionadas previamente? (en la mayoría de los casos, "superior" significa "más costo-efectiva", pero también podría significar técnicamente superior.)
h. Intervalos de tarea: ¿Existe alguna evidencia que sugiera que se deba cambiar la frecuencia de alguna tarea?
i. Ejecución de tarea: ¿Existe alguna razón que sugiera que una tarea o tareas se deban realizar por algún otro tipo de persona diferente a la seleccionada originalmente?
j. Modificaciones del activo: ¿El activo se ha modificado de modo que agregue o substraiga algunas funciones o modos de falla, o que cambie la adecuación de alguna política de manejo de fallas? (Se debe prestar atención especial a los sistemas de control y de protección.)

17. ***Formulación Matemática y Estadística—*** "Cualquier formulación estadística y matemática que se pueda utilizar en la aplicación del proceso (especialmente aquellos usados para computar los intervalos de algunas tareas) debe ser lógicamente robusta, y debe estar disponible y ser aprobada por el dueño o usuario del activo." (SAE JA1011, sección 5.10.1)

Los procesos MCC algunas veces utilizan formulaciones matemáticas y estadísticas, especialmente para computar intervalos de tareas. Por ejemplo, esta Guía describe la formulación matemática que puede ser utilizada para computar los intervalos a los cuales se deben desarrollar las tareas de detección de fallas, tal como las fórmulas que se encuentran en las secciones 13.3.3.3 y 13.3.3.4.

Además, algunas veces los datos están disponibles de modo que permiten usar varias formulaciones matemáticas para refinar las frecuencias a las cuales se deben desarrollar los diferentes tipos de tareas proactivas.

Antes que un proceso MCC que conforme a la SAE JA1011 adopte cualquier formulación matemática y estadística como esta, se deben conocer dos criterios claves: la formulación debe ser lógicamente robusta, y debe estar disponible y ser aprobada por el dueño o usuario del activo.

17.1 Lógicamente Robusta— La formulaciones deben ser "lógicamente robustas". Esto significa que deben ser consistentes con la comprensión del comportamiento y el deterioro del equipo que yace en los fundamentos del MCC. En particular, significa que las formulaciones no deben ser hechas bajo suposiciones inapropiadas acerca de los patrones de falla que aplican a modos de falla individuales que puedan afectar el activo en consideración, o acerca de las relaciones entre variables tales como longevidad, TPEF e intervalos P-F.

17.2 Disponible para el Dueño o Usuario— Para que la formulación matemática esté "disponible y sea aprobada por el dueño o usuario del activo," se deben encontrar dos condiciones.

Primero, el proveedor de la formulación debe estar disponible para mostrar la fórmula al usuario, demostrando como se derivó y las suposiciones en las cuales está basada, y explicar por qué la fórmula propuesta debe ser utilizada.

Segundo, el usuario o dueño del activo debe comprender lo suficiente acerca de los principios fundamentales del manejo del activo físico de modo que sea capaz de evaluar por sí mismo si la formulación es, de hecho apropiada.

18. Consideraciones Adicionales Importantes— SAE JA1011 describe el criterio técnico mínimo que cualquier proceso debe cumplir para ser llamado "MCC", cuando se aplica a un activo específico. Para que el MCC sea exitoso, es esencial direccionar los asuntos de gerencia y recursos que se discuten en esta sección de esta guía bajo los siguientes títulos:

a. Priorizar los activos y establecer objetivos.
b. Planificación.
c. Nivel de análisis y límites del activo.
d. Documentación técnica.
e. Organización.
f. Entrenamiento.
g. Rol del software computacional.
h. Recolección de datos.
i. Implementación.

18.1 Priorizar los Activos y Establecer Objetivos— Diferentes dueños o usuarios seleccionarán la aplicación de MCC a diferentes activos. Uno puede seleccionar aplicar MCC a todos los activos. Otro podría seleccionar aplicar ahora MCC a algunos activos o partes de activos, esperando aplicar MCC al resto eventualmente. Estas decisiones dependerán en gran medida de las metas del análisis MCC, así como también de la importancia de estas metas en relación a otras iniciativas que estén siendo aspiradas por el dueño o usuario del activo.

Los dueños o usuarios deben fijar prioridades entre los activos conscientemente, usando los criterios que sean apropiados para sus organizaciones. Al fijar estas prioridades, note que la aplicación del MCC toma tiempo y cuesta dinero.

Como resultado, antes de emplear recursos en una escala significativa, cualquier organización debe establecer los beneficios que espera en retorno de los recursos invertidos. En la práctica, el MCC realza la efectividad total de las organizaciones que lo utilizan, en una amplia variedad de áreas, incluyendo:

a. Seguridad.
b. Integridad ambiental.
c. Desempeño operacional.
d. Costo-efectividad.
e. Calidad del producto y servicio al consumidor.
f. Eficiencia del mantenimiento.
g. Motivación individual.
h. Trabajo en equipo.
i. Producción del personal.
j. Auditorías.

No sólo se deben direccionar estos puntos cuando se analiza la priorización, también se deben considerar en detalle con respecto a cada análisis. Específicamente, antes de embarcarse en un análisis MCC de algún activo o sistema específico es esencial establecer la magnitud con la cual se espera que cada análisis mejore el desempeño en alguna o en todas las áreas mencionadas anteriormente, y para rastrear cuán bien los mejora con respecto al costo total del análisis.

18.2 Planificación— Antes de analizar cada activo, se debe idear un plan comprensivo que direccione los siguientes puntos:

a. Decida exactamente cuales equipos serán cubiertos por el análisis, como se discutirá en 18.3
b. Establezca los objetivos del análisis (cuantificando en donde sea posible), y acuerde cuando y como se medirán sus logros.
c. Estime cuánto tiempo se requerirá para realizar el análisis (horas hombre y tiempo transcurrido).
d. Decida el conjunto de habilidades que estarán involucradas en el proceso de análisis, y entonces identifique los participantes específicos por nombre.
e. Prescriba el entrenamiento apropiado en MCC para aquellos que no lo hayan recibido, como se discute más adelante.
f. Establezca las facilidades físicas apropiadas para que se realice el proceso.
g. Decida cuando y por quienes será revisado y aprobado el análisis. Esto trae consigo la seguridad de que el proceso MCC se ha aplicado correctamente, y que la información y las decisiones son aceptables para el dueño/usuario del activo.
h. Decida cuando, donde y por quienes serán implementadas las recomendaciones.
i. Instituya que el análisis se mantenga al día, como se discutió en la Sección 16 de esta guía.

18.3 Nivel de Análisis y Límites del Activo— Antes de analizar cualquier activo, es necesario establecer el nivel al cual será desarrollado el análisis (a veces llamado el nivel estipulado), y definir los límites del sistema.

Si se ha descrito una jerarquía de activos extensa y se ha tomado la decisión de analizar un activo particular a un nivel determinado, entonces el “sistema” normalmente de manera automática abarca todos los activos por debajo de este sistema en la jerarquía de activos. (Si no existe una jerarquía de activos, seleccionar una es útil pero no esencial.) Las únicas excepciones son subsistemas que se

hayan juzgado tan insignificantes que no serán analizados en absoluto, o subsistemas muy complejos que se coloquen a un lado para un análisis separado.

El nivel de análisis es el nivel estipulado de los equipos físicos a los que se les hará el análisis. Aunque no existe el mejor nivel para desarrollar un análisis MCC, normalmente existe un nivel óptimo (este nivel puede variar de sistema a sistema dentro de la jerarquía del activo). El nivel óptimo del análisis dependerá de varios factores. Estos factores incluyen, pero no se limitan a, si se realizará un análisis más completo o más limitado, si existe algún análisis previo y el nivel al cual fue desarrollado, y la complejidad del elemento al que se dirige.

Se debe ser cuidadoso al seleccionar el nivel del análisis que permitirá identificar las funciones de un modo razonablemente fácil de comprender, permitirá la identificación de un número manejable de modos de falla por función, y permitirá evaluar las consecuencias de falla sin dificultad. Un análisis a un nivel demasiado bajo incurrirá en trabajo extra de análisis y/o de tareas de producción, y también hará difícil la identificación de las funciones y los estándares de operación asociados, y hará mucho más difícil evaluar las consecuencias rápidamente. Un análisis a un nivel muy alto requiere la identificación de demasiados modos de falla por función, lo cual incrementa la probabilidad de que muchos modos de falla se pasarán por alto completamente. La opción lógica, entonces, es seleccionar un nivel intermedio al cual sea posible identificar un número manejable de modos de falla y evaluar sus consecuencias sensiblemente.

Cuando se aplica MCC a algún activo o sistema, por supuesto es importante definir claramente donde el "sistema" se comenzará a analizar y donde se terminará de analizar. Se debe tener cuidado para asegurar que los activos o componentes que se encuentran en los límites del análisis no "caigan entre las grietas". Esto aplica especialmente a elementos como válvulas y bridas.

18.4 Documentación Técnica— Antes de analizar algún sistema o subsistema en particular, es extremadamente útil obtener cualquier documentación que pueda estar disponible y que describa la configuración física del activo, sus componentes mayores y cómo trabaja.

Dependiendo de la complejidad del sistema y de cuan bien es entendido por quienes desarrollan el análisis, estos documentos podrían incluir algunos o todos los siguientes:

a. Planos de arreglo generales.
b. Diagramas de tuberías y de cableado, los cuales incluyen diagramas de proceso y de instrumentación.
c. Manuales de operación y mantenimiento.
d. Documentos de soporte de diseño.
e. Lista de partes.

Cuando no está disponible esta documentación, normalmente se puede obtener de los diseñadores del sistema y/o vendedores/fabricantes. La existencia de esta documentación normalmente debe ser suficiente para completar un análisis MCC. Si no existe una documentación especifica (especialmente planos), sólo se deben crear si hacen que el análisis sea significativamente más exacto, y/o más fácil de completar.

18.5 Organización— Cualquier entidad que decida aplicar MCC a algún activo debe partir de una organización que incorpore los siguientes elementos:

a. Una persona o grupo de personas quienes se responsabilizarán de que el proceso MCC será utilizado cumpliendo con la norma SAE JA1011, y de que se establezcan planes claros acerca de qué será analizado (vea la sección 18.1), cuando será analizado y por quienes.
b. Una persona o grupo de personas quienes serán responsables de asegurar que los activos seleccionados sean analizados como se planificó.

c. Una persona o grupo de personas que lideren la aplicación del proceso.
d. Una persona que estará disponible para proveer la información y asistir en la toma de decisiones (representantes del dueño/usuario del activo, operadores, mantenedores, representantes de los diseñadores o vendedores (si es necesario), etc.).
e. Las facilidades físicas requeridas para llevar a cabo el análisis (oficinas, salones de reuniones, equipos de computación y software, etc.)

18.6 Entrenamiento— El proceso MCC incluye muchos conceptos que son nuevos para la mayoría de las personas, así, cualquier persona que desee aplicar MCC necesita aprender que significan estos conceptos, y como se acoplan juntos, antes de que puedan utilizar el proceso de manera segura.

Como resultado, se deben definir claramente los requerimientos de entrenamiento. Esto es esencial para asegurar que el proceso MCC se aplique correctamente, y que los resultados se puedan ver confiadamente. La cantidad de entrenamiento que requieren los miembros del equipo MCC variará de acuerdo a sus roles.

Para las personas que manejarán la aplicación del proceso, quienes participan como proveedores de la información, o quienes estarán involucrados en la implementación de los resultados de cada análisis, normalmente bastará con un curso formal de no menos de tres días de duración.

Para las personas que liderarán la aplicación del proceso (“analistas” o “facilitadores”), se requiere un entrenamiento más extenso. Este entrenamiento debe tomar la forma de mentor en sitio, quizás complementado por un entrenamiento formal extenso, hasta que el aprendiz sea competente en todas las habilidades requeridas.

18.7 Rol del Software Computacional— Durante un análisis MCC el hecho de almacenar la información recolectada y las decisiones tomadas en una base de datos computarizada le brinda mayor rapidez. De hecho, si se analizarán un gran número de activos, utilizar una computadora con este propósito es casi esencial. Un computador también se puede usar para asistir en lo siguiente:

a. Clasificar las tareas propuestas por intervalo y habilidades fijadas.
b. Revisar y refinar los análisis en la medida que se aprende y que cambia el contexto operacional.
c. Asistir con el desarrollo de cálculos estadísticos y matemáticos más complejos.
d. Generar una variedad de otro tipo de reportes (modos de falla por categoría de consecuencia, tareas por categoría de tareas, y así sucesivamente.)

El uso inapropiado de un computador para manejar el proceso podría tener una fuerte influencia negativa en la percepción del MCC. El énfasis exagerado en un computador significa que el MCC comience a ser visto como un ejercicio mecánico en la construcción de una base de datos, antes que como una exploración de las necesidades reales del activo en revisión.

18.8 Recolección de los Datos— Cuando se aplica MCC a algún activo en particular, existen cincos tipos de datos históricos que juegan un papel importante:

a. Datos históricos de las fallas, como se discutió en la sección 8.4.
b. Datos históricos del desempeño del activo, y los costos de operación y mantenimiento asociados.
c. Datos históricos del desarrollo del mantenimiento programado.
d. Tareas de mantenimiento programadas existentes, como se discutió en la sección 8.4.
e. Datos de otras cosas tales como consecuencias de falla, las maneras en las cuales el activo se degrada con el tiempo, y así sucesivamente.

En la mayoría de los casos los datos son generados, capturados, y registrados por los dueños/usuarios del activo, aunque en algunos casos los datos suplementarios pueden ser proporcionados por vendedores/fabricantes o usuarios de equipos similares. Para mantener estos datos actualizados, los sistemas se deben disponer para registrar todos estos tipos de datos, especialmente todos los modos de falla que realmente ocurren en la práctica. (Nótese que tales sistemas de registro deben hacer énfasis tanto en las causas de las fallas funcionales, y en las consecuencias asociadas (tales como el tiempo fuera de servicio del equipo), como en las acciones tomadas para repararlas.

En algunos casos, especialmente con sistemas complejos y arriesgados que involucran cantidades sustanciales de nueva tecnología, simplemente no existen los datos adecuados acerca de qué modos podrían ocurrir y con que frecuencia. En situaciones en las cuales las consecuencias de tal incertidumbre no se puede tolerar, se debe considerar seriamente el cambio de las consecuencias (en otras palabras, reconfigurando el sistema, o la manera en la cual es operado, de tal modo que las consecuencias de tal incertidumbre se puedan reducir a un nivel tolerable).

18.9 Implementación— Una vez que se ha completado un análisis MCC (y subsecuentes actualizaciones), se deben implementar los resultados. La implementación exitosa requiere la atención cuidadosa de cinco pasos claves:

a. Auditoría MCC: Toda recomendación debe ser aprobada formalmente (auditada) por los gerentes con responsabilidad sobre los activos. Esta auditoría se debe llevar a cabo en el contexto del MCC.
b. Descripciones de trabajos programados: las tareas derivadas del MCC finalmente se deben describir con suficiente detalle para asegurar que la tarea se hará correctamente por cualquier persona que la ejecute.
c. Cambio de especificaciones: todos los cambios de especificaciones recomendados se deben describir con suficiente detalle para asegurar que serán implementados correctamente.
d. Planificación y ejecución de las tareas programadas: Las tareas deben ser acopladas en bloques de trabajo ejecutables. Entonces se deben tomar los pasos para asegurar que estos bloques de trabajo sean desarrollados por las personas correctas en el momento justo y de la manera adecuada, y para asegurar que cualquier trabajo levantado desde las tareas se trate apropiadamente. Esto requerirá un sistema de programación y de planificación apropiado.

19. Notas

19.1 Palabras Claves— mantenimiento basado en condición, mantenimiento predictivo, mantenimiento preventivo, mantenimiento proactivo, MCC, mantenimiento centrado en confiabilidad, mantenimiento programado.

PREPARADO POR EL SUBCOMITÉ MCC SAE G-11 DEL
COMITÉ DE SOPORTABILIDAD SAE G-11

SAE JA1012 Issued JAN2002 (Traducción)

Razón— No aplicable.

Relación de la Norma SAE a la Norma ISO— No aplicable.

Aplicación— SAE JA1012 ("A Guide to the Reliability-Centered Maintenance (RCM) Standard") amplifica y clarifica cada uno de los criterios claves listados en SAE JA1011 ("Evaluation Criteria for RCM Programs"), y resume puntos adicionales que se deben dirigir para aplicar MCC exitosamente.

Sección de Referencias

SAE JA1011—Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes

Nowlan, F. Stanley, and Howard F. Heap, "Reliability-Centered Maintenance," Department of Defense, Washington, D.C. 1978. Report Number AD-A066579.

NAVAIR 00-25-403— "Guidelines for the Naval Aviation Reliability Centered Maintenance Process" (U.S. Naval Air Systems Command)

MIL-P-24534— "Planned Maintenance System: Development of Maintenance Requirement Cards, Maintenance Index Pages, and Associated Documentation" (U.S. Naval Sea Systems Command)

Moubray, John, "Reliability-Centered Maintenance," 1997

NES 45— Naval Engineering Standard 45, "Requirements for the Application of Reliability-Centred Maintenance Techniques to HM Ships, Royal Fleet Auxiliaries and other Naval Auxiliary Vessels" (Restricted-Commercial)

Anderson, Ronald T. and Neri, Lewis, "Reliability-Centered Maintenance: Management and Engineering Methods," Elsevier Applied Science, London and New York, 1990

Andrews, J.D. and Moss, T.R., "Reliability and Risk Assessment," Longman, Harlow, Essex (UK), 1993

Blanchard, B.S., Verma, D., and Peterson, E.L., "Maintainability: A Key to Effective Serviceability and Maintenance Management," John Wiley and Sons, New York, 1995

Cox, S.J. and Tait, N.R.S., "Reliability, Safety and Risk Management," Butterworth Heinemann, Oxford, 1991

"Dependability Management— Part 3-11: Application Guide— Reliability Centred Maintenance," International Electrotechnical Commission, Geneva, Document No. 56/651/FDIS.

Jones, Richard B., "Risk-Based Management: A Reliability-Centered Approach," Gulf Publishing Company, Houston, TX, 1995

MSG-3, "Maintenance Program Development Document," Air transport Association, Washington DC, Revision 2 1993

"Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis," Department of Defense, Washington, DC, Military Standard MIL-DTD. 1629A, Notice 2, 1984

"Reliability Centered Maintenance for Aircraft, Engines, and Equipment, United States Air Force," MIL-STD-1843 (NOTE: Cancelled without Replacement, August 1995)

"Reliability-Centered Maintenance Requirements for Naval Aircraft, Weapons Systems and Support Equipment," U.S. Naval Air Systems Command, MIL-HDBK 2173(AS). (NOTE: canceled without replacement, August 2001.)

Smith, Anthony M., "Reliability Centered Maintenance," McGraw-Hill, New York, 1993

Zwingelstein, G., "Reliability Centered Maintenance, A Practical Guide for Implementation," Hermés,Paris, 1996

Desarrollado por el Subcomité MCC SAE G11

Patrocinado por el Comité de Soportabildad SAE G11