# MEJORA DE LA PERFORMANCE Y DISMINUCIÓN DEL RIESGO: METODOLOGÍA PARA LA APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE ANÁLISIS PROBABILÍSTICO

**J. E. Núñez Mc Leod y S. S. Rivera**
jnmcleod@cediac.uncu.edu.ar y srivera@cediac.uncu.edu.ar
Instituto CEDIAC – Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de Cuyo
CC 405 – (5500) Mendoza – Argentina

## 1. Resumen

En el presente trabajo se expone una metodología para la utilización de técnicas de análisis probabilístico de riesgos que por medios cuantitativos determinan las acciones a realizar para la mejora de la performance de un sistema en conjunto con la disminución del riesgo (definido específicamente para cada caso). La metodología reúne en forma consistente la conformación de una Base de Datos de Confiabilidad de Componentes específica de cada planta, el Análisis de Modos, Efectos y Criticidad de Fallas, y el Análisis de Árboles de Fallas. Como resultado de la aplicación de esta metodología se obtienen principalmente conclusiones orientadas a operación y mantenimiento; pero también para niveles superiores de decisión enfocadas en la mejora de la performance y la disminución del riesgo de la instalación.
Esta metodología está basada en la experiencia acumulada en la aplicación de diversas técnicas tanto en instalaciones nucleares como en ciclos combinados y de cogeneración. La utilización de la misma para la implementación de un esquema de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad en estas últimas, ha permitido demostrar su aplicabilidad.

## 2. Introducción

Durante los últimos 50 años grandes avances se han logrado en el diseño de sistemas productivos y de maquinaria, que han permitido alcanzar niveles de producción superlativos. Pero en este proceso fueron tratadas en forma secundaria las operaciones y el mantenimiento (O&M)[1].

Debido al avance de los sistemas de control automático y al aumento en la complejidad de los sistemas tecnológicos la mejora de performance y la disminución del riesgo (interpretado en forma amplia) se han convertido en el foco de una serie de desarrollos en cuanto a técnicas de análisis. Esto se alinea con la necesidad de un mejor entendimiento del por qué de las fallas, de las posibles consecuencias de estas y de las medidas que se pueden tomar para evitarlas o al menos mitigarlas.

Así, actualmente se tiene la posibilidad de avanzar en O&M para lograr una mejora de la performance y disminuir el riesgo de las instalaciones industriales. En este sentido durante la década de los ‘90s se vio la rápida difusión y aplicación de dos técnicas desarrolladas previamente en el área de la aviación comercial y en la industria automotriz japonesa: el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (Reliability-Centered Maintenance, RCM) y el Mantenimiento Productivo Total (Total Productive Maintenance, TPM).

Mientras que TPM se presenta como un concepto más amorfo basado en los círculos de calidad japoneses[2], el RCM es un enfoque con bases en análisis de ingeniería. Como tal es ideal para la integración con técnicas de análisis que avancen en los aspectos de O&M que etapa tras etapa de análisis se vuelvan relevantes. Esto es debido a que por ejemplo RCM no tiene en cuenta organicamente herramientas específicas para abordar la dimensión humana en el mantenimiento.

Intentos de una incorporación metodológica en el marco RCM se han realizado. De éstos es destacable el trabajo de J.C. Duthie et al., 1998[3] quien incorpora en la metodología el modelo completo obtenido de un Análisis Probabilístico de Riesgos (Probabilistic Risk Analysis, PRA) y lo utiliza para evaluar el impacto en el riesgo de los cambios en las estrategias de mantenimiento. Sin embargo sólo utiliza el modelo generado en el PRA y no toda la potencialidad de las herramientas de análisis que fueron utilizadas en su generación.

En este trabajo se presenta una metodología integrada que permite la incorporación gradual de herramientas de análisis y se desarrolla la primera fase para la implementación de un enfoque RCM para la mejora de la performance y la disminución del riesgo de una instalación industrial.

## 3. Incorporación de Técnicas de Análisis

La figura 1 muestra nuestra propuesta de incorporación de técnicas de análisis por etapas. La idea es ir incorporando herramientas, realizando los análisis correspondientes y situando a la instalación industrial en un nuevo estadío de manejo de sus propias complejidades. A partir de este se vuelven relevantes nuevos aspectos y que requerirán la incorporación de nuevas herramientas, así hasta completar el espectro de complejidades que se pueden abordar.

Este enfoque constructivista es netamente proactivo y cumple completamente con las expectativas de los responsables de O&M.

El estadío 0 es la base necesaria para aplicación de las diversas herramientas de análisis. Está constituido por la documentación técnica que incluye la documentación del proveedor, la información generada en la instalación por la operación de los equipos y hasta los esquemas de mantenimiento. También se consideran los reportes de eventos anormales, los reportes de mantenimiento y los reportes de operación, como así también cualquier otra información que documente la instalación.

El primer estadío es la realización de Análisis de Modos y Efectos de Falla[i] (Failure Mode and Effects Analysis, FMEA[4,5,6]) y la construcción de una Base de Datos de Confiabilidad de Componentes (Reliability Database, RDB). Esta última tiene varios propósitos entre los que podemos mencionar la cuantificación de los resultados de la aplicación del nuevo esquema de mantenimiento y posibilidad de obtener un listado ordenado por importancias de los diferentes modos de falla de los sistemas a partir de los Análisis de Árboles de Fallas[7,8].

[i] En un principio se distinguía entre FMEA y FMECA (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis), actualmente usamos el primer término incluyendo al segundo.

El segundo estadío se nutre de la información generada en el primero para llevar adelante el estudio de causa raíz de aquellos incidentes que los requieran y para la construcción de los árboles de falla para los diferentes eventos indeseados. Las tasas de fallas aportadas por la RDB permiten la cuantificación de los árboles de fallas obteniendo la probabilidad de falla del sistema y otra información fundamental para armar los esquemas de mantenimiento que serán expuestos más adelante. Asimismo puede juzgarse necesario la contrucción de diagramas de bloque de confiabilidad[9,10] (Reliability Block Diagram, RBD) dependiendo de las necesidades de aseguramiento de un determinado nivel de disponibilidad.

Los estadíos 1 y 2 se pueden considerar básicos en una implementación adecuada de RCM (Integración Básica), mientras que los estadíos 3 y 4 son parte de una estrategia avanzada (Integración Avanzada). Así en el estadío 3 se incorporan el análisis de eventos iniciantes[11], el análisis de árboles de eventos[11] y el análisis de confiabilidad humana[11,12,13] los cuales permiten determinar los eventos iniciantes[ii] más probables a los que se encuentra sometida la instalación, la secuencia de actuación bajo diferentes escenarios de los sistemas de protección o mitigación obteniendo los diferentes estados de planta[iii] finales y sus correspondientes frecuencias.

Finalmente en el estadío 4 se accede al nivel superior de análisis, permitiendo un estudio de los diferentes estados de planta encontrados que permite realizar un proceso de reingeniería integral de la instalación y por otro lado se cuenta con un modelo completo de la instalación para realizar procesos de optimización global[14], que tengan en cuenta no sólo el tipo y la redundancia de los componentes, sino los esquemas de mantenimiento y la necesidad de supervisión de diversas tareas de mantenimiento o prueba de sistemas o subsistemas.

En el resto del trabajo desarrollaremos con detalle las acciones que deben ser realizadas para poder cumplir con los estadíos 1 y 2, completando un esquema básico de implementación de RCM. El mismo está basado en la experiencia acumulada en diversas instalaciones y no incluirá RBD.

## 4. Integración Básica

Según el SAE-JA1011[15], para que un proceso sea denominado RCM debe responder satisfactoriamente siete preguntas, las cuales son:

i. ¿Cuales son las funciones y los estándares de funcionamiento deseados asociados al activo en su actual contexto de funcionamiento? (funciones)
ii. ¿De que maneras puede fallar para cumplir con sus funciones? (fallas funcionales)
iii. ¿Qué causa cada falla funcional? (modos de falla)
iv. ¿Qué sucede cuando cada falla ocurre? (efectos de fallas)
v. ¿En qué forma cada falla importa? (consecuencias de fallas)
vi. ¿Qué debería hacerse para predecir o prevenir cada falla? (tareas proactivas e intervalo de tareas)

[ii] Un evento iniciante es aquel que sirve como precursor de un accidente, desde un punto de vista probabilístico reduce los márgenes de seguridad disponibles para la prevención de accidentes.
[iii] Un estado de planta representa las condiciones en las que quedó una instalación luego de la ocurrencia de un evento iniciante.

vii. ¿Qué debería hacerse si una adecuada tarea proactiva no puede encontrarse? (acciones por defecto)

Para responder a estas preguntas y siguiendo las recomendaciones del *Applications of probabilistic safety assessment (PSA) for nuclear power plants*, IAEA-TECDOC-1200[16] se han seleccionado dos técnicas de análisis de intensiva aplicación en diferentes áreas tecnológicas: el Análisis de Modos y Efectos de Fallas (Failure Mode, Effects and Analysis, FMEA) y el Análisis de Árboles de Fallas (Fault Tree Analysis, FTA). Para que éste último pueda ser aplicado cuantitativamente debe realizarse previamente un relevamiento de los datos de confiabilidad de los componentes[17] que permita obtener las tasas de fallas de cada uno de los modos de falla que se incorporen al análisis.

La combinación de FMEA y FTA, responde a varias necesidades pero la primera que resalta es la de encontrar el impacto que pueden tener fallas que por si solas son irrelevantes pero que en conjuntos de 2 o 3 pueden tener consecuencias importantes. El FMEA es una técnica que permite tratar sólo fallas simples, mientras que el FTA informa de los conjuntos de fallas que provocan los eventos indeseados. Por su parte el FTA se construye a partir de los modos de falla declarados en la tabla del FMEA.

### 4.1. Análisis de Modos y Efectos de Fallas

Existen diferentes tipos de FMEAs[18] (orientados a diseños, a sistemas, a procedimientos, etc.) y diferentes enfoques (top-down y bottom-up), su exposición esta fuera del alcance de este trabajo. Nos concentraremos en el desarrollo de un FMEA de sistemas. En la Tabla 1 se puede observar el formulario propuesto.

El Análisis de Modos y Efectos de Fallas puede ser llevado a cabo siguiendo los siguientes pasos básicos.

4.1.1. Revisión del Proceso.

Esta revisión del proceso es fundamental para nivelar los conceptos que tienen los integrantes del grupo. Esto además de la información técnica de base (por ej. un diagrama de instrumentación y control) puede requerir un recorrido por la planta.

4.1.2. Proposición de potenciales modos de falla.

Discriminaremos dos formas de organizar esta etapa. La primera consiste en generar todos los posibles modos de falla para un subsistema y luego agruparlos para su estudio. La segunda consiste en seguir el sistema mediante un diagrama y a medida que se encuentran los componentes proponer todos los modos de falla posibles, analizándolos a continuación. El segundo esquema se adapta mejor a grandes sistemas y grupos nuevos en FMEA. En esta etapa es donde se deberán discutir con fundamentos y sin imposiciones la factibilidad de los modos de fallas propuestos. Desde que ciertos modos de falla deberán ser descartados por “no creibles”, “imposibles”, “improbables”, etc.

4.1.3. Potenciales efectos

A partir de un modo de falla se determina el o los efectos potenciales. Se deberá determinar claramente que tipos de efectos se consideran relevantes. Así por ejemplo se puede definir que los efectos que no afecten al sistema no se consideran relevantes. O qué efectos que no perjudiquen al producto no se consideran relevantes.

4.1.4. Asignación de niveles de Severidad para cada efecto

En este paso lo que se meritúa es la seriedad del efecto sobre el sistema, independientemente del modo de falla que lo provoca. Así mismo si un modo de falla genera más de un efecto, cada uno de ellos debe ser merituado.

4.1.5. Determinar la/s causa/s para el modo de falla

Cabe aclarar que lo que se busca es la causa raíz .

4.1.6. Asignación de una frecuencia de ocurrencia

La frecuencia de ocurrencia debería surgir de la información histórica de la planta, basada en los registros de operación y/o de mantenimiento. Si esto no es posible el grupo deberá realizar una estimación basada en la experiencia acumulada.

4.1.7. Forma de detección

Se debe incorporar al FMEA la forma en que cada falla o sus efectos son detectados. Es importante entender que el hecho que una determinada falla o su efecto tenga una alarma asociada no culmina con el análisis. Se debe asegurar que la alarma se activa en sala de control, ya que se presentan casos en los cuales algunas alarmas suenan localmente y no son percibidas por el operador hasta que éste inicia una ronda.

4.1.8. Nivel de Detección

El siguiente paso es cuantificar la forma de detección.

4.1.9. Riesgo

Este valor surge del producto de la Severidad por la frecuencia de Ocurrencia y por el nivel de Detección.

R = Severidad x Ocurrencia x Detección

Este valor por sí solo no tiene significado. Cobra valor en su comparación con el Riesgo de los otros modos de falla y permite determinar sobre cuales principalmente se deben realizar esfuerzos para lograr la mayor disminución global del Riesgo. Para facilitar la selección se puede utilizar un Diagrama de Pareto y fijar un valor de umbral (también conocido como valor de corte) que define que modos de falla con un valor inferior a éste no serán analizados.

4.1.10. Acción recomendada

La o las acciones recomendadas deben surgir del consenso del grupo y deben quedar claramente expresadas en el FMEA. El ideal de recomendación es aquella que permite eliminar la ocurrencia del modo de falla. Normalmente esto no es factible y entonces se debe analizar cada factor del riesgo para ver como podemos disminuir su valor.

Los factores deberían ser analizados en la secuencia Efecto-Causa-Detección. Es decir en primer lugar analizar las alternativas para la disminución del Efecto del modo de falla en el sistema. Las alternativas que se pueden plantear dependerán de diversos factores como: el costo de una parada de planta (costos por interrumpción de la producción, de incumplimiento de contratos con terceros, problemas con entes reguladores, etc), la posibilidad de disminuir la producción transitoriamente, el capital disponible para mejoras, etc. De la discusión se puede concluir en una recomendación para la construcción de un by-

pass, en el cambio del tipo de componente, en la instalación de un sistema de respaldo, en el cambio del tipo de instrumentación, etc. Luego que la recomendación ha sido acordada un nuevo valor de Severidad se genera.

A continuación se analiza la Causa del modo de falla tanto si se ha hecho una recomendación en el paso previo, como si no se hizo. El objetivo es tratar de disminuir la frecuencia de ocurrencia de la causa. Las recomendaciones se orientan a mejorar las barreras tanto físicas como por procedimientos (operativos o de mantenimiento). Así por ejemplo en el caso de exceso de partículas en el ambiente productoras de abrasión en uno o más componentes, recomendaciones sobre el tipo de filtro o sobre el tipo de mantenimiento pueden conducir a una mejora de la situación. Con la recomendación acordada se genera un nuevo valor de Ocurrencia.

El último paso consiste en analizar la forma de Detección. Una detección temprana puede servir para disminuir los efectos de la manifestación del modo de falla. La orientación a mensurar las Causas Raíces de los modos de falla antes que los efectos de éstos, permite la confección de procedimientos que pueden minimizar su impacto en el sistema productivo.

Por otro lado al analizar estados operativos del sistema se puede concluir frente a un determinado modo de falla con una acción de mitigación , la cual puede ser automática o requerir la intervención del operador. Esta acción de mitigación es una valiosa conclusión del FMEA para aumentar la disponibilidad del sistema.

### 4.2. Base de Datos de Confiabilidad de Componentes

La construcción de una base de datos de confiabilidad de componentes[17] es una tarea primordial cuando se trata no sólo de modelar la instalación sino para la cuantificación del impacto de la aplicación de los nuevos esquemas de mantenimiento.

El relevamiento comienza por un estudio de los antecedentes históricos de la planta, de los cuales se obtendrá una primera aproximación a los valores de tasas de fallas. Estos valores dependiendo de los criterios establecidos para su determinación pueden ser optimistas o conservativos, y por ello se recomienda, dependiendo de la finalidad con la que se vayan a usar, realizar una actualización bayesiana con datos de componentes genéricos disminuyendo el sesgo de las tasas de falla obtenidas.

### 4.3. Análisis de Árboles de Fallas

Es una de las principales metodologías usadas en el análisis de la seguridad de sistemas. Se inició en la industria aerospacial a principios de los 60.

Es un análisis deductivo detallado, que requiere considerable información sobre los sistemas y constituye una valiosa herramienta para el diseño y también para el diagnóstico, ya que puede predecir las causas más probables de una falla.

El objeto de un árbol de fallas es traducir en un modelo las condiciones de un sistema que pueden resultar en un evento indeseado, llamado generalmente evento tope o cumbre, que debe ser claramente definido por el analista.

Asimismo, y para que sea entendido por otros se deben clarificar las hipótesis hechas y la simbología utilizada.

Mediante un árbol de fallas se representan lógica y gráficamente varias combinaciones de eventos normales y anormales que conducen a la producción del evento tope.

En la Figura 2 se puede ver un conjunto restringido de los símbolos más usados.

El árbol de fallas está construido de manera tal que el evento tope está por encima de la secuencia de los posibles eventos que conducen a él y que se vinculan por compuertas "AND" y "OR".

Los eventos de entrada a cada compuerta, que son a su vez salida de otras compuertas a más bajo nivel, se representan por rectángulos que deben ser posteriormente desarrollados hasta llegar a los eventos básicos que representan el límite de resolución del árbol de fallas.

En general los eventos básicos que constituyen el límite de resolución de un árbol de fallas, son fallas de los elementos individuales que componen un sistema. En general la probabilidad de falla de dichos elementos puede determinarse o en otros casos puede ser acotada dentro de un cierto intervalo.

De ser esto así y partiendo de las probabilidades de los eventos básicos, se puede ascender por el árbol de fallas y aplicando las leyes del cálculo de probabilidades, determinar la probabilidad del evento tope o fijar límites para su variación.

Aplicando las normas que se derivan del álgebra de Boole, pueden simplificarse los cálculos para la evaluación de árboles de falla.

Sin embargo, para las evaluaciones cualitativas y cuantitativas de árboles de falla de sistemas complejos se recurre a programas de computación debido a lo laborioso y lento que resultaría un cálculo manual.

### 4.4. Análisis de Causa Raíz

El análisis de causa raíz[19] (Root Cause Analysis, RCA) es un conjunto de metodologías que permiten encarar la búsqueda del evento que desencadena la manifestación de una falla. Es importante destacar que una fuente documentada de causas raíces son las tablas del FMEA y que cuando los análisis están completos pueden responder a la mayoría de los RCA disminuyendo considerablemente los tiempos y los costos de éstos.

Las diversas técnicas utilizadas en RCA requerirían un apartado especial, lo cual está fuera del alcance de esta publicación.

## 5. Metodología de trabajo

La metodología de trabajo que se propone consiste en reuniones de 3 horas al menos 2 veces por semana, de un grupo multidisciplinario compuesto por dos expertos en la aplicación de las técnicas involucradas (uno especializado en el tratamiento estadístico de la información), el gerente de producción, los responsables del mantenimiento mecánico, eléctrico y de instrumentación y control, y un operador de la instalación.

Previo a cada reunión se determinaban los objetivos y, el material que debería ser revisado y aportado a la sesión de trabajo. De esta manera el personal se preparaba para cada reunión, permitiendo en las mismas una amplia discusión de los escenarios propuestos. Si durante las reuniones surguen aspectos que no se pueden zanjar debido a falta de

información, la discusión es pospuesta para la próxima sesión. Esto da tiempo a realizar en algunos casos consultas a los proveedores o a los contratistas por información específica.

Una completa documentación de los análisis se debe ir realizando en base a Guías Documentales específicas[20,21]. Esto permite desde un principio tanto la estandarización de los informes como asegurar su completitud.

A la par de la realización de los FMEAs se puede ir confeccionando la RDB, lo que permite tener esta en condiciones para su utilización en la cuantificación de los Árboles de Fallas. A continuación se expondrá la información que se puede obtener de cada una de las técnicas aplicadas. Estas son documentadas a medida que el análisis avanza lo que facilita la documentación y disminuye el tiempo adicional dedicado a esta actividad.

## 6. Información generada a partir de los diversos análisis

### 6.1. RDB

- ✓ Estado actual de los componentes de la planta cuantificados
- ✓ Información básica para determinar Criticidad de Componentes
- ✓ Modelación de los esquemas de Mantenimiento
- ✓ Verificación de los Programas de Mantenimiento
- ✓ Estudio del Impacto de Modificaciones en los Esquemas y Programas de Mantenimiento

### 6.2. FMEA

Operación:

- ✓ Listas de Control: inclusión de componentes, inclusión de controles específicos, etc.
- ✓ Rondas de Operadores: optimización de rondas de operadores, determinación de la necesidad de capacitación adicional, etc.
- ✓ Procedimientos: formulación de nuevos procedimientos, revisión de procedimientos en uso, etc.
- ✓ Diseño de Sistemas: determinación de la necesidad de instrumentación adicional o la activación de nuevos niveles de alarma, etc.
- ✓ Entrenamiento de Operadores: modificación de los planes de capacitación o reentrenamiento.

Mantenimiento:

- ✓ Lista de Componentes Críticos: estudio del componente, (cambios de diseño, de proveedor, etc.)
- ✓ Tipos de Mantenimiento: Preventivo, Correctivo, de Emergencia, Predictivo, etc.
- ✓ Prioridad de Órdenes de Trabajo: determinada en base a la Severidad del Modo de Falla del componente.
- ✓ Procedimientos: formulación de nuevos procedimientos, revisión de procedimientos en uso, etc.
- ✓ Diseño de Sistemas: determinación de la necesidad de instrumentación adicional o la activación de nuevos niveles de alarma, etc.
- ✓ Stock de Partes y Componentes: recomendaciones basadas en el Riesgo sobre el Sistema de los modos de falla de los componentes

### 6.4. FTA

- ✓ Confiabilidad de los Sistemas: Estudio de la Interacción de los modos falla. Confiabilidad dada en la Combinación de Modos de Fallas y la Tasa de Falla de los Componentes.
- ✓ Identificación de los Conjuntos de fallas de Componentes que producen la pérdida de Producción
- ✓ Implementación de Esquemas de Mantenimiento orientados por la Confiabilidad
- ✓ Importancia de Componentes: Criticidad de Componentes.
- ✓ Importancia de los Sistemas: Determinación de la necesidad de inversiones basadas en Confiabilidad.

6.5. RCA

- ✓ Causa Raíz: Determinación de las causas "reales" de los Modos de Fallas.
- ✓ Causas Contribuyentes: Causas que aumentan la probabilidad de ocurrencia de la Falla.
- ✓ Detección: determinar cual es la instrumentación requerida para la detección de modos de falla relevantes.
- ✓ Importancia: determinación de la importancia del problema.
- ✓ Procedimientos: formulación de nuevos procedimientos, revisión de procedimientos en uso, etc.
- ✓ Diseño de Sistemas: determinación de la necesidad de instrumentación adicional o la activación de nuevos niveles de alarma, etc.
- ✓ Stock de Partes y Componentes: recomendaciones basadas en el Riesgo sobre el Sistema de los modos de falla de los componentes.

**7. Ejemplo de aplicación**

Esta metodología ya ha sido aplicada con éxito a diversos ciclos de las Centrales Térmicas Mendoza S.A. del grupo CMS Energy entre el año 2001 y el 2003. Una completa descripción de uno de los trabajos realizados puede consultarse en J. Núñez Mc Leod et al.[22], 2003. Del trabajo realizado sobre un Ciclo Combinado Siemens se obtuvo un cuadro de situación que permitió generar una serie de acciones las cuales se pueden brevemente resumir en:

7.1 Recomendaciones de Mantenimiento

Dados los resultados de los análisis realizados se confeccionaron dos listados de Recomendaciones de Mantenimiento[23,24] para los subsistemas analizados. En los mismos se detalla el tipo de mantenimiento al que debe ser sometido cada componente (correctivo, preventivo o predictivo), la frecuencia, qué personal debe realizarlo (personal de mantenimiento u operación), el estado del subsistema y aclaraciones adicionales relacionadas con controles específicos. Estas recomendaciones basadas en la contribución al riesgo de los modos de falla de cada componente permiten acotar el riesgo de indisponibilidad de los subsistemas analizados.

7.2. Recomendaciones para la Ronda de Operadores

Se desarrollaron Recomendaciones para la Ronda de Operadores[25,26] en ambos subsistemas. La idea de estas recomendaciones es armar las rondas de operadores con tareas significativas desde el punto de vista del riesgo de la instalación (visto como la pérdida de producción) y con una frecuencia adecuada. En las recomendaciones se describen claramente la acción del operador, las referencias que puede controlar (valores, goteos,

contraste con valores previos, etc.), la frecuencia de la acción y adicionalmente se realizan observaciones que clarifican la acción. Así por ejemplo el control del nivel de aceite de las bombas debe ser realizado semanalmente, controlando el nivel "normal", el cual deberá compararse con los de las semanas anteriores a efectos de controlar posibles pérdidas. Otro ejemplo es el control de delta P de los filtros de succión de las bombas de alimentación, los cuales pueden trabajar con una caída de presión máxima de hasta 1,8 bar (referencia de valor máximo) el cual debe ser controlado 1 vez al mes; pero después de una parada el control deberá ser hecho diariamente durante una semana si hubo actividad de mantenimiento en el área.

7.3. Recomendaciones de Acciones para los Operadores frente a Situaciones Incidentales

Basados en los escenarios identificados durante el análisis se definieron un conjunto de acciones[27] que el operador debería realizar. Así por ejemplo frente a un escenario donde la bomba de alimentación en servicio presenta la falla de la bomba principal de aceite fuera de servicio y mantiene la lubricación basada en la bomba auxiliar, el operador debería proceder a la conmutación de bombas de alimentación. Esta acción asegura la continuidad de operación y disminuye el riesgo de falla de lubricación. Quedando el sistema en un escenario de menor riesgo.

Otro ejemplo se relaciona con la aparición de alarma de falla de señal del caudalímetro de succión de las bombas de alimentación. En este caso el operador debe liberar una orden de trabajo para el control del mismo, teniendo en cuenta que la falla puede deberse a la falla en la válvula de retención de la bomba de alimentación en standby, provocando recirculación por ella con contraflujo y dando falla de señal en caudalímetro. Este caso en particular presenta un escenario que predispone al operador a cometer un error (error forzado por el contexto). Al indicarle que el problema es la falla de un caudalímetro, cuando en realidad puede ser la indicación correcta de caudal en sentido inverso, debido a la falla de una válvula de retención. La identificación de este tipo de escenarios es una valiosa contribución a la detección temprana de fallas y al aseguramiento de que las medidas correctas son tomadas por los operadores.

## 8. Conclusiones

La metodología reúne en forma consistente la conformación de una Base de Datos de Confiabilidad de Componentes específica de cada planta, el Análisis de Modos, Efectos y Criticidad de Fallas, el Análisis de Árboles de Fallas y el Análisis de Causa Raíz. Como resultado de la aplicación de esta metodología se obtienen principalmente conclusiones orientadas a operación y mantenimiento; pero también para niveles superiores de decisión enfocadas en la mejora de la performance y la disminución del riesgo de la instalación.

La metodología centrada en reuniones sucesivas multidisciplinarias de personal de la instalación permite construir en forma agregada una RDB mientras se realiza un FMEA. La RDB permite modelar los esquemas de mantenimiento, verificar los programas actuales, estudiar el impacto de modificaciones en los mismos y proveer la información para la cuantificación de los Árboles de Fallas. El FMECA permite la inclusión de componentes y/o controles específicos en las listas de control de los operadores, asimismo permite optimizar las rondas de control y la necesidad de capacitación adicional de los operadores, la determinación de la conveniencia de instrumentación adicional y la configuración de

nuevos niveles de alarma, determinación de los modos de falla relevantes, las acciones de mitigación posibles, la evaluación de los tipos de mantenimiento asignados a cada componente, etc. Asimismo basado en la severidad de los modos de fallas se pueden priorizar las órdenes de trabajo de mantenimiento y fijar el stock de partes adecuado al riesgo. El cuadro de la instalación se sigue completando con un FTA cuantitativo. Éste permite el estudio de la interacción de los modos de fallas de los componentes dada su tasa de falla, la identificación de los conjuntos de fallas de componentes que pueden producir la pérdida de producción, la importancia de los componentes basados en su criticidad (derivada de la interacción de modos de fallas), etc. Finalmente el Análisis de Causa Raíz clarifica la fuentes originales de fallas y permite eliminar la recurrencia de estas impactando positivamente en la performance y la disponibilidad de la instalación.

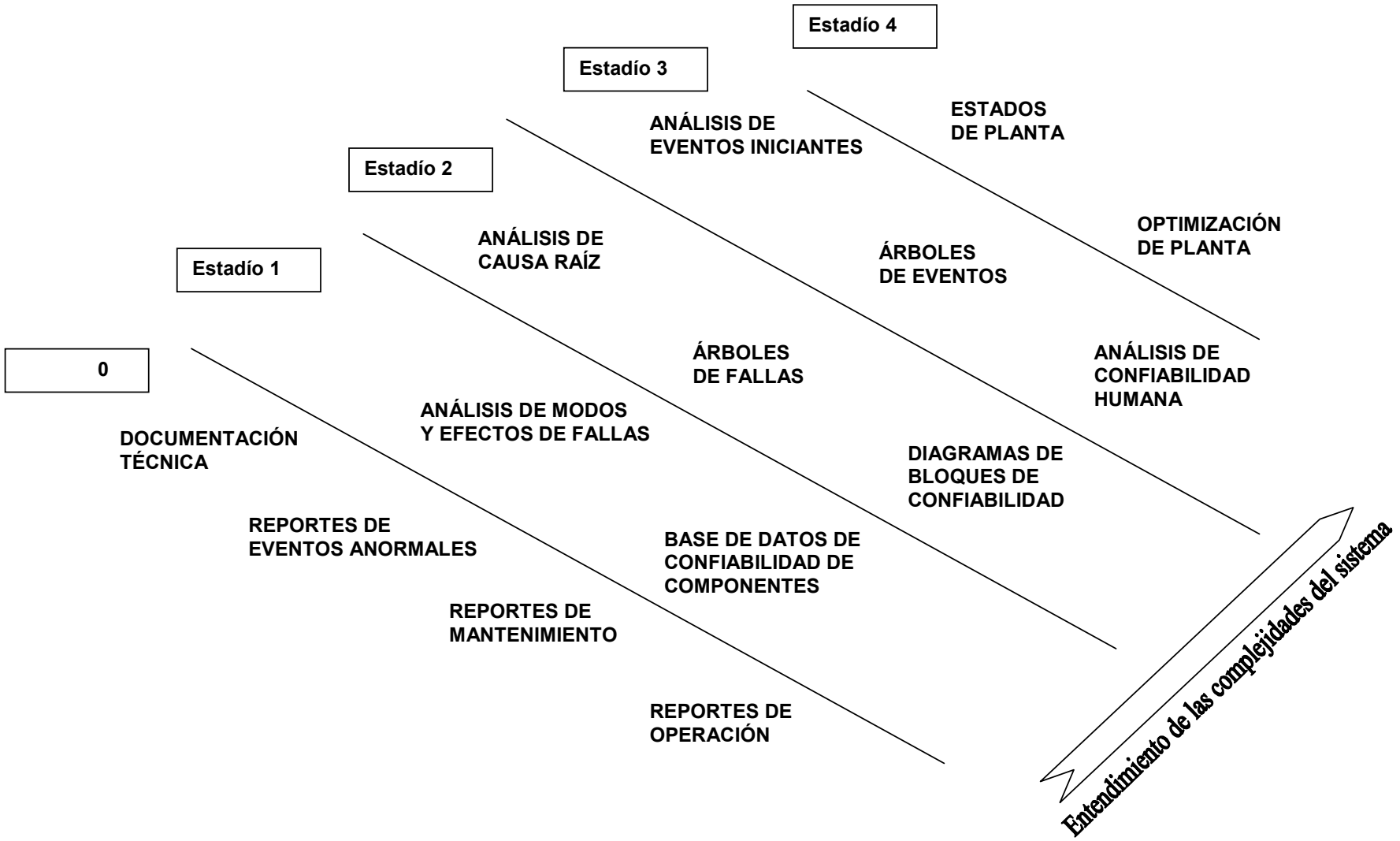


Figura 1. Esquema de incorporación de técnicas de análisis en un marco RCM

**Análisis de Modos y Efectos de Fallas** ***Codificación***

***Sistema, Subsistema o Componente*** **Fecha** ***n / nn / nn***

***Responsables*** **Páginas** ***n* de *nn***

| PROCESO DEL FMEA | | | | | | | | | | | | RESULTADO DE LAS ACCIONES | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Nro. | Componente | | Modo de Falla | Efecto sobre el sistema | Severidad | Causa de la Falla | Ocurrencia | Forma de Detección | Detección | Riesgo | Acción Recomendada | Responsable y Fecha para completar la acción | Acciones realizadas | Severidad | Ocurrencia | Detección | Riesgo |
| | ID | Descripción y/o función | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Tabla 1. Formulario para un Análisis de Modos y Efectos de Fallas


Figura 2. Algunos de los símbolos más usados en la construcción de árboles de fallas.

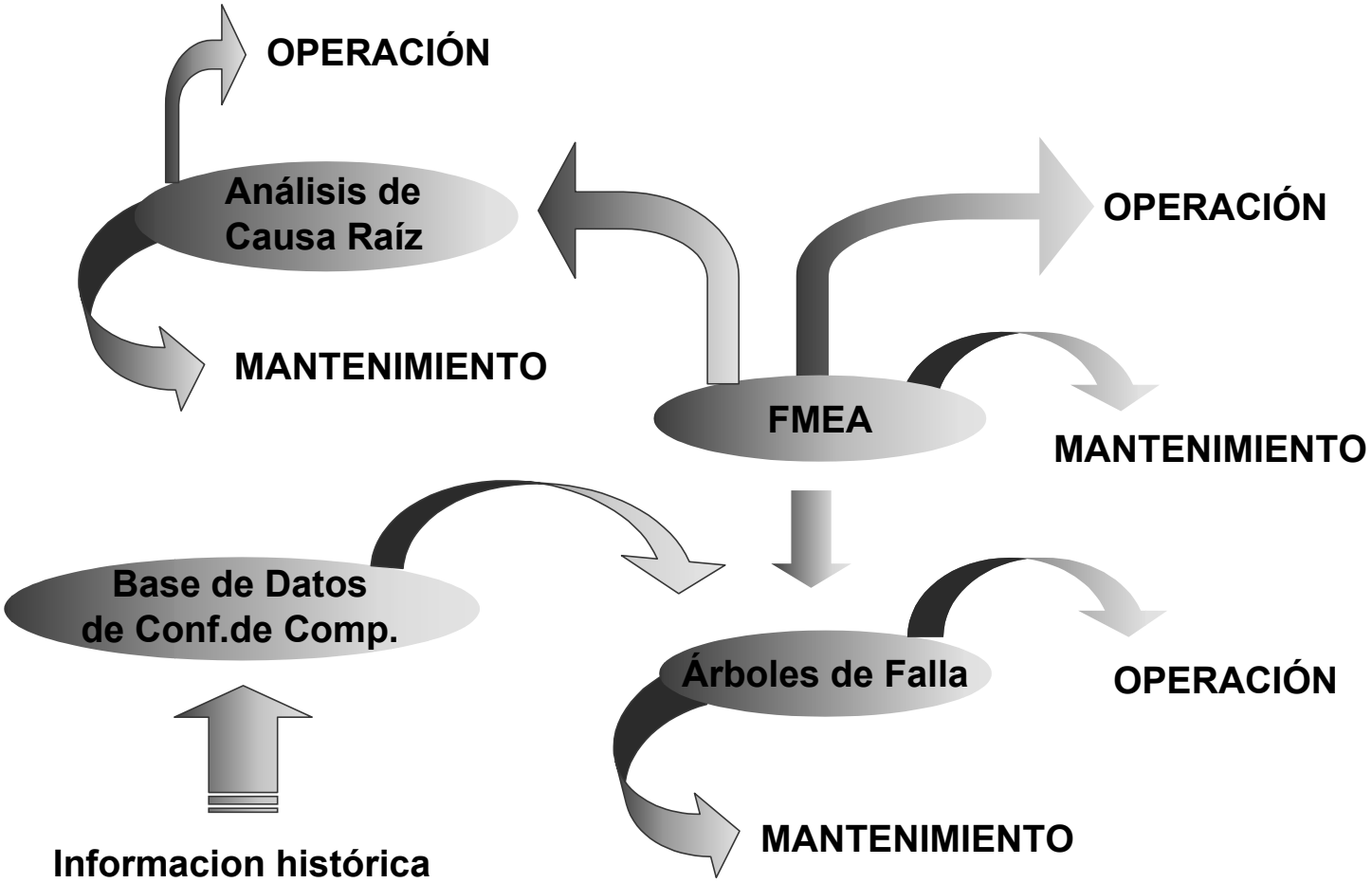


Figura 3. Relacion entre metodologías de análisis y generación de información para O&M

## 9. Referencias


1 V.S. Deshpande & J.P. Modak, *Application of RCM to a medium scale industry*, Reliability Engineering and System Safety 77 (2000), 31-43.

2 I.B. Hipkin & C. De Cock, *TQM and BPR: lessons for maintenance management*, Omega-The International Journal of Management Science 28 (2000) 277-292.

3 J.C. Duthie, M.I. Robertson, A.M. Clayton and D.P.G. Lidbury, *Risk-based approaches to ageing and maintenance management*, Nuclear Engineering and Design 184 (1998) 27-38.

4 BSI BS 5760: PART 5, *Reliability of Systems, Equipment and Components Part 5: Guide to Failure Modes, Effects and Criticality Analysis* (FMEA and FMECA), 1991.

5 CENELEC HD 485, *Analysis Techniques for System Reliability - Procedure for Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA).

6 IEC 812 standard - *Analysis Techniques for System Reliability - Procedure for Failure Mode Effects Analysis*.

7 BSI BS 5760: PART 7, *Reliability of Systems, Equipment and Components Part 7: Guide to Fault Tree Analysis* (G), 1991, (IEC 1025: 1990)

8 NUREG-0492, *Fault Tree Handbook*, Nuclear Regulatory Commission, 1981

9 IEC 1078, *Analysis Techniques for Dependability - Reliability Block Diagram Method* First Edition (CENELEC EN 61078: 1993)

10 ANSI-IEEE 352-1987, *IEEE Guide for General Principles of Reliability Analysis of Nuclear Power Generating Station Safety Systems*, 1987

11 NUREG/CR 2300, *Probabilistic Risk Assessment Procedures Guide*, NRC, 1983

12 NUREG/CR 1278, A.D. Swain & H.E. Guttman, *Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications*, 1983

13 NUREG-1624, *Technical Basis and Implementation Guidelines for A Technique for Human Event Analysis* (ATHEANA), 2000

14 J. E. Núñez Mc Leod & J. Barón, *Risk Optimization on CAREM-25 NPP*, Safety & Reliability, Ed. T. Beldford & P. Van Gelder, Balkema Publishers, 2003

15 SAE-JA1011, *Evaluation Criteria for RCM Processes*, Society of Automotive Engineers, Oct. 1999, USA.

16 IAEA-TECDOC-1200, *Applications of probabilistic safety assessment (PSA) for nuclear power plants*, Viena, IAEA, 2001.

17 IAEA-Tecdoc-636, *Manual on reliability data collection for research reactor PSAs*, IAEA, 1992, Austria.

18 SAE J1739, *Potential Failure Modes and Effects Analysis is Design (Design FMEA) and Potential Failure Modes and Effects Analysis In Manufacturing and Assembly Processes (Process FMEA) Reference Manual*, SAE International, 2000

19 DOE-NE-STD-1004-92, *Root Cause Analysis Guidance Document*, U.S. Department of Energy, 1992

20 J. Núñez Mc Leod, *Guía Documental FMEA*, CEDIAC-GD-IN001-01. Instituto CEDIAC, Facultad de Ingeniería, UNCuyo, 2001, Argentina.

21 J. Núñez Mc Leod y S. Rivera, *Guía Documental de Análisis de Árboles de Fallas*, CEDIAC-GD-IN004-01. Instituto CEDIAC, Facultad de Ingeniería, UNCuyo. 2001, Argentina.

22 J. Núñez Mc Leod, D. Laghezza y S. Rivera, *Aplicación de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad en un Ciclo Combinado Basado en Técnicas de Análisis Probabilístico de Seguridad*, PowerGen Latin America Conference Proceedings, Pennwell, Brasil, 2003.

23 D. Laghezza y J. Núñez Mc Leod, *Recomendaciones de Mantenimiento, Subsistema de Agua de Alimentación de Media Presión,* SIEMENS-RM-1, CTM, 2002, Argentina.

24 D. Laghezza y J. Núñez Mc Leod, *Recomendaciones de Mantenimiento, Subsistema de Agua de Alimentación de Alta Presión,* SIEMENS-RM-2, CTM, 2002, Argentina.

25 D. Laghezza y J. Núñez Mc Leod, *Recomendaciones de Ronda de Operadores, Subsistema de Agua de Alimentación de Media Presión,* SIEMENS-RRO-1, CTM, 2002, Argentina.

26 D. Laghezza y J. Núñez Mc Leod, *Recomendaciones de Ronda de Operadores, Subsistema de Agua de Alimentación de Alta Presión,* SIEMENS-RRO-2, CTM, 2002, Argentina.

27 D. Laghezza y J. Núñez Mc Leod, *Recomendaciones de Acciones para los Operadores frente a Situaciones Incidentales, Subsistema de Agua de Alimentación,*SIEMENS-RAO-1, CTM, 2002, Argentina.