

# Rol del fallo mecánico en la optimización del mantenimiento en una central nuclear

## Role of the mechanical failure during the maintenance optimization in the nuclear power plant

**Antonio Torres-Valle**

I Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas. Dpto. Ingeniería Nuclear. La Habana. Cuba

Correo electrónico: [atorres@instec.cu](mailto:atorres@instec.cu)

Recibido: 14 de julio de 2011

Aceptado: 11 de abril de 2012

---

### Resumen

Entre las más recientes aplicaciones del Análisis Probabilista de Seguridad (1997 – 2003) de la Central Nuclear Embalse en Argentina, está el Programa de Mantenimiento Orientado a la Seguridad (2006–2009) el cual se ha desarrollado con el empleo de la metodología de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (*RCM* en inglés). El objetivo general del artículo es demostrar la alta contribución de los fallos mecánicos en el diseño de las políticas de mantenimiento de varios sistemas de la instalación a través del empleo de la metodología *RCM*. La composición, estructura y políticas de explotación de los sistemas tecnológicos de muchas instalaciones con riesgo asociado, similares a las de los sistemas analizados en este estudio, permite inferir que los resultados que se obtendrán serán equivalentes de aplicarse la metodología *RCM* en dichas instalaciones.

**Palabras claves:** mantenimiento centrado en la confiabilidad, mantenimiento predictivo, mantenimiento preventivo, fallo mecánico, seguridad, confiabilidad, riesgo.

### Abstract

One of the most recent applications of Probabilistic Safety Analysis (1997 – 2003) to Embalse Nuclear Power Plant in Argentina, is the Safety Oriented Maintenance Program (2006 – 2009) developed with employment of the Reliability Centered Maintenance (*RCM*) methodology. The general objective of the paper is to demonstrate the high contribution of the mechanical failures in the maintenance program design through the *RCM* methodology. The composition, structure and operation strategies of the technological systems of many risk associated facilities, similar to the analysed systems included in this study, allow deduce that the results will equivalent in case of application of *RCM* methodology in such facilities.

**Key words:** reliability centered maintenance (*RCM*), predictive maintenance, preventive maintenance, mechanical failure, safety, reliability, risk.

## Introducción

Los Análisis Probabilistas de Seguridad (APS) se han convertido en una valiosa herramienta para la toma de decisiones respecto a la seguridad de instalaciones nucleares y otras con riesgo asociado a su explotación a través de la aplicación de sus resultados a la optimización de procedimientos de operación, emergencia, mantenimiento y garantía de calidad, entre otros [1-3]. En este marco se han desarrollado más de 100 APS en plantas nucleares en los últimos años [1]. Una forma sistemática de aplicación de los análisis de riesgo al mantenimiento ha sido el amplio empleo del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM – en inglés) en las plantas nucleares donde tales APS se han realizado. Aunque en un principio, las técnicas cualitativas de análisis de riesgo se impusieron en la aplicación del RCM, hoy existe un enfoque dual que tiende más hacia el uso del RCM con base cuantitativa, cuando a este le ha precedido un APS [6, 8]. El grupo de aspectos esbozados caracterizan al estado del arte de esta temática. En este contexto, el APS realizado en la Central Nuclear de Embalse (CNE) de Argentina, sumado a su aplicación a la optimización del mantenimiento a través del empleo del RCM, se convierte en una particularidad del escenario descrito [4, 5].

El APS de Alta Potencia de CNE [4, 5] fue ejecutado durante el período 1997-2003 por un equipo multidisciplinario y con cooperación internacional (especialistas de la Central Nuclear de Cernavoda de Rumania y del Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas de Cuba). Los resultados de este APS fueron aplicados a mejoras de diseño de algunos sistemas y a la modificación y/o completamiento de la documentación de planta (Manuales de Operación y Procedimientos Operacionales de Emergencia). También fueron modificados Procedimientos Operacionales de Emergencia relacionados con los principales contribuyentes detectados durante el análisis.

A partir del año 2006 se comenzó a trabajar en una aplicación del APS de CNE destinada a la optimización del mantenimiento de la instalación. La misma está incluida en el Programa de Mantenimiento Orientado a la Seguridad de CNE [5] y consiste en la aplicación de la metodología de RCM [6-8] a varios sistemas de la instalación.

Un resultado importante del estudio es la identificación de los mayores contribuyentes al fallo de los sistemas analizados, y por tanto al riesgo de explotación de la instalación [6, 7]. Constituye objeto de esta investigación la influencia de los fallos mecánicos en el diseño de políticas de mantenimiento. El problema radica en la imposibilidad de investigar la influencia de dichos fallos sobre las políticas de mantenimiento partiendo del simple estudio de los registros de mantenimiento de la instalación [8]. La hipótesis es entonces que la realización de un estudio basado en la metodología de RCM permite valorar adecuadamente la alta contribución de los fallos por causas mecánicas en el diseño de políticas de mantenimiento. De esta forma, el objetivo general del trabajo es demostrar la elevada contribución de los fallos mecánicos en el diseño de las políticas de mantenimiento de varios sistemas de la instalación empleando la metodología RCM.

El desarrollo del RCM para 9 sistemas tecnológicos analizados en CNE [5] muestra un importante impacto de esta aplicación sobre la política de mantenimiento preventivo y predictivo, actualmente aplicada a los mismos. Los resultados están enfocados a la redacción o modificación de intervenciones programadas, priorización de repuestos, reorientación de técnicas de diagnóstico y modificación de frecuencias y de duración de las acciones de mantenimiento, lo que redundará en un importante ahorro de horas hombre destinadas a este frente.

## Materiales y Métodos

El RCM está reconocido como un método de evaluación sistemática para identificar las acciones de mantenimiento aplicables (desde el punto de vista técnico) y efectivas (por su impacto económico), para desarrollar u optimizar el programa de mantenimiento, basadas en la utilización de técnicas de monitoreo a condición, búsqueda de fallos y monitoreo por tiempo, que son aplicadas, en ese orden progresivo, para lograr la aplicación de métodos menos invasivos sobre el estado técnico de los componentes objeto del mantenimiento [8]. Un algoritmo simplificado del método de RCM se muestra en la figura 1. La metodología de RCM parte del establecimiento de las fronteras del sistema objeto de estudio, para lo cual se prefiere respetar en lo posible las prácticas de explotación establecidas dentro de la instalación (codificación de equipos, operación, mantenimiento, garantía de calidad), así como algunos requisitos de los análisis de confiabilidad.

Para la determinación de los equipos críticos de la instalación, se utilizan los resultados de los análisis de importancia realizados comúnmente en el marco de los análisis de confiabilidad de sistemas [6, 7, 8]. Los análisis de confiabilidad de sistemas se fundamentan en la solución de árboles de fallos complejos a partir de los cuales se obtienen, entre otras múltiples aplicaciones, el ordenamiento relativo por su contribución al

riesgo o la indisponibilidad del sistema, de los elementos integrantes del mismo [8]. Para la elaboración de los esquemas simplificados, utilizados en los análisis de confiabilidad, se parte del escenario más conservador para el trabajo del sistema, se incluyen la mayor cantidad de componentes en el análisis y excluyen los sistemas de apoyo. Así mismo, se utilizan datos genéricos de confiabilidad de componentes, eliminándose los errores humanos y las indisponibilidades por mantenimiento y se tiene en cuenta solo un modo de fallo por componente [8].

El estudio de criticidad por equipos enunciado es punto de partida para deducir las políticas de mantenimiento a aplicar. Por ejemplo, para equipos con categoría de alta criticidad, se priorizan tareas de monitoreo a condición (mantenimiento predictivo) por sobre las tareas de búsqueda de fallos (detectivo). Una última alternativa de mantenimiento programado son las tareas de monitoreo por tiempo (preventivo). La aplicación del mantenimiento correctivo nunca se descarta y queda como opción para los equipos críticos en caso de fallos, y como política preferente de mantenimiento para los componentes con bajo efecto sobre la seguridad de la instalación y la indisponibilidad de los sistemas.

El análisis pasa por la adaptación de las políticas de mantenimiento predeterminadas, a la realidad de los registros específicos de fallo por equipo en la industria en cuestión. Tanto los análisis de confiabilidad nombrados anteriormente, como la recomendación de políticas de mantenimiento a aplicar se encuentran automatizados dentro del código MOSEG (Gestión de Mantenimiento Orientado a la Seguridad) [9].

La metodología de optimización del mantenimiento basada en RCM se retroalimenta con los resultados de la aplicación de las políticas de mantenimiento. Es necesario aclarar que la optimización a través del RCM se logra priorizando esfuerzos sobre la base de la aplicación del Principio de Pareto [8], en profundidad y dentro de diversos niveles de análisis de contribuyentes a la seguridad de la instalación e indisponibilidad de los sistemas [6-8]. Estos niveles, como se aprecia en el algoritmo mostrado en la figura 1 son, el análisis de confiabilidad de sistemas, donde se determinan los componentes críticos, la recomendación de políticas de mantenimiento, donde se priorizan las intervenciones de mantenimiento menos invasivas, y los estudios de causas de fallos, donde se determinan los mecanismos de fallos más importantes, y se ajustan las políticas de mantenimiento predeterminadas a dichas causas.

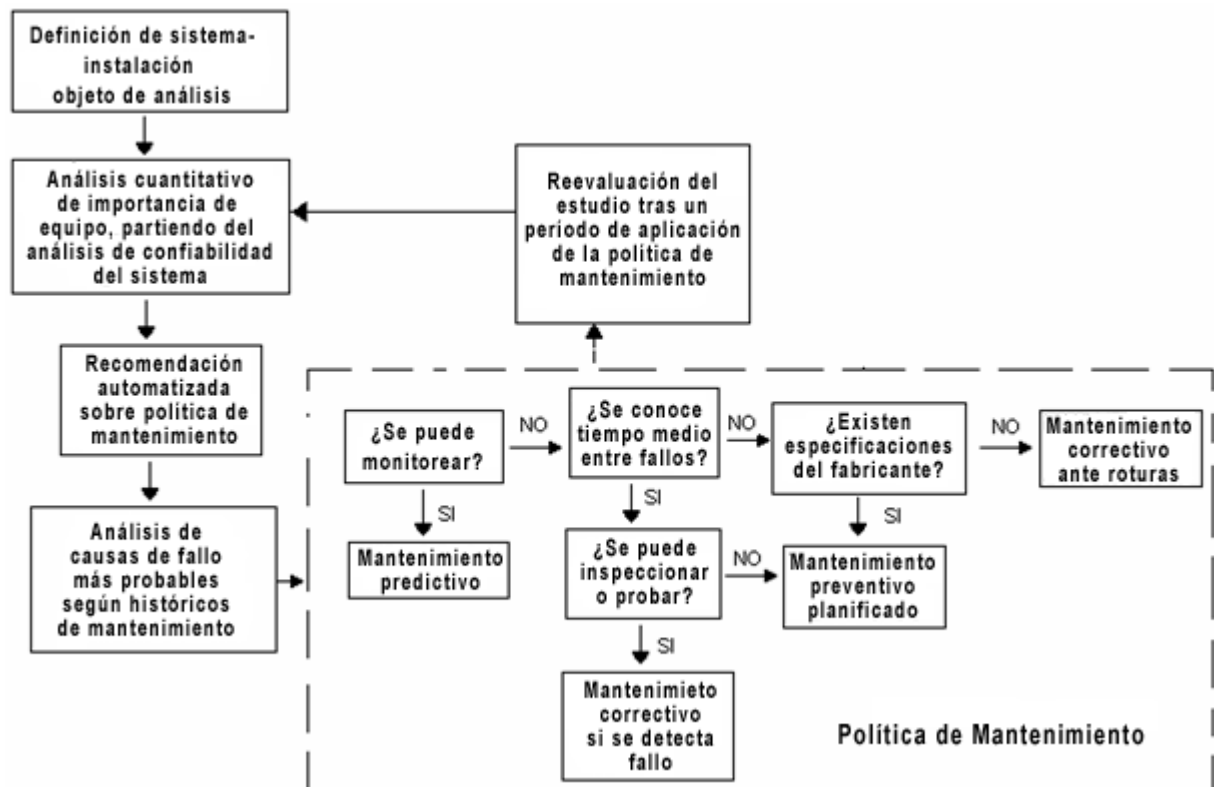
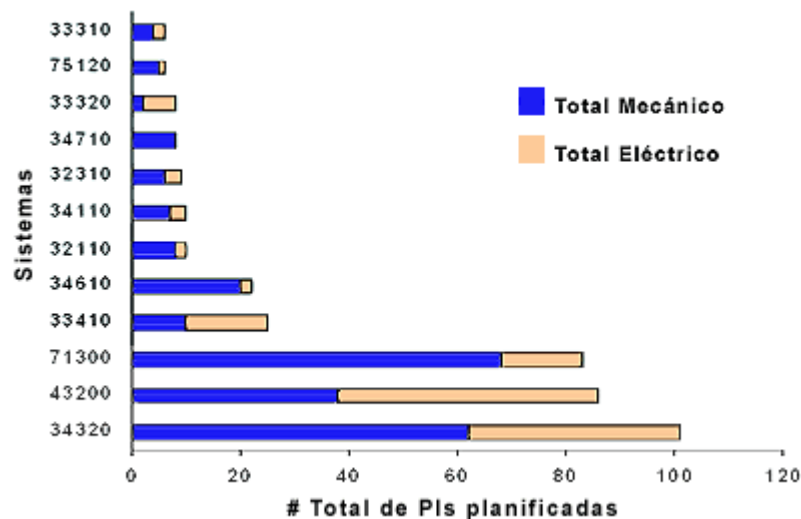


Fig. 1. Metodología de optimización basada en RCM

Para la determinación de los sistemas objeto de aplicación de la metodología de RCM en CNE, se utilizaron dos fuentes: los resultados del estudio de APS, previamente realizado en la planta [4], y los listados de intervenciones planificadas (PIs) contenidas en el programa de mantenimiento preventivo de la instalación. Del APS se obtienen los sistemas de explotación normal cuyas fallas originan eventos iniciadores y progresan en secuencias accidentales con aportes importantes al riesgo de daño al núcleo del reactor, así como los sistemas facilitadores (sistemas frontales y soportes) cuyos fallos están incluidos en dichas secuencias. Los análisis según el criterio adicional de estudio del programa de mantenimiento preventivo de la instalación se resumen en el histograma mostrado en la figura 2.

La consideración de los criterios anteriores permitió centrar los esfuerzos de aplicación de la metodología de RCM en los siguientes sistemas:

- |                                                  |                                     |
|--------------------------------------------------|-------------------------------------|
| 1- Agua de Alimentación Principal (43200)        | 6- Enfriamiento de Parada (33410)   |
| 2- Agua de Procesos (71300)                      | 7- Enfriamiento de Blindaje (34110) |
| 3- Enfriamiento de Emergencia del Núcleo (34320) | 8- Sistema de Parada No. 2 (34710)  |
| 4- Suministro de Agua de Emergencia (34610)      | 9- Gas de Cobertura (32310)         |
| 5- Circuito Principal del Moderador (32110)      |                                     |



**Fig. 2.** Mantenimientos planificados por sistemas tecnológicos

Con la aplicación del principio de Pareto a los registros de mantenimiento de los equipos críticos resultante del análisis de confiabilidad por sistemas, es posible realizar un estudio de la importancia de los fallos mecánicos a nivel global, determinar su aporte por tipo de equipo, así como las intervenciones de mantenimiento más adecuadas para cada caso.

## Resultados y discusión

Como parte del análisis de sistemas, utilizando el código MOSEG Win Ver. 1.0 [9], se obtienen para cada uno de los sistemas analizados, los componentes críticos por su contribución a la indisponibilidad del sistema y las acciones de mantenimientos recomendadas para los de alta y mediana criticidad. Una muestra de este resultado intermedio para el sistema de agua de proceso (71300), se presenta en la tabla 1 [8].

Como se aprecia, el código MOSEG ordena contribuyentes por su impacto en la indisponibilidad del sistema (ver medida F-V, *Fussell-Vesely*) [8], los clasifica por su criticidad (Criticidad: Alta, Media, Baja) y recomienda Tareas de monitoreo a condición (MC) y tiempos para las tareas de búsqueda de fallos (BF) y monitoreo por tiempo (MT), todo ello partiendo de un enfoque sistémico. En la tabla aparecen técnicas de monitoreo predictivo [6, 8] (Mon.Cond) como AV (Análisis por Vibraciones), CH (Contenido de Hierro en aceite), TG (Termografía Infrarroja), EX (Extensometría), entre otras. Este tipo de tabla constituye guía para la indagación en los históricos de mantenimiento, a nivel de causa de fallo para los equipos de alta y mediana criticidad. Una posibilidad adicional del análisis es el descubrimiento de problemas de diseño de sistemas una

vez que los cálculos demuestran que las frecuencias de pruebas y/o mantenimientos son impracticables. La indisponibilidad media individual (Qmed.) de cada componente aparece también reflejada en la tabla.

**Tabla 1.** Resultados de priorización de mantenimiento para sistema 71300

| No. | Código Alfanumérico | Descripción del fallo | F-V      | Criticidad | Tareas     | Qmed.   | Monitoreo a condición | MT (hrs) | BF (hrs) |
|-----|---------------------|-----------------------|----------|------------|------------|---------|-----------------------|----------|----------|
| 1   | 71312-P3.S          | Bomba al arranque     | 3.09E-01 | Alta       | MC, MT, BF | 1.07E-3 | AV, CH, TG            | 4.78E+01 | 4.78E+01 |
| ... | .....               |                       | .....    | ....       | .....      | .....   | .....                 | .....    | .....    |
| 8   | 71312-P3.R          | Bomba a operar        | 2.27E-02 | Media      | MC         | 7.97E-5 | AV, CH, TG            |          |          |
| 9   | 7113-V129.O         | Válvula a abrir       | 5.90E-03 | Baja       |            | 2.07E-5 |                       |          |          |

Para la revisión de la historia operacional se estudiaron los Informes de Deficiencias (ID) de los componentes críticos de cada sistema almacenados durante 25 años de explotación de la planta. Este procesamiento fue precedido por el establecimiento de consideraciones claves sobre la gravedad de los fallos descritos, las características generales de los equipos, las fronteras de los componentes y las condiciones de explotación de los mismos. Dichos aspectos son esenciales para el establecimiento de las familias y el agrupamiento de los fallos. A continuación se muestra la tabla 2 obtenida a partir de los historiales de mantenimiento de CNE. Los datos han sido ordenados por sistemas, considerando en cada uno solo los tipos de equipos más importantes. Para cada tipo de equipo se realiza una clasificación de sus fallos en mecánicos (M), eléctricos (E) y de instrumentación y control (C). En la clasificación se tuvo en cuenta la experiencia de los mantenedores de los equipos.

Partiendo de la tabla 2 es posible obtener la tabla 3 por tipo de equipo. En esta última se ha adicionado una columna con la cantidad total de tipos de equipos contenidos en los sistemas analizados, mediante la cual se calculan los valores medios de las cantidades de fallos en cada caso. Para comprobar la consistencia de los análisis se agrega una columna con la tasa de fallo más significativa por tipo de equipo manejada en CNE.

**Tabla 2.** Historiales de mantenimiento clasificados por equipos y por naturaleza de los fallos.

| Sistema           | PM  |    |    | PD |    | MV  |   |    | PV |    | XCV |   |   | VR | H<br>X | CP |    |
|-------------------|-----|----|----|----|----|-----|---|----|----|----|-----|---|---|----|--------|----|----|
|                   | M   | E  | C  | M  | C  | M   | E | C  | M  | C  | M   | E | C | M  | M      | M  | C  |
| 43200             | 59  | 10 | 20 |    |    | 35  |   | 20 |    |    | 29  | 1 | 2 | 13 |        |    |    |
| 71300             | 34  | 8  | 20 |    |    |     |   | 6  |    |    |     |   |   |    |        |    |    |
| 34320             |     |    |    |    |    | 22  | 8 | 6  | 2  | 4  |     |   |   |    |        | 23 | 15 |
| 34610             |     |    |    | 29 | 13 |     |   |    | 3  | 2  |     |   |   |    |        |    |    |
| 33410             | 14  | 3  | 2  |    |    | 22  | 1 | 3  |    |    | 1   |   | 2 |    | 1      |    |    |
| 32110             | 15  |    |    |    |    |     |   |    |    |    | 24  |   | 2 |    | 4      |    |    |
| 34110             | 8   | 2  |    |    |    |     |   |    |    |    | 5   |   |   |    | 16     |    |    |
| 34710             |     |    |    |    |    |     |   |    | 48 | 34 |     |   |   |    |        |    |    |
| 32310             |     |    |    |    |    |     |   |    |    |    |     |   |   |    |        | 11 | 10 |
| Total             | 130 | 23 | 42 | 29 | 13 | 79  | 9 | 35 | 53 | 40 | 59  | 1 | 6 | 13 | 21     | 34 | 25 |
| Total por Equipos | 195 |    |    | 42 |    | 123 |   |    | 93 |    | 66  |   |   | 13 | 21     | 59 |    |

**Leyenda:**

PM – bombas motorizadas

PD – bombas diesel

MV – válvulas motorizadas

PV – válvulas neumáticas

XCV – válvulas de control (temperatura, flujo, presión)

VR – válvula de retención

HX – intercambiador de tubos

CP – compresor

Es importante resaltar que la consulta individual de estos datos no sirve al objeto de diseñar una política de mantenimiento, por cuanto los mismos adolecen del enfoque sistémico que caracteriza a los análisis de sistemas, lo que significa que no tienen en cuenta las características estructurales de los esquemas donde

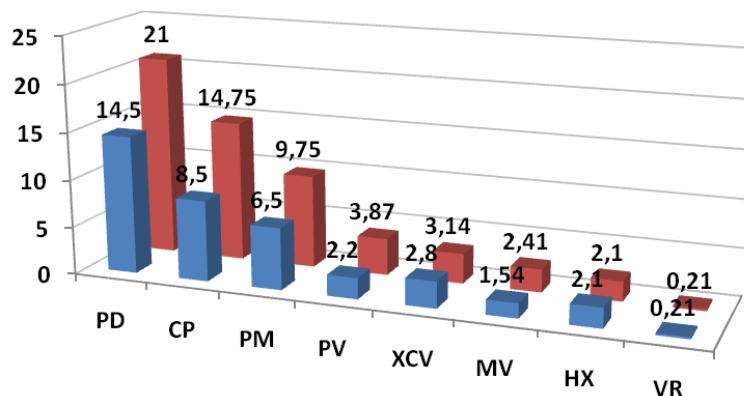
están instalados los equipos. De esta forma, un componente redundante, que falle frecuentemente, no tiene la misma influencia sobre la disponibilidad del sistema que un componente único, aunque falle poco.

**Tabla 3.** Datos por tipo de equipo

| Equipo | Cantidad de Equipos | Fallos Mecánicos (media equipo) | Fallos Eléctricos (media equipo) | Fallos I&C (media equipo) | Total de fallos (media equipo) | Modo de fallo - Tasa de fallos [1/h] (Código Genérico [10]) | Descripción del modo de fallo |
|--------|---------------------|---------------------------------|----------------------------------|---------------------------|--------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| PM     | 20                  | 130 (6.5)                       | 23 (1.15)                        | 42 (2.1)                  | 195 (9.75)                     | R- 5,50E-5 (PWAFF)                                          | Operar                        |
| PD     | 2                   | 29 (14.5)                       |                                  | 13 (6.5)                  | 42 (21)                        | R- 8,00E-4 (PDARJ)                                          | Operar                        |
| MV     | 51                  | 79 (1.54)                       | 9 (0.17)                         | 35 (0.68)                 | 123 (2.41)                     | C- 3,60E-6 (VMTCF)                                          | Cambio de posición            |
| PV     | 24                  | 53 (2.20)                       |                                  | 40 (1.66)                 | 93 (3.87)                      | C- 1,00E-5 (VAACB)                                          | Cambio de posición            |
| XCV    | 21                  | 59 (2.80)                       | 1 (0.047)                        | 6 (0.28)                  | 66 (3.14)                      | A- 1,30E-6 (VWXAF)                                          | Todos los modos               |
| VR     | 60                  | 13 (0.21)                       |                                  |                           | 13 (0.21)                      | A- 2,20E-6 (VCLAF)                                          | Todos los modos               |
| HX     | 10                  | 21 (2.1)                        |                                  |                           | 21 (2.1)                       | T- 3,00E-6 (HXA6J)                                          | Rotura                        |
| CP     | 4                   | 34 (8.5)                        |                                  | 25 (6.25)                 | 59 (14.75)                     | R- 2,00E-4 (QCIRJ)                                          | Operar                        |
| Total  | 192                 | 418                             | 33                               | 161                       | 612                            |                                                             |                               |

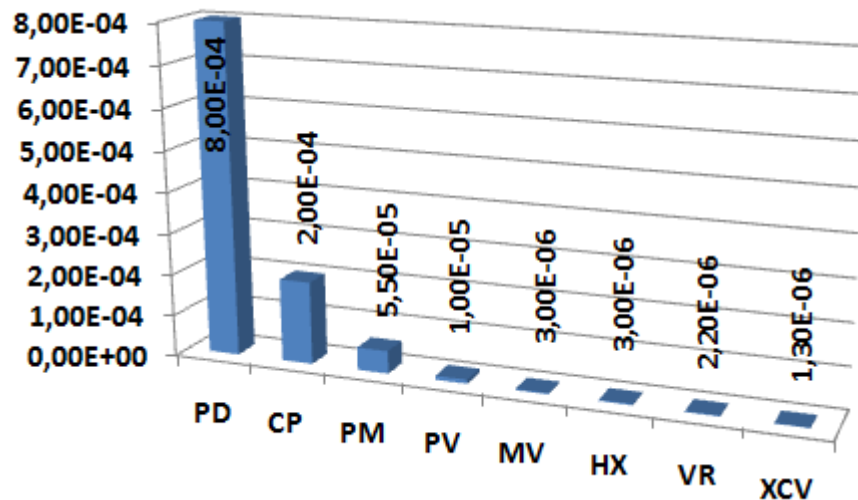
Este aspecto no puede apreciarse en tablas como las que se muestran (tablas 2 y 3), y sólo se logra cuando se han realizado análisis como los mostrados en la tabla 1. Por otra parte, la tabla 1 no sirve para el establecimiento de políticas de mantenimiento dada la característica genérica de sus datos de partida. Por ello, una combinación de ambos resultados es una alternativa adecuada a tal propósito.

Del análisis de la tabla 3 se infiere que la contribución de los fallos mecánicos (418) entre todos los fallos analizados (612), representa el 68 % de los registros investigados. Con la tabla anterior es posible elaborar los histogramas representados en las figuras 3 y 4. La figura 3 representa la contribución media de los fallos mecánicos a la media total por cada tipo de equipo. Se aprecia que en todos los casos el aporte de los fallos de naturaleza mecánica está entre 55 y 90 % de los fallos totales a nivel de equipos. Obsérvese que los más contribuyentes resultan ser las bombas diesel (PD), los compresores (CP) y las bombas motorizadas (PM), lo cual coincide con la práctica internacional [10] y con la influencia de los mecanismos de fallos activos que caracterizan a estos equipos.



**Fig. 3.** Contribuciones de fallos mecánicos a nivel de equipos

La figura 4 muestra una representación gráfica de las tasas de fallos más significativas para todos los equipos analizados en el histograma anterior (se toma sólo la tasa más elevada entre las correspondientes a los modos de fallos considerados en cada equipo). Su objetivo es demostrar la correspondencia y consistencia de las tasas genéricas (utilizadas para obtener resultados como la tabla 1) con los valores medios de fallos totales registrados específicamente para los equipos analizados en los sistemas objeto de estudio de CNE (ver tabla 3).

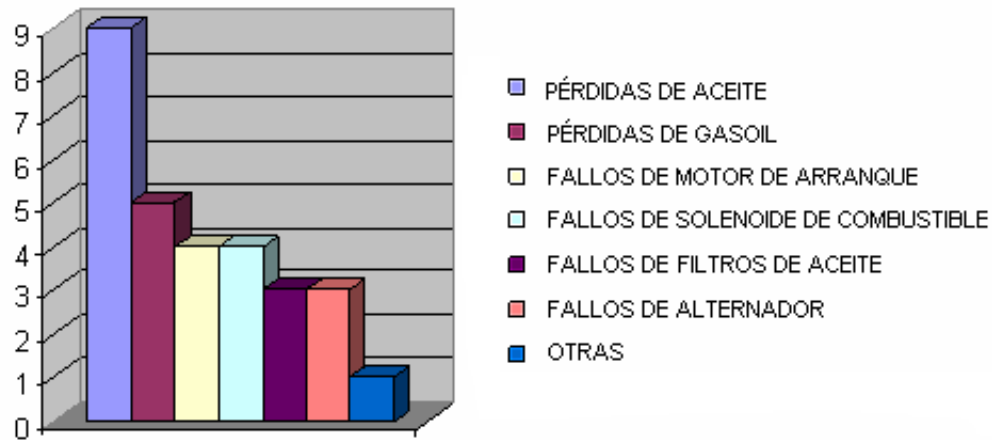


**Fig. 4.** Tasa de fallos más significativa considerada en CNE por cada tipo de equipo

Aún cuando la comparación realizada no abarca análisis estadísticos precisos, el paralelo propuesto sirve al objetivo de demostrar que existe una correspondencia unívoca entre los datos de fallos totales registrados (figura 3) y las tasas de fallos (figura 4) para los mayores contribuyentes (PD, CP, PM, PV). Una certeza de esta afirmación se obtiene del cálculo de las tasas de fallo específicas para todos los modos de fallos de los equipos más contribuyentes, de acuerdo a los datos reflejados en la tabla 3 (cantidad de fallos y población) y el tiempo de explotación considerado. Sin embargo, cuando la cantidad de fallos es menor se aprecia una diferencia entre las figuras en cuanto al ordenamiento de los equipos restantes. Ello está relacionado con el tamaño de la muestra de fallos y la población contenida en los registros analizados.

Cuando se procede a precisar políticas de mantenimiento estas deben estar dirigidas a causas de fallo, por lo que la profundidad de la clasificación anterior (tablas 2, 3 y figura 3) es aún insuficiente. Partiendo de que, las causas de naturaleza mecánica son las más importantes (figura 3) se realiza un estudio de mayor detalle donde se identifican aspectos más específicos. Por ejemplo, en el caso de las bombas diesel (PD), una investigación más profunda de causas de fallos aporta el histograma presentado en la figura 5.

Dado que cada equipo tiene particularidades de diseño y condiciones de explotación que lo distinguen, las causas de sus fallos pueden ser diversas. Por ejemplo, en los equipos con categoría nuclear (destinados específicamente a plantas nucleares) se tienen en cuenta exigencias regulatorias en cuanto a características constructivas que aporten una elevada disponibilidad, por ello la clasificación de sus causas de fallos está matizada por estos requerimientos. Otro ejemplo se aprecia con los regímenes de operación. Los mecanismos de fallo de equipos en operación se diferencian de los que caracterizan a componentes a la espera, por ello para equipos dinámicos la operación se distingue por procesos de desgaste y sobrecalentamiento en partes móviles, mientras que al régimen de espera se asocian mecanismos de corrosión que comprometen el arranque. Conviene tener en cuenta estos aspectos durante la precisión de las políticas de mantenimiento a aplicar.



**Fig. 5.** Ordenamiento de causas de fallo para las bombas diesel

En el caso específico de las bombas diesel presentado en la figura 5 se combinan mecanismos de fallo característicos de los regímenes de operación y de espera. Mientras las pérdidas de aceite y gasoil son típicas de procesos de desgaste como la vibración que desajusta empaquetaduras y uniones, los fallos de motor de arranque y de solenoide de combustible están relacionados con fallos ocultos que evolucionan durante la espera. De cualquier modo, los resultados del análisis deben ponderar si las causas de fallos detectadas están incluidas en las políticas de mantenimiento actualmente aplicadas y, en caso necesario, modificar las intervenciones hacia la consideración de dichos aspectos. Una utilidad clara de este paso es la determinación de las técnicas de diagnóstico afines a las causas de fallo más frecuentes teniendo en cuenta, lógicamente, las sugerencias de monitoreo a condición establecidas durante el análisis de criticidad.

En base al estudio, combinado e integral, de los análisis de priorización por criticidad y acciones de mantenimiento recomendadas (tabla 1), los estudios de historiales de mantenimiento (tablas 2 y 3), el cotejo detallado de las causas de fallos (figura 5) y el examen de las intervenciones actuales de mantenimiento, se realiza la modificación de la política de mantenimiento que, definitivamente, se aplicará a los equipos de cada sistema.

La tabla 4 muestra un resumen de los principales resultados de las políticas de mantenimiento deducidas a partir de este estudio para los sistemas analizados en CNE. Como se observa en la tabla se orienta un incremento de la actividad predictiva (modificación o redacción de procedimientos) en algunos componentes que anteriormente no se vigilaban con estas técnicas, así como el completamiento o redacción de algunos procedimientos de preventivo para mitigar mecanismos de fallo no considerados hasta la fecha en el alcance del mantenimiento planificado. Entre los nuevos procedimientos de predictivo recomendados resaltan el uso del *Flow-Scanner* en varios equipos de regulación de flujo, cuyo estado actual no se diagnostica, lo que incrementa los desmontajes innecesarios. Además, destaca la recomendación de técnicas de pruebas eléctricas para algunos motores de equipos críticos. Desde el punto de vista de preventivo se incorporan tareas para resolver mecanismos de fallos revelados durante la consulta de la estadística, por ejemplo, las picaduras en las partes móviles de equipos rotatorios por corrientes parásitas.

**Tabla 4.** Resumen de las modificaciones a la política de mantenimiento para sistemas analizados en CNE tras la realización del RCM.

| Sistema | Predict Mod. | Predict Redac. | Pls. Cont. Modif | Pls Redact | Mod. Diseño          | Nueva Herram.          | Rptos.                      | Mod. TPs | Pls Frec. Modif | H-H (%)     |
|---------|--------------|----------------|------------------|------------|----------------------|------------------------|-----------------------------|----------|-----------------|-------------|
| 43200   | 1            | 15             | 15               | 1          | 1 (fondo centralina) | 1 (limpieza escobilla) | -                           | 1        | 26              | 204 (28.4%) |
| 71300   | -            | -              | 3                | 1          | -                    | -                      | -                           | -        | 15              | 78 (11%)    |
| 34320   | 1            | -              | 6                | -          | -                    | -                      | -                           | -        | 8               | 58 (5 %)    |
| 34610   | 1            | 2              | 2                | -          | 2 (adicionar PV)     | -                      | 2 motor arranque 4 VR de GV | 1        | 8               | 40.5 (13%)  |
| 32110   | -            | -              | 2                | -          | -                    | -                      | -                           | -        | 5               | 124 (23%)   |
| 33410   | 1            | -              | -                | -          | -                    | -                      | -                           | -        | 17              | 174 (50%)   |
| 34110   | -            | -              | 2                | 1          | -                    | -                      | -                           | -        | 6               | 20 (15%)    |
| 34710   | -            | -              | -                | -          | 9 (eliminar PRV)     | -                      | -                           | -        | 28              | 64 (51%)    |
| 32310   | -            | -              | -                | -          | -                    | -                      | -                           | -        | 6               | 11 (22%)    |
| Total   | 4            | 17             | 30               | 3          | 12                   | 1                      | 6                           | 2        | 119             | 733.5       |

**Leyenda:**

Predict. Mod. – Procedimientos de predictivo modificados.

Predict. Redact. - Procedimientos de predictivo redactados.

Pls Cont. modif. – Procedimiento de Planillas de Inspección (mantenimientos preventivos) modificados en su contenido.

Pls redact. - Procedimiento de Planillas de Inspección (mantenimientos preventivos) redactadas.

Mod. Diseño – Modificaciones de diseño necesarias

Nuev. Herram. – Necesidades de nuevas herramientas.

Rptos. – Necesidades de repuestos específicos.

Mod. TPs – Modificaciones de pruebas rutinarias.

Pls Frec. Modif.- Planillas de Inspección con frecuencia modificada.

H-H – Hombres horas reducidas entre paradas consecutivas y % de disminución respecto al número de hombres horas de la estrategia de mantenimiento original.

En la tabla 4 también se aprecian modificaciones de diseño o concepción de nuevas herramientas encaminadas a resolver problemas que complican los mantenimientos actuales. Se destacan el diseño de herramientas que permitan el adecuado aterramiento de los equipos rotatorios mientras que, como modificaciones de diseño resaltan la transformación del fondo de un tanque de aceite que dificulta su limpieza de impurezas y agua, el aumento de redundancias de un sistema disponiendo válvulas neumáticas (PV) en paralelo y la eliminación en otro de válvulas reguladoras de presión (PRV), innecesarias actualmente para las presiones de aire de sus correspondientes válvulas neumáticas.

Los estudios realizados recomiendan cambios en algunas pruebas rutinarias, para vigilar mecanismos de fallos que permanecen ocultos, y búsquedas de repuestos críticos (motores de arranque de bombas Diesel y válvulas de retención [VR]), dado su alto nivel de importancia para la seguridad. Resulta trascendente, en lo económico, la disminución de la carga laboral por la priorización de los esfuerzos de mantenimiento sobre los equipos críticos, y la consecuente disminución de las frecuencias de mantenimiento sobre los menos

importantes. Un estudio detallado de las modificaciones y adiciones al programa de mantenimiento demuestra que más del 70 % de las medidas recomendadas corresponden al departamento de mantenimiento mecánico.

Dicho indicador es otra muestra de la importancia del estudio de los fallos de naturaleza mecánica para el diseño de adecuadas políticas de mantenimiento.

## Conclusiones

La garantía del enfoque sistémico de la metodología RCM en su variante cuantitativa está en que permite vincular coherentemente características estructurales de los sistemas y datos individuales de confiabilidad de los equipos, ya sean de tipo genérico o específico, concluyendo con la propuesta de tareas de mantenimiento entre las que prevalecen las menos invasivas.

Partiendo del empleo de dicha metodología, el documento muestra la obtención de un resultado colateral, no destacado comúnmente en las publicaciones que abordan esta temática. Se trata del análisis detallado de la elevada contribución de los fallos mecánicos en el diseño de los programas de mantenimiento. En este marco, se demuestra la coherencia con la hipótesis y el objetivo de partida ya que, para aquellos tipos de equipos más contribuyentes (partiendo de sus datos genéricos y disposición en los esquemas), resultan también más notables las estadísticas (historiales de mantenimiento) correspondientes a fallos de naturaleza mecánica. Todo ello se refuerza, una vez finalizado el estudio, con la determinación de que el mayor cúmulo de actividades corresponde al departamento de mantenimiento mecánico de la instalación, predominando entre las tareas recomendadas las de tipo predictivo y preventivo.

La composición, estructura y políticas de explotación de los sistemas tecnológicos de muchas instalaciones con riesgo asociado, similares a las de los sistemas analizados en este estudio, permite inferir que, salvando especificidades, los resultados que se obtendrán serán equivalentes de aplicarse la metodología RCM en dichas instalaciones.

## Referencias

1. Kafka, P. "Probabilistic Risk Assessment for Nuclear Power Plant". En: *Handbook of Performability Engineering*, London: Springer. 2008. p. 1179-1192. ISBN 978-1-84800-130-5.
2. Gaertner, J. P., Hook, T.G., Hughes, E.A. et al. *Aplicación de Reliability Centered Maintenance to San Onofre Units 2 and 3 Feedwater Systems*. 2009. p. 2-1 to 2-8. EPRI NP-5430.
3. Wiremann, T. *Developing Performance Indicators for Managing Maintenance*. Third Edition. US: Industrial Press. 2010. 250 p. ISBN 0-8311-3184-5.
4. Zubair, M. et al. "A review: Advancement in probabilistic safety assessment and living probabilistic safety assessment". En: *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. APPEEC*. Chengdu, China. 28 a 31 de marzo de 2010. ISBN: 978-1-4244-4812-8
5. Torres, A., Perdomo, M. y Fornero, D., "Aplicación de RCM a la central nuclear de Embalse", *Revista Nucleus*, 2010, n°. 47, pag. 24 - 29, [Consultado el: 10 de septiembre del 2011] Disponible en: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S0864-084X2010000100004&script=sci\\_arttext](http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S0864-084X2010000100004&script=sci_arttext) ISSN 0864-084X
6. Bloom, N. B., *Reliability Centered Maintenance: implementation made simple*. First Edition. US: McGraw Hill. 2006. p. 9-14, 46-49, 95-99, 120-130, 172-175. 288 p. ISBN 0-07-146069-1.
7. August, J. *RCM Guidebook: Building and Reliable Plant Maintenance Program*. Oklahoma: PennWell Co. 2004. 267 p. ISBN 1-59370-007-5. p. 11-84.
8. Torres valle, A. *Mantenimiento Orientado a la Seguridad*, Primera Edición. Ciudad Habana: CUBAENERGIA. 2000. p. 282-303. 442 p. ISBN 959-7136-10-4
9. Torres Valle, A. y Figueroa Del Valle, D. J. "Diseño de ejercicio docente basado en el estudio comparativo de metodologías de optimización del mantenimiento", *Ingeniería Mecánica*. 2010. vol. 13, n°. 3, p. 9 - 17, [Consultado el: 10 de febrero del 2012] Disponible en: <http://www.ingenieriamecanica.cujae.edu.cu/index.php/revistaim/article/view/45/365> ISSN 1815-5944
10. IAEA. *Component Reliability Data for use in Probabilistic Safety Assessment. Technical Document IAEA-TECDOC-478*. Vienna: IAEA. 1988. p. 61-63, 115-116, 123-129, 160-188, 298 p. [Consulta: 10 de febrero del 2012] Disponible en: [http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te\\_478\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_478_web.pdf) ISSN 1011-4289