

MANTENIMIENTO BASADO EN LA CONDICION EN LA REAL ARMADA BRITANICA PASADO, PRESENTE Y FUTURO

*Williams Watson
Capitán de Fragata
Real Armada Británica*

INTRODUCCION

El tema del Mantenimiento Basado en la Condición (Condition Based Maintenance, CBM) está acaparando muchísimo la atención de todas las ramas de la ingeniería en la Real Armada. Ha sido considerado un proyecto muy atractivo por la Dirección General, dados los significativos ahorros en los costos de mano de obra y de mantenimiento que este lleva aparejado. Este interés a alto nivel se ha traducido en la creación de un grupo de CBM y Monitoreo de la Condición dentro de la organización de la Dirección General de Ingeniería Naval (DGME), del cual el autor del presente documento se desempeña como jefe. Este grupo es el punto focal del CBM y de él se desprenden las directrices fundamentales, así como la elección y desarrollo de las técnicas de monitoreo de la condición en todo el ámbito de los sistemas instalados a bordo. Sin embargo, este trabajo se concentrará exclusivamente en los aspectos de ingeniería naval afines al tema. En todas las áreas del diseño de ingeniería naval se encuentran en pleno desarrollo las técnicas para dicho monitoreo.

Este trabajo presenta la historia de la Administración del Mantenimiento en la Real Armada y describe el desarrollo de la política de CBM y el empleo de las técnicas de monitoreo de la condición hasta estos días. Asimismo, analiza la formación del Comité de Monitoreo de la Condición del Material Naval y las diversas pruebas que se están llevando a cabo con su auspicio. Enumera y describe brevemente algu-

nos de los proyectos más importantes que están siendo emprendidos por las diversas secciones especializadas relacionadas con mantenimiento y da un vistazo a las nuevas técnicas que se están aplicando en la Real Armada; su desarrollo, uso futuro y la forma en que estas pueden integrarse a un sistema útil y sencillo de administración del mantenimiento. Por último, analiza el impacto del ahorro y la efectividad potencial del CBM y del monitoreo de la condición.

HISTORIA DE LA ADMINISTRACION DE MANTENIMIENTO DENTRO DE LA REAL ARMADA BRITANICA

En épocas anteriores, la planificación del mantenimiento estaba principalmente centralizada en los Jefes de Máquinas, quienes, por lo general, tenían un extenso e íntimo conocimiento de su maquinaria y a su disposición los medios requeridos para fabricar los elementos de repuesto y los hombres para repararla. Sin embargo, el tiempo fuera de servicio requerido por la necesidad frecuente de apagar y limpiar las calderas aportaron un elemento para implementar lo que ahora denominamos Mantenimiento Preventivo.

La Segunda Guerra Mundial provocó una rápida expansión (con la dilución consiguiente de los niveles de destrezas, experiencia y pericia) y un mayor uso del material (con una reducción en el tiempo disponible para mantenimiento y la necesidad de mayor disponibilidad y

confiabilidad). Debido a esto, algunas de las deficiencias ocasionales fueron resueltas por la Armada de Estados Unidos a través de un sistema de mantenimiento que requería que un encargado de mantenimiento semientrenado siguiera religiosamente una serie de instrucciones, principalmente para lo que ahora llamaríamos "servicio", pero también para algunas rutinas de mantenimiento por períodos más prolongados. En la posguerra, la mayor complejidad del equipo de propulsión naval se prestó para el desarrollo de un verdadero sistema de mantenimiento. La Real Armada fue la pionera de este enfoque y así nació el Sistema de Mantenimiento Planificado. Fue introducido a nivel de flota en 1953. Se basó en el ciclo operacional del buque (de "refit" a "refit") y consistió en un sistema basado en tarjetas, en las que estaban especificadas las rutinas de mantenimiento que debían ejecutarse a intervalos de tres meses y planificados por clase de buque, bajo el control de autoridades en tierra. En general, el sistema fue un éxito, por lo menos, porque permitía a los mandos operativos estar conscientes por primera vez del estado mecánico de sus buques. La Real Armada fue considerada líder en el mundo en lo referente a diseño y operación de los Sistemas de Administración de Mantenimiento Preventivo.

No obstante, hubo inconvenientes. No se impartieron instrucciones respecto al contenido del trabajo; tampoco existió un procedimiento de planificación simple y efectivo. Además, la tendencia era la de errar por el lado de la precaución; el sobremantenimiento se consideraba aceptable en la búsqueda de mayor confiabilidad y, con ello, de la disponibilidad y el sistema demandaba una intensa mano de obra. De hecho, introdujo un sistema formal, con una exigencia disciplinada de mantenimiento en la carga de trabajo y de empleo de mano de obra, lo cual demandó la creación de Grupos de Mantenimiento de la Flota para que ejecutaran el trabajo que las dotaciones, fuertemente presionadas, de fragatas, destructores y buques menores no podían manejar. No se podía demostrar que la disponibilidad hubiese aumentado notoriamente; de hecho, la cantidad de tiempo fuera de servicio fue aparentemente mayor.

En los siguientes 25 años el sistema evolucionó y se perfeccionó constante y positivamente. Se aumentó el intervalo básico de mantenimiento gradualmente de tres a seis meses (reduciendo la carga de trabajo de manera significativa y aumentando la disponibilidad), se redujo la cantidad de ítemes obligatorios y se les otorgó a los Ingenieros de Cargo más autoridad para determinar el mantenimiento que se

iba a emprender y cuándo. Se elaboraron las Tarjetas de Información de Trabajo, que ofrecían instrucciones explícitas respecto al contenido del trabajo, más una lista de las herramientas y equipos de repuestos requeridos y se puso a disposición un mejor control del historial de la planta y de la maquinaria. El resultado fue el Sistema de Administración de Mantenimiento (MMS), que aún está en uso.

Sin embargo, a pesar del hecho que el MMS era probablemente el mejor Sistema de Mantenimiento Preventivo disponible, todavía subsistían muchos problemas. No fue fácil modificar el sistema. Cuando se establece una rutina nueva es natural que todos los involucrados procedan con precaución. La autoridad de mantenimiento debe depender inicialmente de la recomendación ofrecida por el fabricante, quien en ocasiones ha diseñado o modificado su producto para satisfacer las necesidades navales; por lo tanto, propondrá períodos de mantenimiento tales que sean suficientes para amparar sus obligaciones de garantía. Asimismo, este último estará interesado en aumentar sus posibilidades de suministro de repuestos. Por otro lado, la autoridad de mantenimiento tiende a incorporar un factor de seguridad, ante la creencia de que la experiencia permitirá aumentar la periodicidad a medida que se prueba la confiabilidad.

Todo lo anterior es natural y se produce en todo el campo del mantenimiento a nivel mundial. El problema se presenta cuando la experiencia sugiere que existe el propósito de aumentar la periodicidad. Casi inevitablemente, la inercia y la precaución, con frecuencia unidas a una carencia de información, harán que la decisión se retrase o se postergue en forma *indefinida*. No existía ningún lugar en el sistema para reportar los datos de Disponibilidad, Confiabilidad y Mantenibilidad (ARM) para ayudar en el proceso de reducción del esfuerzo de mantenimiento.

El advenimiento de fragatas con turbina de gas y del submarino nuclear con su alto requerimiento de disponibilidad, ambos dependientes de auxiliares eléctricos más simples, junto con la primera percepción de la necesidad de reducir los costos de operación, se combinaron para forzar una revisión de la política de mantenimiento a fines de la década de los años 70.

EL DESARROLLO DEL MONITOREO DE LA CONDICION EN LA REAL ARMADA

En los días previos al Mantenimiento Planificado, todo el mantenimiento se llevaba a cabo

basado en la condición, de acuerdo a lo que determinaba el Jefe de Máquinas según su experiencia y "feeling". Por supuesto que él empleaba las cuatro técnicas básicas del monitoreo de la condición, esto es, la vista, el sonido, el olfato y el tacto (el destornillador sobre el motor es una vibración general y burda, pero efectiva). Con el transcurso de los años se desarrolló una cantidad de técnicas, descritas como "pruebas no-destructivas", que en realidad correspondían a monitoreo de la condición. El área más comprometida era, probablemente, la de las calderas con, entre otras, la prueba de agua en uso diario y la inspección a intervalos regulares y para determinar los requerimientos de "refit". Las pruebas de aceite eran habituales, al igual que las pruebas de rendimiento, tales como pruebas de máxima potencia y otras similares. Todas estas técnicas fueron incorporadas al Sistema de Mantenimiento Planificado, dentro de los programas diarios-semanales-mensuales, por lo que fueron consideradas como "servicio". Sin embargo, en su mayoría correspondían a un monitoreo de la condición de los equipos, ya que las mediciones se tomaban a intervalos regulares, se establecían límites conocidos y determinados, las lecturas se registraban en forma gráfica y se podía predecir con cierta exactitud el "tiempo para fallar".

En los años 60 el Análisis de Vibración comenzó a ser introducido como una herramienta de diagnóstico. Requería instrumentos complejos, difíciles de manejar y caros y pertenecían a la esfera de acción del experto.

Se comprobó que ofrecían la posibilidad de poder determinar la condición de la maquinaria en un momento dado y de ese modo ofrecía un método para determinar requerimientos de "refit". Se estableció un equipo, la Unidad de Análisis de Vibración de la Flota (FVAU) y se estrenó a los Jefes de Salón en el uso e interpretación del instrumental.

Los procedimientos se desarrollaron para permitir las inspecciones regulares de vibración de los buques, generalmente en los puntos claves del Ciclo de Mantenimiento, tales como las inspecciones pre-"refit" para determinar los requerimientos de "refit" y pos-"refit", como una forma de asegurar la calidad.

Con la introducción de las turbinas de gas surgieron las técnicas de monitoreo, tales como las inspecciones visuales internas usando la fibroptica. El objetivo de la mayoría de las técnicas introducidas aquí, sin embargo, no era estrictamente un monitoreo de la condición, sino más bien un "Monitoreo de Salud de la Máquina", donde se demuestra escaso interés en pre-

decir la condición futura, a pesar de los intentos iniciales por desarrollar métodos con los cuales fuera posible extender el tiempo entre "overhauls", en atención a que con una cantidad dada de horas de funcionamiento se conocía, o podía predecirse, su condición. Algunas de las técnicas involucraban un alto grado de experiencia y práctica, en especial las inspecciones ópticas, y esto requirió la formación de un grupo de especialistas —el equipo COGOG de la Flota— para ejecutarlas. Esto último puso una vez más en actividad las técnicas de monitoreo de la condición.

A fines de los años 70, unas 20 técnicas diferentes de monitoreo de la condición se encontraban en uso dentro de los Departamentos de Ingeniería de los buques de superficie y submarinos. No obstante, mientras que con el Mantenimiento Planificado la Real Armada se había convertido en líder del mundo, la industria y la marina mercante se hallaban en esta fecha desarrollando e introduciendo métodos y procedimientos para el monitoreo de la condición mucho más avanzados que aquellos que se encontraban en uso en la Real Armada. La tendencia se dirigía claramente al Mantenimiento basado en la Condición. Dentro del servicio naval se estaban haciendo demandas al respecto. Típico fue el artículo titulado "¿Dónde le duele exactamente, Sr. Bomba alimentadora?" (1), el cual es considerado por muchos como uno de los mejores discursos sobre el tema, incluso en la actualidad. El entonces Director de Mantenimiento de la Flota llevó a cabo una revisión de la política de mantenimiento y se adoptó la decisión de que, para todas las clases de buques nuevos, la política de mantenimiento se basaría en los siguientes principios.

- a) Uso máximo del CBM.
- b) Examen crítico de los requerimientos de mantenimiento, comparados con las necesidades operacionales.
- c) Llevar a cabo la acción de reparación y de "overhaul" en el nivel sensible más bajo.

Se efectuaron pruebas empleando medidores manuales simples de vibración: el Indicador de Severidad de la Vibración (VISIN) y el Medidor de Impacto del Pulso (SPM). Se desarrollaron procedimientos para registrar y analizar estas mediciones y en 1980 se emitió una disposición del Consejo de Defensa que extendía el CBM a la flota como un todo. Cada equipo se clasificaría de acuerdo a una de las tres categorías que aparecen en la tabla 1.

Al ingeniero se le otorgó la responsabilidad de determinar la condición de aquellas máquinas de la Categoría 2, pero desafortunada-

TABLA 1
CATEGORIAS DE MANTENIMIENTO

Cat.	Tipo de Mantenimiento	Observaciones
1	Tiempo y ocasión	Aplicable a equipos que por razones operacionales, de seguridad o legales deban tener un bajo riesgo de falla o para los cuales el mantenimiento deba adecuarse a una ocasión específica, tal como la "entrada a dique", y se acepta un grado de sobreseguridad preventiva.
2	Desgaste monitoreado	Aplicable a equipos que pueden ser convenientemente reparados o reemplazados fuera de los períodos de mantenimiento y para los cuales es aceptable un riesgo marginalmente mayor de detención y/o están duplicados. El mantenimiento se basa en la necesidad, de acuerdo al criterio de los Oficiales de Cargo, con apoyo del Monitoreo de Condición y de técnicas disponibles de evaluación de rendimiento.
3	Desgaste natural	Aplicable a equipos cuya detención no afecta la eficiencia de combate ni la seguridad del buque o de los sistemas.

mente no se le dijo cuáles máquinas estaban en cuál categoría. Además, la Comandancia en Jefe de la Flota no enmendó los programas de mantenimiento para los buques en servicio, antes de la introducción de la política, y los ingenieros a bordo eran reacios a dejar que la maquinaria operara más allá de su período normal de mantenimiento establecido, ya que la reacción de la "autoridad" frente a la falla del equipo, algunas veces, no reconocía el cambio en la política de mantenimiento; más aún, el VISIN y el SPM no eran muy bienvenidos por la dotación del buque por el aumento de la mano de obra y las escasas ganancias percibidas. El VISIN, en particular, no era tan exacto como pudiera esperarse; estaba calibrado de acuerdo a las Cartas de Severidad de la IRD Mechanalysis Ltd., que son, a lo sumo, una pauta y no se asocian a una máquina en particular, a su servicio, su montaje o su edad. El adelanto llegó gradualmente, a medida que la Comandancia en Jefe de la Flota efectuaba cambios importantes en el Sistema de Administración de Mantenimiento para incluir las rutinas de monitoreo de la condición dentro de los programas, pero la falta de confianza de la dotación del buque y la carencia de datos consistentes sobre la efectividad de la nueva política todavía daban origen a preocupación.

En 1983 se decidió formar un Comité de Monitoreo de la Condición del Material Naval (NECMC) para revisar la política del CBM y el monitoreo de la condición, para guiar el desarrollo de las técnicas y para proponer y examinar los informes y las pruebas. La formación de este, por primera vez permitía tener una visión general del monitoreo de la condición. Sin embargo,

tal como sucede con esos organismos, el avance en un comienzo fue lento y la Comandancia en Jefe de la Flota y las diversas secciones de especialistas de la DGME continuaron desarrollando técnicas y procedimientos en forma un tanto independiente.

Se observó que existía la necesidad de mejorar la confianza de la dotación del buque en el monitoreo de la condición. Se consideró que una contribución significativa para este objeto podría alcanzarse mejorando la calidad de la información a disposición de los Oficiales ingenieros de los buques y permitiendo que sus dotaciones determinasen por sí mismas la condición. Las pruebas se efectuaron con diversos instrumentos y en los años siguientes se puso en servicio una cantidad de equipos y procedimientos nuevos.

En lo que respecta al análisis de vibración se introdujo el IRD-811 para la recolección regular de mediciones de vibración y su registro manual en un gráfico de tendencias. Exceder los límites predeterminados, establecidos de acuerdo a la experiencia de la FVAU, requería, entonces, de un análisis total efectuado por un experto, usando el Analizador de Vibración IRD-820. Aún tiene que introducirse el verdadero monitoreo de la condición, pero las técnicas disponibles para la dotación del buque son tales que ahora, por primera vez, el ingeniero tiene la capacidad de determinar la condición de su maquinaria rotatoria.

En el campo de las turbinas de gas, el equipo cogog de la flota ha sido reemplazado en las inspecciones visuales por el uso de endoscopios flexibles y una guía de fácil empleo para los mantenedores a bordo, que contiene

fotografías de alta calidad de todos los posibles defectos. Los detectores de partículas que proporcionan información del material ferroso captado por los detectores magnéticos han permitido establecer las tendencias de la contaminación y, junto al Laboratorio de Materiales de Aviación Naval y el empleo de la espectrografía y de otras técnicas, luego se logrará la detección precoz de posibles fallas en descansos y otras similares. Los monitoreos automáticos de temperatura de entrada de la turbina de poder entregan ahora una indicación de la combustión y de los problemas de empaquetado de la turbina HP. Hay instalados contadores de fatiga que suministran información cíclica y sobre el empleo de la banda de potencia, para la evaluación del estado de la máquina. El Ingeniero de Cargo ahora tiene más posibilidad de sentir la condición de sus turbinas de gas y el tiempo de la máquina entre "overhauls" ha sido aumentado en forma significativa como resultado de un monitoreo mejorado y de la calidad de la información. Sin embargo, no existe ningún método para determinar la vida restante y así el equipo COGOG de la flota continúa tomando las decisiones de cambio basado en la inspección y no en la predicción.

Se han hecho avances significativos en el CBM y en las técnicas y equipos de monitoreo de la condición, pero el desarrollo de la política y de la metodología, que han cambiado muy poco con los años, es un problema más complejo. Esta es el área que ha preocupado al NECMC.

EL NECMC Y LA EVOLUCION DE LAS PRUEBAS DE MONITOREO DE LA CONDICION

Desde su inicio, el NECMC estuvo ansioso de mejorar el rendimiento y concepción del CBM y del monitoreo de la condición en toda la flota. Su primer informe, en enero de 1984, concluyó que se requería un enfoque más estructurado para la introducción y práctica de dicho monitoreo. Reconocía la carencia de toda base de datos y la necesidad de crear una usando los datos existentes entonces, aumentada por la recolección realizada a equipos importantes. Esto permitiría el uso de modelos computacionales de los sistemas navales para determinar los costos de vida útil y la disponibilidad. También recomendó que se prueben los equipos nuevos, previo a su introducción al servicio, para permitir adoptar las mejores decisiones sobre mantenibilidad y monitoreo de la condición. Finalmente, propuso la creación de una sección de especialistas para el CBM y el monitoreo de la

condición en la DGME (¡logrado eventualmente en 1989!).

La prueba de monitoreo de la condición

El Comité determinó que se le debe dar la más alta prioridad a la base de datos. Por consiguiente, se decidió organizar una prueba cuyo fin era proveer datos de manera que el costo-efectividad del monitoreo de la condición fuese mejor comprendido; los riesgos de introducir paquetes de monitoreo de la condición se podrían evaluar más científicamente y se podría determinar la medida en que se puede usar el monitoreo para predecir el tiempo restante hasta la falla. Se encargó un informe con un estudio de costos. La intención inicial de inspeccionar una gran cantidad de equipos empleando sistemas de recolección de datos automáticos con conductores rígidos y colectores manuales fue desechada, desafortunadamente, por problemas de dinero. Las discusiones con diversas secciones especialistas, unidas a las auditorías de ingeniería redujeron a doce la cantidad de equipos a probar. De la lista original de trece equipos propuestos, las turbinas de gas, los diesel y el tren de engranaje principal se consideraron que estaban adecuadamente tratados en otros programas de investigación de dicho monitoreo y, en consecuencia, se excluyeron. Eventualmente se iban a incluir los tableros y cambiadores de frecuencia estática en una prueba complementaria de infrarrojos que se ejecutaría al mismo tiempo. Lamentablemente, esta parte de la prueba también fue abandonada.

Cerca del momento en que concibió la prueba, apareció en el mercado el primer paquete computarizado de monitoreo de la condición conectado a Unidades Portátiles de Recolección de Datos (DCU). Estos son instrumentos de memoria de estado sólido activados por baterías, con teclas, capaces de recolectar datos, incluyendo los de vibración (espectro), de manera simple y de acuerdo a una ruta predeterminada desde un computador personal (PC). Estos instrumentos fueron especificados para la prueba y se completó el estudio para determinar un paquete de "software" y un recolector de datos apropiados. Los buques seleccionados para ejecutar la prueba, originalmente cinco, se aumentaron a siete (cuatro submarinos nucleares, un tipo 22, uno tipo 42 y un CAH) con el préstamo de dos conjuntos de "software" y recolectores procedentes de otro fabricante que aquel seleccionado.

Los objetivos de la prueba eran/son:

—Evaluar la habilidad de las técnicas de

monitoreo de la condición para predecir fallas en los sistemas de ingeniería.

—Proporcionar datos y experiencias para ayudar al MOD (Ministerio de Defensa) (N) a determinar si la introducción de un sistema de monitoreo de la condición moderno, a nivel de la flota, sería costo-efectivo.

—Apoyar a los Ingenieros de Cargo.

—Proporcionar datos y experiencias para ayudar al MOD (N) a determinar si el monitoreo de la condición podía convertirse en una parte efectiva del sistema de observación y de control de la maquinaria.

En la prueba, la dotación del buque recolectará datos periódicamente desde cada equipo con el apoyo de una DCU, siguiendo una ruta predeterminada. Estos datos son parámetros de operación (recolectados diariamente) y lecturas de vibración (recolectados mensualmente), los que una vez obtenidos se transfieren a un disco duro. Una vez al mes, toda la información que se ha recolectado en el mes anterior se envía a Yard Ltd., donde se analiza para determinar si existen fallas declaradas o en grado incipiente y se establecen tendencias para predecir el tiempo probable para que la falla ocurra. Entonces se informa al buque sobre lo averiguado por Yard, junto con las acciones de corrección sugeridas o con una solicitud de información adicional con el fin de establecer mejor la causa probable de una falla futura. Luego se confrontan los datos de todos los buques en una base de datos maestra.

En el caso de que cualquier equipo bajo prueba fallara o fuera sacado del buque por cualquier razón, se somete a un procedimiento de informe de desarme y se armonizan los resultados obtenidos con los del monitoreo de la condición. Además, se envían muestras representativas de aceite, desde sistemas seleccionados, al establecimiento de la Royal Aerospace (RAE) Cobham, para su análisis, y los resultados se envían a Yard para ser comparados con los datos suministrados por las DCU.

Inicialmente se decidió que la dotación del buque no debía hacer uso directo de la información de monitoreo de la condición que estaban recolectando. Se desconocía el rendimiento de la unidad de recolección de datos y su "software" y cualquier sugerencia de rendimiento equívoca podría haber conducido a una falta de confianza y a una reducción subsiguiente en el compromiso. De hecho, las dotaciones de los buques han adoptado totalmente las técnicas y la operación del "software", de manera tal que han aumentado voluntariamente la cantidad de equipos bajo prueba. La mayoría de los

operadores han expresado su entusiasmo por los conceptos, el equipo y el "software".

Los submarinistas también han usado con éxito las características analíticas de las DCU, para investigar las deficiencias en el diseño de ciertos equipos, informando sus descubrimientos a la autoridad de diseño. En general, ha sido tan popular la introducción del computador y del "software" al monitoreo de la condición en los buques de prueba, que a sus dotaciones se le están ofreciendo cursos avanzados de capacitación para permitirles hacer el máximo uso del equipo y "software" que tienen a bordo. Esto también está contribuyendo al mejoramiento de la calidad de los datos que está recibiendo Yard y, en consecuencia, de la respuesta al buque.

Todo esto es especialmente satisfactorio si se considera que la DCU y el "software" corresponden a versiones antiguas; los equipos modernos son más fáciles de usar, más livianos y más rápidos, con "software" más amistosos, capaces y efectivos. Los éxitos son auspiciosos, en el caso que se adopte la decisión de introducir el sistema de monitoreo de la condición por computador a la flota, después de la prueba.

Los resultados hasta hoy son estimulantes. Se ha detectado una cantidad significativa de defectos y se han rectificado antes de producirse una falla catastrófica. La figura 1 demuestra la habilidad para comparar una cantidad de tendencias de los parámetros y presenta el progreso a la alarma de un descanso desde aproximadamente el día 90 y el efecto sobre la tendencia después del reemplazo cerca del día 125. En la figura 2 hay un gráfico que muestra la tendencia de un parámetro del proceso, en este caso presión de entrega de segundo estado en un compresor de aire de HP, que muestra el deterioro gradual de la válvula de succión del tercer estado, en un período de 200 días (en condición de sin-prueba, la dotación del buque habría efectuado mantenimiento a esta válvula dentro de su período programado, de 100 a 150 días). Han habido éxitos similares con las fallas de instalación y con las fallas intermitentes en muchas áreas.

Los indicios existentes hasta esta fecha dan origen a un optimismo razonable de que la prueba alcanzará su objetivo en el momento de su completación, a mediados de 1990.

La prueba infrarroja

En el transcurso de los estudios de ingeniería de los equipos propuestos, quedó en evidencia que una cantidad de defectos eran ocasionados por la falla de los contactos y conexiones

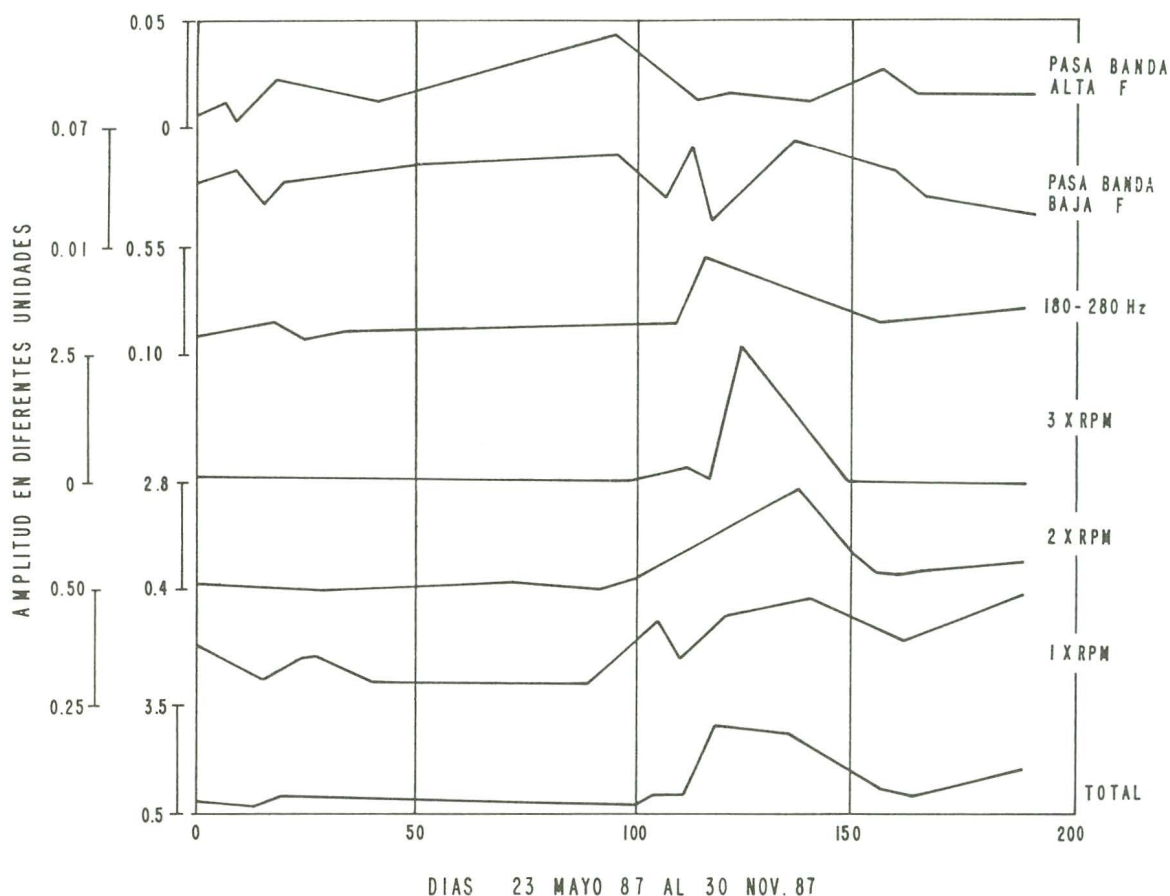


Figura 1

eléctricas y que ellas podían ser detectadas por técnicas de medición infrarrojas. Al comienzo de la prueba de monitoreo de la condición no había equipo infrarrojo disponible que cumpliera con la especificación requerida para el uso a bordo. Cuando apareció el Agema Thermovision 450, que entregaba un registro permanente en formato de video y medía temperaturas con un solo operador, se decidió comprar una unidad para su evaluación. Se sometió a una prueba de seis meses, en paralelo con la prueba de monitoreo de la condición, para investigar la aplicación de técnicas de medición infrarrojas y desarrollar los procedimientos.

Se instauró un equipo especializado de la FVAU que visita los buques que forman parte de la prueba de monitoreo de la condición, a intervalos regulares, y controlan el equipo funcionando en condiciones de operación normal en la mar. Se incluyen en la prueba los cambiadores de frecuencia estática y los tableros de con-

mutación. Además, se ha autorizado para usar el equipo infrarrojo en otros sistemas (cañerías de vapor, paneles eléctricos, etc.) y en otros buques, según lo permitan el tiempo y la oportunidad, y se espera que esto aporte una experiencia adicional del valor del empleo de esta técnica. La prueba comenzó en junio de este año.

La prueba de datos de las guardias

Durante la fase de evaluación de la prueba de monitoreo de la condición quedó en evidencia que se recolecta una gran cantidad de datos en cada guardia, los que una vez cumplida su necesidad operacional básica dejan de prestar utilidad. Aún más, la recolección de los datos por el medio tradicional de lápiz y papel consume mucho tiempo y se carece de la capacidad para realizar un análisis crítico posterior. Se pensó obtener esta información empleando las DCU

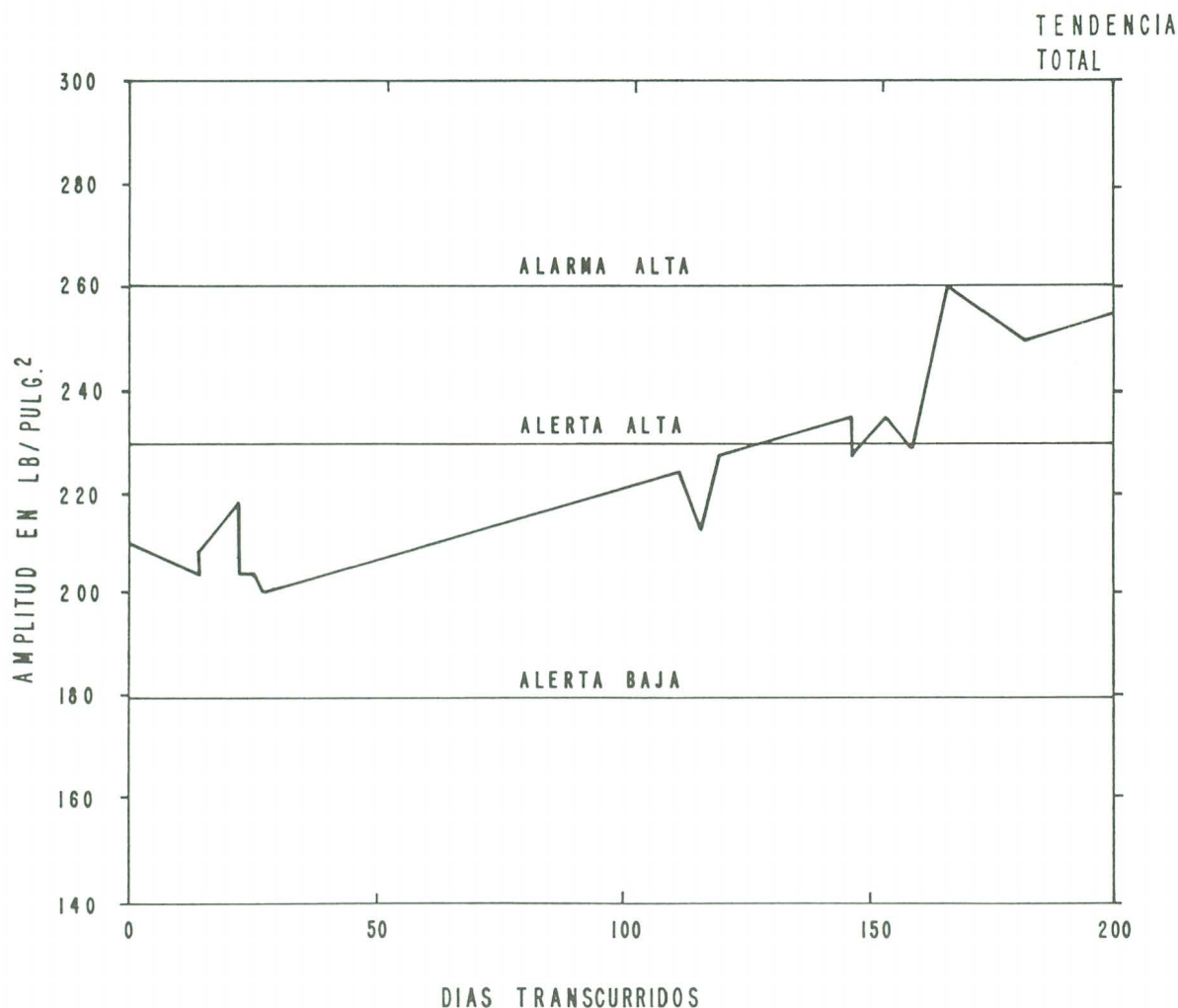


Figura 2

del monitoreo de la condición, pero se rechazó la idea por ser demasiado pesadas y no estar configuradas para una tarea de esa naturaleza; tampoco el "software" es capaz de manejar tal cantidad de datos a intervalos de una hora. A fines de 1988, la Universidad de Manchester diseñó un Organizador Psion modificado para recolectar los parámetros del proceso, de acuerdo a una ruta predeterminada, y el "software" para usarlo. Se acordó desarrollar este "software" para uso naval, configurándolo para ser empleado cada hora e incluyéndole la habilidad de reproducir todos los informes y resultados de las guardias (v.gr.: hojas de registro, datos de combustible, informes de rondas nocturnas, etc.). Se incorporaron algoritmos

para calcular automáticamente las velocidades, niveles de uso, etc., y los procedimientos para reducir los datos diarios, que dan un valor representativo de cada parámetro para usarlo como valor de tendencia en el largo plazo. Se inició una prueba de un año en un destructor tipo 42, en abril de 1989, la que reemplaza por completo el sistema de registro de operación de la maquinaria de la guardia, basado en papeles. La información es recolectada por la guardia empleando un pequeño recolector de datos portátil (el Organizador Psion modificado), el que es cargado con un ruta predeterminada, desde un PC en la Sala de Control de Máquinas. A su regreso, esta información es ingresada en el PC, donde es "ordenada" por el programa.

Primero se le presenta automáticamente al Ingeniero de Guardia una lista de aquellos parámetros que están fuera de límite. Luego, él puede verificar la tendencia de cualquier parámetro, dentro de un período de hasta 48 horas, comparar las tendencias de los grupos de parámetros (muchos de los grupos han sido determinados para facilitar el mejor análisis de la condición de un equipo o sistema en particular), imprimir hojas de registro si se requiere e imprimir informes tales como el de rondas nocturnas, automáticamente. Asimismo, el PC ejecuta cálculos logísticos y otros. Obviamente, es posible ejecutar muchas otras funciones, las que indudablemente surgirán con el uso.

Cada 24 horas, los datos acumulados durante el día "se comprimen" y se transfieren a otro PC que se encuentra en la Oficina Técnica donde el Oficial ingeniero los utiliza para efectuar un monitoreo de la condición y establecer una tendencia a largo plazo para ser usada en la toma de decisiones relativas a mantenimiento, elaborar informes, etc.

TURBINAS DE GAS

El desarrollo de las técnicas de monitoreo de la condición en las turbinas de gas es una actividad de rápido crecimiento y evolución y aquí sólo es posible dar una breve descripción de las diversas técnicas en desarrollo en la actualidad.

La mayor parte de la investigación la está efectuando la Sección de Ingeniería Naval, RAE Pyestock, junto con el programa de desarrollo de Rolls Royce Spey SMA, bajo la dirección de la Dirección General de Ingeniería Naval. Algunas de las técnicas son transferibles a —o se han desarrollado a partir de— técnicas asociadas a los motores diesel, tarea que también está siendo llevada a cabo por RAE. Brevemente, estas son: Análisis del flujo de gas, Análisis de vibración RAE, Técnicas visuales, Monitores de desechos en línea, Sistema de identificación y técnicas asociadas, Administración de la maquinaria.

Análisis del flujo de gas

Este involucra la detección de partículas en el flujo de gas, empleando sondas electrostáticas para monitorear el flujo de gas. Hasta ahora han sido muy propicios los resultados del Sistema de Monitoreo de Descarga de Desechos y se continúa con la prueba. Recientemente se ha iniciado una similar, llamada de Monitoreo de Admisión de Desechos, para evaluar el nivel de desechos que ingresa a las máquinas en servi-

cio. La técnica mide los cambios en las cargas electrostáticas sufridos por las partículas existentes en el flujo de gas, ya sea en forma discreta o como un cambio continuo en el nivel de la señal. Las pruebas han mostrado que existe una cantidad de fallas posibles y cada una de ellas exhibe comportamiento particular; algunas de estas fallas son:

- Roces del sello de las paletas.
- Erosión por gas-carbón caliente de las paletas HP y las guías de admisión.
- Erosión por ingreso de partículas.
- Corrosión por sales, sulfuro y vanadio en el combustible.
- Fallas de combustión/combustor.
- Desprendimiento de revestimientos del combustor, paletas, aspas.
- Fallas de las paletas.
- Cambios en el rendimiento de la máquina.

Se está haciendo una especificación esquemática para un monitor en línea y se considera que esta técnica tiene mucho potencial por desarrollar.

Análisis de vibración RAE

Trabajando junto con NAML Fleetlands ha desarrollado el paquete de análisis de vibración presentado por los Srs. Stuart Hughes Ltd., para adecuarse a la máquina Spey. La máquina está monitoreada por siete acelerómetros y la información grabada en cinta se analiza en forma regular, usando las técnicas avanzadas de procesamiento de señal. El inicio de problemas de descansos, engranajes y paletas puede ser detectado y monitoreado, permitiendo predecir el tiempo necesario para detener la máquina.

Técnicas visuales

Los programas de prueba de inspección óptica en Spey se han aumentado con la de un sistema Videoprobe 2000. Esta es una cámara de video en miniatura que va instalada en un extremo de una sonda flexible que genera una imagen de alta calidad que se proyecta en un monitor y puede ser grabada en video. La imagen puede digitarse e imprimirse, a la vez que pueden ser comparadas a intervalos y registrarse las mediciones, proporcionando así una información de tendencia, por ejemplo para el caso de la programación de una fractura o una corrosión-erosión. En la figura 3 aparece una imagen digitada típica.

Monitores de desechos en línea

Se están probando dos monitores de desechos

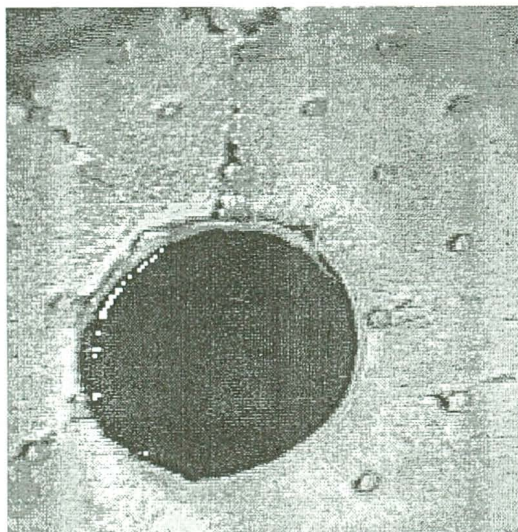


Figura 3
FRACTURA DE MATERIAL

en línea. Esta técnica determina la presencia y progreso de defectos en descansos y engranajes al medir la contaminación por partículas del retorno de aceite. Este trabajo también es pertinente y está siendo probado para los motores diesel.

Sistema de identificación y técnicas asociadas

Los cambios en la condición de la máquina tienden a tener una mayor inferencia en la respuesta transitoria de los parámetros que en sus valores de estado constante. En consecuencia, si fuera posible plotear la respuesta de un conjunto de parámetros dados, durante un cambio de carga dado, cualquier variación en la forma de ese ploteo en los cambios de carga posteriores puede indicar un cambio en la condición de la máquina. La investigación de RAE, en conjunto con Cambridge Consultants Ltd., modeló la respuesta de una máquina, usando el sistema para determinar las funciones de transferencia de los subprocesos seleccionados y las técnicas de reconocimiento del patrón para detectar un cambio en la condición y para identificar fallas. Los estudios iniciales emplearon simulaciones de computador de un motor diesel, para mostrar la factibilidad de este enfoque, y con posterioridad fueron confirmadas en un pequeño motor diesel. Esta técnica se puede transferir directamente a las turbinas de gas y está en desarrollo en Spey.

Administración de la maquinaria

La integración de los datos procedentes de muchas fuentes es necesaria para detectar los cambios en la condición de un equipo y para diagnosticar fallas. En la actualidad esto se hace con poca frecuencia y empleando métodos normales. RAE está intentando determinar las diversas combinaciones de parámetros requeridos para fallas dadas, para desarrollar los algoritmos necesarios y para lograr la integración y análisis requeridos, usando métodos computarizados. A la fecha se ha configurado una estructura de Sistema Experto para evaluar su potencial como herramienta de diagnóstico de fallas.

Los resultados iniciales son promisorios. Las técnicas de inteligencia artificial que se están desarrollando para motores diesel (DEIMOS) tienen aplicaciones potenciales en el campo de las turbinas de gas.

MOTORES DIESEL

Al igual que para las turbinas de gas, el monitoreo de la condición en los motores diesel es un tema que se expande con rapidez. La mayor parte de la investigación también la está realizando RAE Pyestock, aunque una cantidad significativa ha sido emprendida por la FVAU, particularmente en relación con el análisis de vibración torsional. Algunas de las técnicas en revisión son: Análisis de vibración, Muestreo de aceite lubricante, Medidores de rendimiento de inyectores, Medidores Blowby, Pruebas de rendimiento del turbo cargador, Sistema de Monitoreo de la condición de la máquina, Monitoreo del consumo.

Análisis de vibración

El control efectuado por la FVAU, combinado con los Registros de Monitoreo de Vibración tomados por el personal a bordo, están proporcionando datos valiosos, a pesar de las dificultades inherentes en una máquina recíproca. Los defectos están siendo detectados en forma bastante oportuna, lo que permite adoptar la acción correctiva con antelación. Las técnicas de vibración torsional, al igual que el muestreo de líquido amortiguador, están demostrando su valor. Se ha asignado a RAE la tarea de conducir una investigación de los factores que afectan la amortiguación y la racionalización del equipo de Vibración Torsional en la Flota. La investigación se ha orientado al uso de vibrómetros doppler láser para la determinación de la vibración torsional y parte de la grabación de vibración

lineal, como aquella asociada con la condición del inyector-cilindro. Se puede obtener mucho a partir de estas técnicas, pero lo complejo del análisis impedirá su introducción a la flota durante cierto tiempo.

Muestreo de aceite lubricante

Se están investigando equipos de prueba mejorados que usan tecnología moderna, con el fin de limitar los cambios sólo a requerimientos u "overhaul".

Medidores de rendimiento de inyectores

Se están instalando dispositivos de rendimiento del inyector para determinar externamente el rendimiento del inyector y se están efectuando las pruebas para determinar su utilidad.

Medidores Blowby

Un medidor Blowby, de Cisson, ha sido probado con éxito en RAE y se está efectuando una prueba en la flota para determinar los parámetros de operación asociados al medidor.

Pruebas de rendimiento del turbocargador

Empleando tiempos fuera de servicio han ofrecido, a la fecha, escasa evidencia del estado del equipo o evitado fallas. Sin embargo, el criterio ingenieril sugiere que el rendimiento de dicha parte vital del equipo debe proporcionar cierta indicación de la condición. La experiencia con el sistema de identificación empleado con las turbinas de gas sólo indica que el análisis de transientes debe proporcionar la información necesaria, usando combinaciones de condiciones entrada-salida (temperatura, presión y velocidad). Se están efectuando pruebas en la RAE.

Sistema de monitoreo de la condición de la máquina

Este sistema determina la condición de los componentes en el cilindro, empleando el análisis del diagrama de presión del cilindro. Un programa de computador deriva la presión del cilindro empleando datos de esfuerzos medidos en pernos y golillas y también es capaz de monitorear otros parámetros. El objeto es proporcionar un sistema computarizado que monitoree parámetros y los compare con modelos de referencia. La sensibilidad a pequeños cambios, en ciertos parámetros, es detectada por un banco de datos computarizado que contiene un

complejo mapa de condiciones aceptables. En este momento se está validando el sistema en las máquinas Valena y Ventura, en Pyestock. Luego se combinará un Sistema Experto para Motores Diesel (DEIMOS), con un Sistema de Monitoreo con Base en la Condición y un Sistema de Diagnóstico de Fallas desarrollado por Ricardo Ltd., respaldado con fondos de un consorcio de British Raid, GEC y la Real Armada, que analizará los parámetros fuera de tolerancia y proporcionará un diagnóstico de condición de falla al operador.

Monitoreo del consumo

La determinación exacta de las tendencias de uso del aceite y del lubricante pueden dar una buena indicación de la condición de la máquina. Se están investigando dispositivos capaces de monitorear el consumo de combustible y la relación entre el consumo de combustible y la posición de la cremallera.

AUXILIARES

Se están investigando varias técnicas, además del análisis de vibración, para bombas de todo tipo. Es fundamental en estos estudios la identificación de un flujómetro exacto y se está analizando para determinar el instrumento portátil más efectivo. Hay varios en el mercado y esta es otra área de la tecnología que se está moviendo rápido.

Por otro lado, se realiza un estudio de factibilidad de monitoreo de la corriente y otras técnicas de uso en los motores eléctricos. Pronto comenzará la investigación de la determinación de la condición de motores de gran potencia y movimientos cortos, tales como los motores de ronza de cañones, que ofrecen escasa oportunidad para la medición de parámetros.

DESARROLLOS FUTUROS

Las técnicas de monitoreo de la condición se encuentran permanentemente en revisión.

Es difícil mantenerse a la velocidad que se están produciendo los nuevos equipos y procedimientos. Los diseñadores y fabricantes de equipos y las universidades están investigando constantemente en la búsqueda de nuevos métodos, que se desarrollen en nuevos campos que sirvan para destacar las prácticas existentes. La Real Armada está por investigar una serie de estas, con el fin de incluirlas en la variedad de técnicas que se usan actualmente en el servicio. La intención es la de concentrarse ini-

cialmente en aquellas técnicas que pueden ser empleadas por las dotaciones de los buques en el transcurso de su trabajo normal, limitando el trabajo en tierra a la asesoría y a la confirmación de descubrimientos de equipos más complejos donde sea necesario.

La idea es restringir el monitoreo de la condición de la autoridad en tierra a un mínimo, a pesar que en el corto plazo la complejidad y costo del equipo impedirá esto en ciertos casos. Sin embargo, el avance es tal que hasta algunas de las técnicas y equipos más caros y complejos se reducirán a proporciones manejables, antes de que transcurra mucho tiempo. Uno tiene que recordar solamente la cantidad de equipos caros y delicados que el experto altamente entrenado en análisis de vibración debía transportar, no hace más de cinco años. La mayor parte de esos equipos, ahora más baratos y fáciles de transportar, que son capaces de recolectar, almacenar e interpretar gran cantidad de información, a la vez pueden ejecutar una serie de otras funciones (tal como un programa de balanceo en dos planos) y todo esto por un mantenedor con algún entrenamiento. A continuación se discuten algunas de estas técnicas:

Análisis de aceite

La Real Armada ha empleado el análisis de aceite en diversas formas durante muchos años. Las pruebas de viscosidad, dilución del combustible, contenido de carbón, sal y agua se ejecutan en forma regular en los equipos principales y el monitoreo de desechos se emplea en las turbinas de gas asociadas al programa espectrográfico de la Aviación Naval de la Flota. Con excepción de esta última, estas pruebas dan poca información sobre la condición de la máquina; principalmente indican la necesidad de cambiar el aceite. Hasta hace poco, el equipo para cualquier otro análisis de aceite era caro, complejo, requería de experiencia y conocimientos para operarlo y no se encuentra normalmente a bordo. Sin embargo, en la actualidad los ingenieros y los especialistas están concentrando una gran cantidad de recursos en el desarrollo de dispositivos simples, automáticos, capaces de analizar la condición interna de la máquina, como también la condición del aceite.

En ferrografía están saliendo al mercado instrumentos baratos (del orden de \$ 2 a 4 mil, para ser empleados por personal sin experiencia) que proporcionan una lectura de las partículas de desgaste ferroso en una muestra de aceite, como una cantidad simple cuya tendencia se puede establecer. La información proce-

dente de estos instrumentos puede entregarse directamente a un computador y el ingeniero puede enterarse automáticamente, toda vez que una máquina en particular ha alcanzado sus límites preestablecidos. Cuando ocurre esto las muestras deben enviarse a tierra o a un buque de apoyo y deben efectuarse más análisis, no en laboratorio como en la actualidad, sino que por personal naval en una estación de trabajo ferrográfico, empleando una presentación de video del tipo de partícula y una biblioteca de comparaciones de discos ópticos. Esto permitirá dar una respuesta rápida al buque y una mayor claridad sobre la condición de la maquinaria. Todo esto se encuentra disponible a un costo razonable y requiere el mínimo de capacitación. El avance en el campo de la ferrografía es rápido y es seguro que muy pronto estarán en producción instrumentos más simples y específicos.

Otro avance atractivo es el desarrollo del Análisis Infrarrojo de Transformador de Fourier. Esta técnica se ha estado usando en laboratorio durante algunos años, con el empleo de la espectrografía infrarroja para determinar el contenido de contaminantes en el aceite. El nuevo y más compacto equipo entregará un análisis completo de productos de degradación y contaminantes del aceite, a partir de una muestra; basta con esparcirla sobre una placa y esperar 30 segundos después de presionar el botón. Una impresora proporciona un informe completo que incluye la respuesta espectral para los productos de degradación, más una concentración calculada para los contaminantes claves; este también se ingresa al computador para determinar las tendencias y análisis posteriores. Este equipo también entrega resultados rápidos, fáciles de comprender, con operadores con escaso entrenamiento. En la actualidad su costo (aunque es relativamente barato) y su tamaño serían las limitantes para su uso como apoyo de la base o de importantes unidades de la flota. Con el tiempo, lo más probable es que la unidad se desarrolle para ser más portátil y su costo sea menor, lo que permitirá su uso en buques más pequeños.

Muchos programas de servicio de equipos requieren cambios de aceite a intervalos regulares, generalmente determinados por las horas de funcionamiento. A menudo, este aceite está en excelentes condiciones y, por el contrario, en otras ocasiones las máquinas pueden haber estado operando durante muchas horas con el aceite degradado y fallas no detectadas que provocan un desgaste excesivo. La Universidad de Dayton ha desarrollado un instrumento simple, previo a su producción, que

determina el nivel de antioxidantes en una muestra de aceite. Esto se puede plotear en el tiempo para predecir el momento de cambio o para detectar el inicio de ciertas fallas. Igualmente, está conectado a un computador, es fácil de operar y requiere escaso entrenamiento. Su costo es tan bajo que no necesitará muchos cambios de aceite para que se pague solo. Se ve especialmente promisorio para su empleo en aceites lubricantes de motores diesel.

Muchas otras técnicas y equipos se encuentran en desarrollo y creo que el análisis jugará un papel mucho más efectivo y comprensivo en el monitoreo de la condición en un futuro cercano.

Monitoreo eléctrico

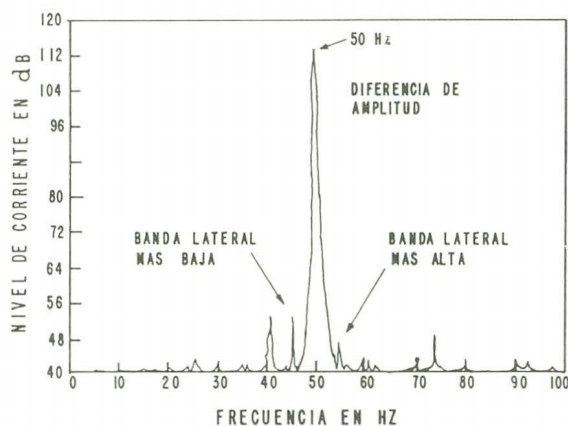
Hasta hace poco, el monitoreo eléctrico había estado limitado a parámetros del proceso y a rendimiento. Muchos equipos tienen, por supuesto, equipos de prueba automáticos incorporados, pero generalmente el objeto de este monitoreo es detectar fallas y no conocer la tendencia de la condición. Se está llevando a cabo una gran investigación para tratar de determinar el inicio de fallas y desarrollar métodos para observar su tendencia. La más promisoría de estas técnicas es la del monitoreo de corriente. Este es un método no intrusivo; se emplea un transformador de corriente de gancho para capturar el espectro de frecuencia de una corriente de motor de inducción. Cuando se muestra en forma gráfica, este presentará un

"peak" predominante en la frecuencia de la corriente, con escaso ruido o bandas laterales para una máquina nueva, pero con bandas laterales significativas para una máquina con defectos (figura 4).

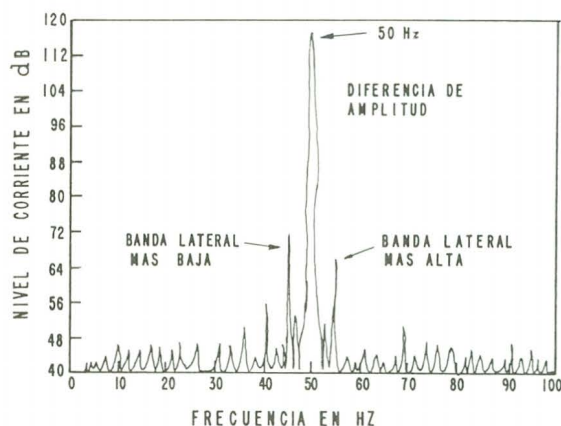
Ahora existe en el mercado un Sistema Experto, el cual toma y analiza los datos necesarios para identificar fallas tales como barras de rotor rotas, rotores "scared", excentricidad del rotor, desbalanceamiento mecánico, problemas de descansos y muchas otras fallas mecánicas más, sin dejar fuera de servicio la máquina. En la actualidad este es un método de detección de fallas solamente, pero se está llevando a cabo una gran investigación para convertirlo en una herramienta de monitoreo.

La investigación y el desarrollo están muy bien encaminados para el monitoreo no intrusivo de máquinas eléctricas, empleando el análisis de flujo axial para el suministro eléctrico y los problemas de bobinado, análisis de gas de enfriamiento para la determinación de fallas de bobinado y aislamiento, análisis de fluctuación de velocidad para defectos de bobinado del rotor, además del tradicional análisis vibracional aplicado a problemas puramente eléctricos. Estos métodos deben introducirse como una práctica normal en un futuro cercano. El aumento en el uso industrial de los robots le ha dado a esta área de monitoreo de la condición un impulso considerable.

Como resultado, métodos más exóticos están siendo considerados en universidades y laboratorios de investigación, centrados princi-



1.- EL MOTOR EN CONDICION IDEAL MUESTRA UN PEAK PREDOMINANTE EN LA FRECUENCIA DE FUNCIONAMIENTO (50 Hz), MAS BANDAS LATERALES SEPARADAS POR EL BOBLE DEL DESLIZAMIENTO



2.- LA AMPLITUD DE LA BANDA LATERAL AUMENTA CUANDO SE PRODUCEN AREAS DE GRAN DE RESISTENCIA Y BARRAS DEL MOTOR QUEBRADAS

Figura 4

palmente en procesamiento de señal, pero no estarán para uso masivo hasta un tiempo más.

Emisión acústica

Hasta hace poco tiempo la emisión acústica ha estado limitada por el costo y complejidad de sus sensores y la interpretación de sus señales, en especial para los campos de las pruebas no destructivas en el campo estructural. La investigación para uso en las turbinas de gas ha conducido al desarrollo de sensores baratos y sencillos, en este momento en etapa de evaluación, que apenados a un equipo pueden usarse conectados a un computador para determinar distintas condiciones, para plotear y obtener una tendencia de los resultados y, si no se cumplen los patrones de emisiones especificados, para hacer sonar alarmas o detener la máquina. Es especialmente atractivo, ya que ofrece la posibilidad de usar el mismo par de sensores, uno de alta y uno de baja frecuencia, para monitorear la condición de los descansos, el flujo y la emisión de roturas, dependiendo de la información del computador y su habilidad para analizar las señales resultantes. La figura 5 muestra

su empleo para detectar el inicio de la cavitación.

La Real Armada ha comprado una serie de equipos de evaluación y está investigando su potencial en el Royal Naval Engineering College y otras universidades. Todavía es prematuro para concluir, pero pareciera que es una técnica que tiene mucho potencial.

Monitoreo de rendimiento

Desde las primeras máquinas que se incorporaron a los buques, los ingenieros han registrado los parámetros de operación en forma rutinaria y han determinado el rendimiento de sus equipos. Generalmente, esto ha sido sobre una base de tiempo real y los datos, por lo general, luego han sido destruidos. En general, no ha sido posible o no se ha considerado el uso de esta información para predecir la condición. La toma de datos de la guardia, ya descrita, es un primer paso hacia el uso de esta información en el campo del monitoreo de la condición, pero queda mucho trabajo por hacer para desarrollar los algoritmos necesarios para determinar exactamente el rendimiento. Para este fin se

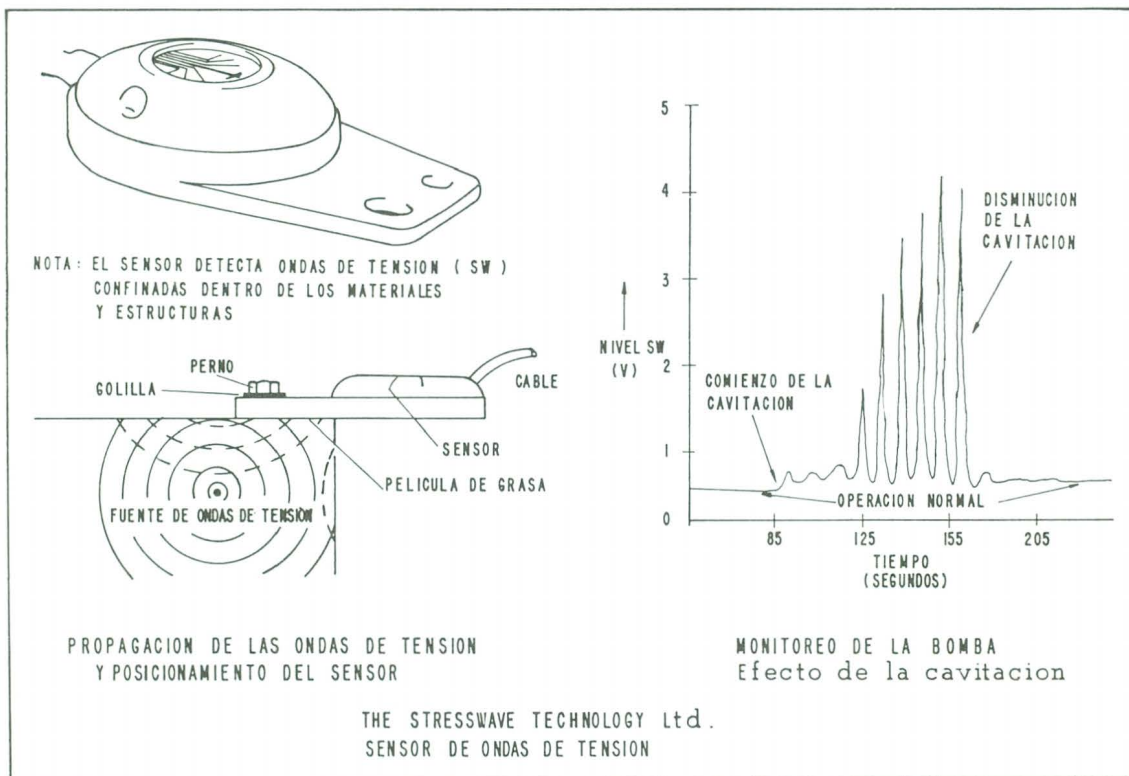


Figura 5

está trabajando mucho en desarrollar modelos de máquinas en computador. Como se dijo, existe un modelo para un motor diesel, uno casi completo para bombas y se encuentran en desarrollo varios modelos de turbinas de gas, los que se emplearán para determinar el rendimiento de la máquina, dada una variedad de parámetros variables, y después plotear las tendencias asociadas a esos parámetros para predecir el desarrollo de las fallas.

Fundamental para el desarrollo del monitoreo de rendimiento computarizado es la provisión de sensores exactos y confiables capaces de producir su información en forma digital. Existen algunos que pueden satisfacer la especificación técnica, pero todavía son muy caros y con excepción de los transductores de vibración pareciera existir escasa investigación en desarrollo para remediar la situación. Hasta que se disponga de tales sensores, es probable que

el monitoreo de rendimiento se restrinja a instalaciones nuevas, como parte del control de la maquinaria y de los sistemas de observación, siendo demasiado caro modificar los existentes, si se compara con las ganancias percibidas.

La tendencia de la eficiencia puede dar una indicación temprana de una falla incipiente. Se ha efectuado un gran trabajo en diversas universidades para determinar la cantidad mínima de mediciones simples requeridas para obtener un valor repetible y razonablemente exacto de la eficiencia en condiciones de operación normal. Ahora hay por lo menos dos sistemas en producción capaces de proporcionar esta información para bombas rotatorias. Dependen de la determinación del aumento de temperatura a través de la bomba, lo cual da un valor de eficiencia para un aumento de presión dado a través de ella. La ventaja de estos sistemas es que son baratos, no intrusivos, se instalan con

facilidad y generalmente emplean la instrumentación existente. La figura 6 muestra una disposición general típica y el gráfico correspondiente. El sistema ha sido probado por unidades grandes, de gran capacidad, y se cree que son efectivos en unidades menores, con razones de flujo más pequeñas. La Real Armada va a comprar una cantidad de estos equipos con fines de prueba.

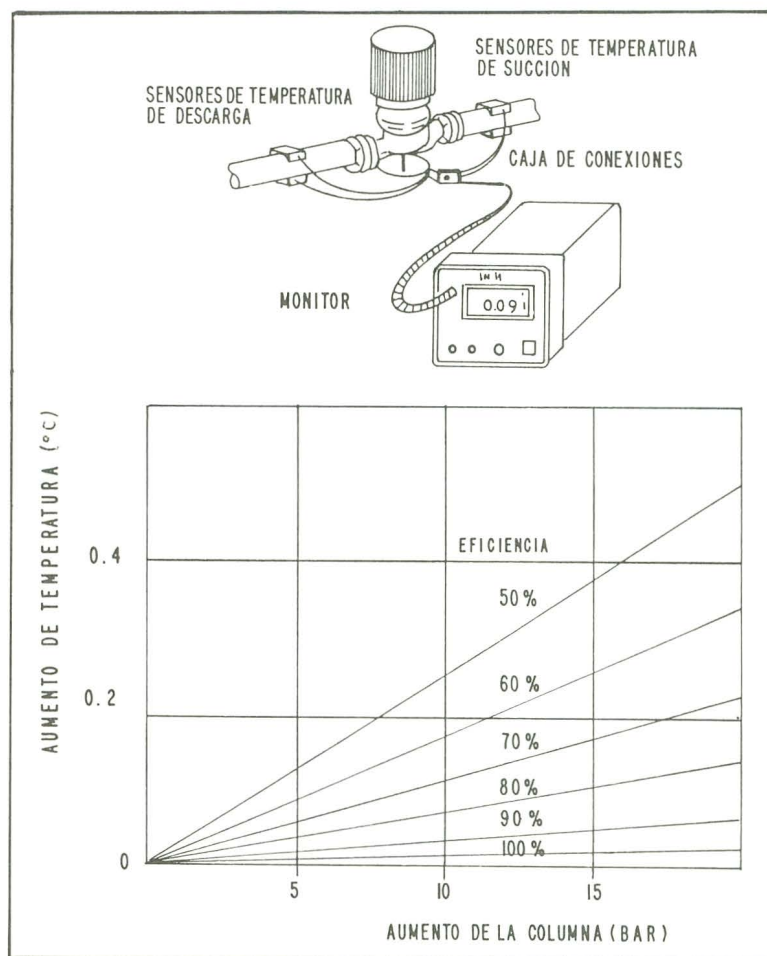


Figura 6

Sistemas Expertos

Se aprecia que el monitoreo de la condición es ideal para ser incorporado a los Sistemas Expertos. Ya se ha mencionado el desarrollo de un Sistema Experto para Motores Diesel, pero esto se encuentra en etapa experimental. Se puede encontrar en el comercio programas para el análisis de vibración, capaces de ser usados con recolectores de datos y con el "software" respectivo y monitoreo de corriente. Los programas de análisis de aceite están en desarrollo para espectrografía y ferrografía. No pasará mucho tiempo hasta que se disponga de

técnicas de monitoreo de la condición en forma computarizada, que incluyan un programa de análisis experto.

Se entiende que un sistema experto es un apoyo. No reemplazará al experto, ni será infalible, a pesar de las declaraciones de los diseñadores y del "marketing" de "software". Tan sólo distribuirá la información recibida y eliminará lo evidente. Debe suministrar al operador, en nuestro caso al Oficial de Cargo, una evaluación de, por ejemplo, tres fallas más probables, asociadas a una probabilidad, y ser capaz de proporcionar una explicación del porqué ha llegado a su conclusión. Luego, el operador está en una posición de decidir el mejor curso de acción o determinar si se requiere más investigación o análisis. Al igual que cualquier programa de computador, es todo lo bueno como la información que reciba, en especial su base de conocimientos. La ventaja respecto de un programa algorítmico es que se puede enmendar con facilidad e idealmente sería capaz de aprender por su propia experiencia (aunque aún falta para esto).

Para hacer uso total de esta información nueva y compleja con la que ahora cuenta el ingeniero, surge la necesidad de un sistema de administración computarizado que en sí debe incluir un sistema experto para interpretar las soluciones que están siendo suministradas por los propios sistemas expertos del equipo, sistema o procedimiento. De hecho, un caso podría ser una serie de sistemas de administración expertos por áreas de equipos mayores, como turbinas de gas, diesel, aire acondicionado, etc., todos ellos controlados por un sistema maestro. Ya ha comenzado la investigación en el Royal Naval Engineering College para desarrollar dicho sistema para turbinas de gas y se necesitaría poco trabajo para habilitar a DEIMOS para actuar como un sistema de control experto general. Queda mucho trabajo de investigación por hacer, pero el avance es rápido y se puede esperar el uso extensivo de los sistemas expertos dentro de los próximos cinco años.

AREAS QUE REQUIEREN MAS INVESTIGACION Y DESARROLLO

Existe una serie de áreas que necesitarán más investigación y desarrollo antes de que se pueda introducir un verdadero sistema de monitoreo de la condición, o antes de que se puedan obtener todos los beneficios del sistema. Se está trabajando en la mayoría de los temas que se discutirán como parte de otro programa y esto requeriría de una nueva coordinación para

incorporarlo al sistema de monitoreo de la condición seleccionado.

Predicción del momento de falla

La mayoría de los sistemas de monitoreo de la condición usan una predicción en línea recta, del tiempo a fallar, variando sólo en el método de generar la línea (cuadrados mínimos regresivos durante las últimas tres, cinco, o más lecturas, por ejemplo) a pesar del hecho de que el comportamiento no obedece a una recta, sino a una exponencial. El resultado es una predicción optimista, a menudo tan violento, que reduce la confianza en el sistema y puede llevar a un tiempo de para no planificado.

Sin duda que habrá cierta mejora en el trabajo que se está haciendo empleando modelos computacionales y como tal exactitud de las lecturas mejora mucho el ajuste de las curvas, se aplicarán más fácilmente las técnicas que emplean funciones exponenciales. Más aún, dado que se obtiene más información con los patrones de falla para equipos dados, los sistemas expertos serán capaces de predecir tiempos a partir de la experiencia.

Reducción de datos

Al comienzo del monitoreo de la condición la moda era recolectar datos sobre tantos parámetros como los que pudieran obtenerse y luego probar y descubrir qué es lo que se podía hacer con ellos. Esto era una pérdida de esfuerzo y una carga para el personal de mantenimiento. Pronto sobrecargó los sistemas de archivos de datos y complicó los procedimientos para determinar la condición. La práctica corriente es obtener la cantidad mínima de parámetros requeridos, monitorear para identificar fallas y sólo aquellas fallas que se podrían esperar sucedan en la máquina o sistema que se trata. Con el aumento de las técnicas disponibles, esta cantidad de información puede incluso conducir a sobrecarga después de un tiempo relativamente corto, en especial en sistemas que se basan en PC.

Existe la necesidad de desarrollar técnicas que reduzcan la cantidad de datos que se mantienen en la base de datos, sin perder ninguno que sea de valor. Un ejemplo que ya se encuentra en uso es el de reducir el espectro de vibración a una serie de "ventanas", esto es, secciones del espectro, normalmente de 400 líneas, cada una de las que representa, sola o en conjunto con otras, una falla en particular. Se necesitará desarrollar técnicas como estas para los otros procedimientos de monitoreo de la

condición, en especial cuando se introducen sistemas expertos, para evitar la sobrecarga y permitir que el sistema opere a una velocidad razonable.

Confianza

La detección de fallas es relativamente fácil empleando la mayoría de las técnicas de monitoreo de la condición. Un ingeniero enfrentado a la evidencia de una falla inminente, por lo general estará bastante preparado para aceptarla y adoptar una acción consecuente. Lo que es más difícil que él acepte, en especial si está a punto de embarcarse en una misión importante o de operar durante un período prolongado lejos de la base, es si los resultados de este monitoreo indican que el equipo está perfectamente satisfactorio y efectivamente no esconde signos de una falla incipiente. Esta incredulidad aumenta exponencialmente por la criticidad de la máquina que se trata. Existe una tendencia natural a querer efectuar mantenimiento preventivo en equipos sensibles, en un intento por dar cierta seguridad de operación en toda la misión. Por lo tanto, existe la necesidad de crear confianza de que la indicación de ausencia de falla es correcta y que se puede confiar en el equipo para el cumplimiento de su función durante el período requerido. Esto se puede lograr por medio de una combinación de patrones de rendimiento y modos de falla provenientes de modelos computacionales y la determinación, en la práctica, de tiempos promedios hasta la falla de equipos completos y sus componentes.

El uso eficiente y efectivo de los sistemas de monitoreo de la condición computarizados también se presta para transmitir los datos de disponibilidad, confiabilidad y mantenibilidad. A medida que aumente la experiencia aumentará la confianza, siempre que se produzca la retroalimentación suficiente a la dotación del buque para que adquiera conocimientos sobre las capacidades y rendimientos de sus máquinas y su equipo de monitoreo.

EL SISTEMA INTEGRADO DE MONITOREO DE LA CONDICION

La introducción del monitoreo de la condición a la flota ha sido más bien gradual. Se han agregado nuevas técnicas al repertorio del mantenimiento a medida que se encuentran disponibles y a menudo han sido usadas sin una verdadera apreciación de su valor cuando se ha aplicado a una máquina o servicio en particular. Rara vez se han incluido instrucciones de uso

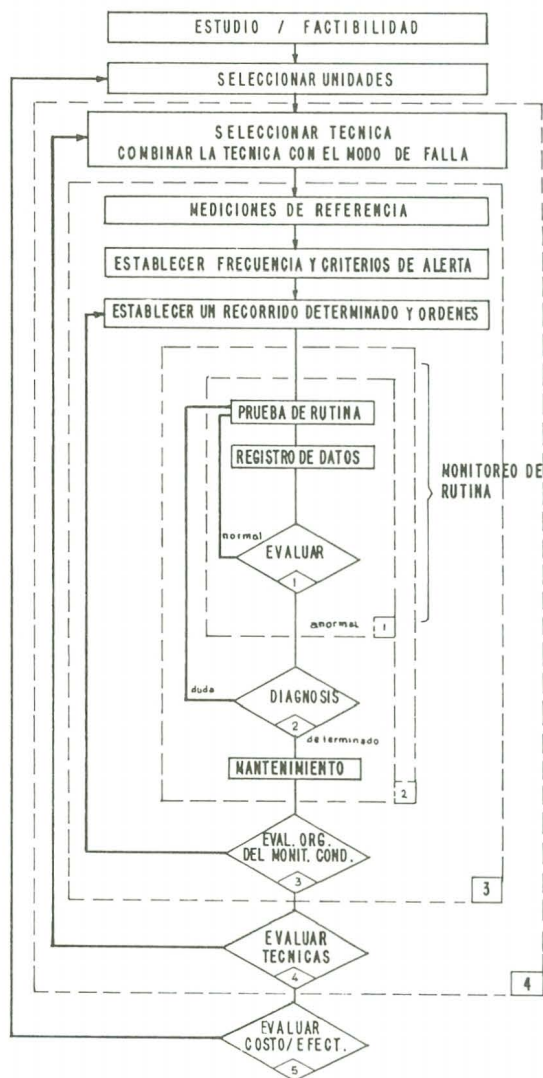


Figura 7

DIAGRAMA DE FLUJO DEL MONITOREO DE LA CONDICION

para enmendar el sistema de mantenimiento, antes de su introducción. Se ha necesitado un gran esfuerzo para modificar todo el Sistema de Administración de Mantenimiento para incluir las técnicas existentes de monitoreo de la condición actualmente en uso. Esto ha dado como resultado una mayor conciencia de dicho monitoreo, pero el sistema todavía no muestra el enfoque integrado necesario para el uso eficiente de su mano de obra y equipos. Un diagrama de flujo para el desarrollo de dicho sistema se describe en la referencia 4 y aparece en la figura 7.

Primero se ejecuta —junto con las autoridades de diseño— una “auditoría de ingeniería” para determinar la aplicabilidad del monitoreo de la condición a todos y cada uno de los sistemas y equipos. A cada uno se le debe asignar una categoría de mantenimiento, tal como se describe en la tabla 1. Se deben determinar los probables patrones de falla para decidir cuáles son las fallas probables y con qué frecuencia. Los especialistas en monitoreo de la condición investigarán entonces dónde y por qué método se pueden detectar y, especialmente, si se pueden predecir. Una vez que la auditoría está determinada se debe decidir si los datos se recolectarán usando sistemas fijos o portátiles.

Para los buques ya en servicio, generalmente será conveniente emplear DCU portátiles y sistemas manuales. A medida que disminuye el costo de los sensores y se dispone de sistemas multiplexores avanzados, es probable que la opción de instalar sistemas fijos sea más fácil de afrontar pero, generalmente para los sistemas existentes, predominará la recolección de datos manual durante algunos años. En los nuevos, en construcción, debiera ser posible incluir más sistemas fijos, pero debe tenerse cuidado de no aumentar la carga de mantenimiento con la introducción de excesiva instrumentación. Para producir un sistema de monitoreo de la condición fácil de operar y eficiente es necesario reducir la cantidad de parámetros registrados al mínimo necesario, para asegurar la detección oportuna de defectos. En consecuencia, se debe tener cuidado de asegurar que los ARM de la instrumentación instalada sean mayores que aquellos de los equipos donde está instalada; la imposibilidad de detectar fallas por instrumentación defectuosa afectará seriamente la confianza en un sistema. Una vez recolectado todo, los datos se pasarán al computador para su análisis y almacenamiento.

Según sea la complejidad del sistema y la cantidad de datos, esto será en un PC propio o conectado a una red o en un minicomputador. Esta decisión también dependerá en cierta medida del grado de automatización requerido del sistema, la cantidad de equipo de monitoreo instalado y el nivel de “experiencia” incorporado. En ambos, se debe dar tanta consideración en la selección del “software” como en cualquier otra parte del sistema. Debe ser simple de usar, presentar su información en forma clara y concisa, ser de operación rápida y capaz de ser enmendado y actualizado por el usuario, sin recurrir a especialistas de “software”. En la figura 8 aparece un sistema típico integrado de monitoreo de la condición.

Una vez que se ha decidido el diseño del sistema, el especialista debe adecuarlo para el buque, determinar las mediciones de referencia para cada parámetro de equipo y confirmar la factibilidad de su recolección. Luego debe decidir sobre el método de determinar el nivel de alerta y alarma (empírico, porcentaje de aumento, estadística, etc.) y establecerlos. Debe decidir la frecuencia de recolección de cada parámetro e introducir el recorrido a seguir y el orden para la recolección manual de datos. Una vez efectuado lo anterior, el buque puede comenzar a operar el sistema bajo la dirección del especialista. Por esta razón, cuando se instala un sistema de monitoreo de la condición en un buque debe planificarse para un período en que el buque opere cerca del apoyo de la base durante un corto período, para permitir las correcciones del sistema tan pronto como se descubran los problemas. Una vez que el sistema esté en total operación no debe considerarse como fijo y final, sino mantenerse en revisión permanente.

EL SISTEMA DE ADMINISTRACION DE MANTENIMIENTO

Para hacer el mejor uso de los datos obtenidos, usando un sistema computarizado de monitoreo de la condición, será necesario usar un sistema de Administración de Mantenimiento. La figura 9 muestra un diagrama en bloque simplificado de dicho sistema. Cada uno de los bloques representa un sistema computarizado individual, unido bajo un programa de administración de control. Existe una cantidad de dichos sistemas en el mercado, unos mucho más exitosos que otros. Los mejores están diseñados de manera que cada acción en un programa de mantenimiento está unida a las acciones asociadas. Los datos desde un bloque, en dicha figura, pueden trasladarse a cualquier otro y se debe incorporar a cualquier informe o proceso de decisión. La referencia 4 describe dicho sistema y la figura 10 es el diagrama de flujo que le corresponde.

Cada elemento puede ser manual o computarizado. El recorrido, construido en base al inventario de la planta, es mantenido en el catálogo de trabajo y planificado y editado de la misma forma que los requerimientos de mantenimiento planificado o correctivo. Después de emitir el recorrido se asigna el trabajo, se ejecuta el recorrido y se actualiza el sistema, para establecer las tendencias, y el de mantención de registros del monitoreo de la condición. Se efectúa el análisis de monitoreo de la condición

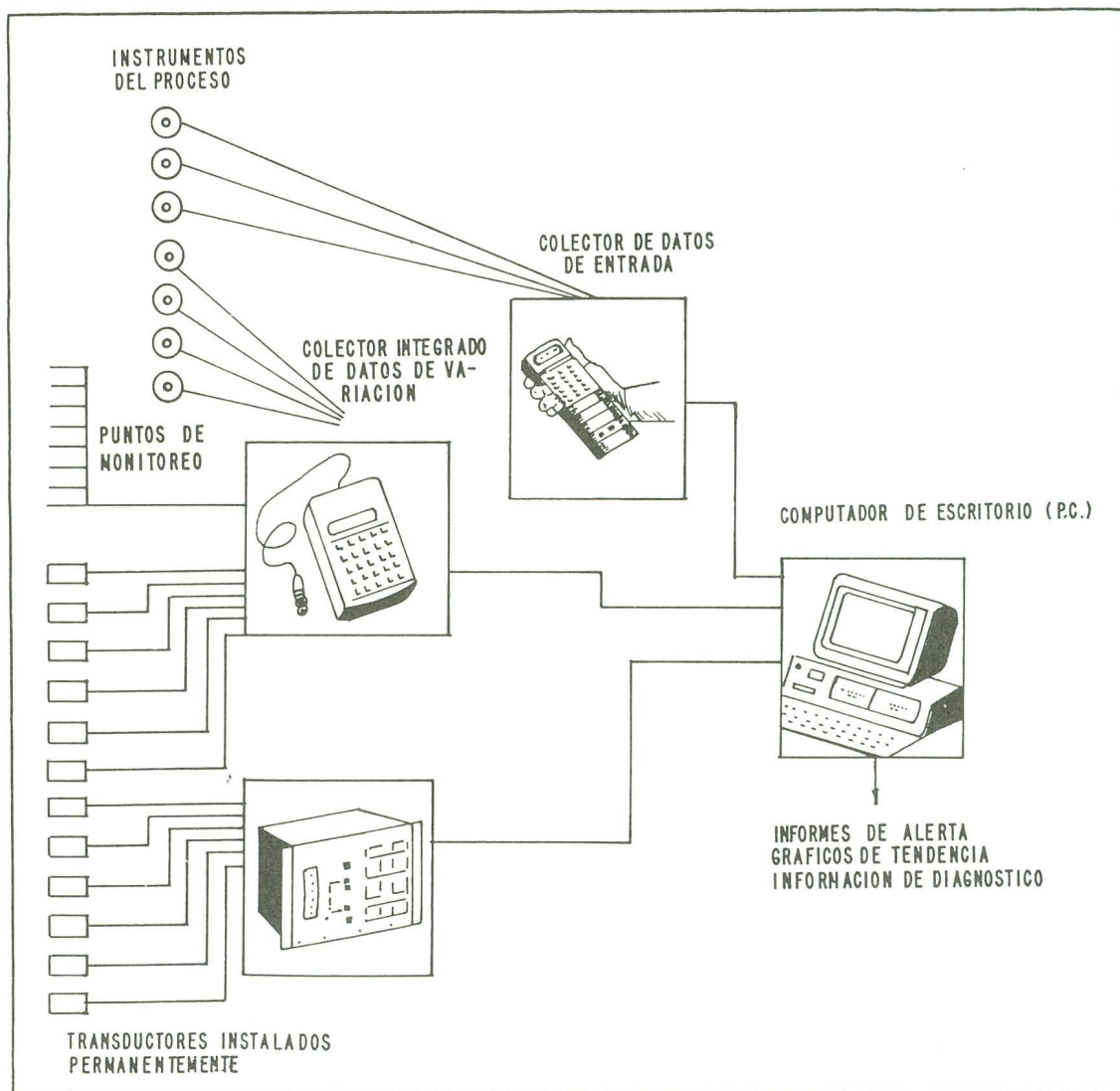


Figura 8

SISTEMA INTEGRADO DE MONITOREO DE LA CONDICION

y se adopta la decisión respecto de la necesidad de cualquier trabajo detectado. Si se requiere, se adopta una acción inmediata, o bien el trabajo menos urgente se agrega a la planificación de trabajos.

Un rasgo importante del diagrama es el flujo de información entre el sistema de análisis de monitoreo de la condición y el Sistema de Historia de la Planta. Esto permite un análisis exacto del historial de la planta y del registro de lecturas anormales donde no se adoptó ningun-

na acción correctiva.

El trabajo requerido para el caso anterior o mantenimiento preventivo sigue la misma ruta. Así, en cualquier momento dado, el Ingeniero de Cargo puede determinar el verdadero estado de su equipo y tiene toda la información necesaria para planificar y controlar su departamento. Existe un campo considerable para controlar el sistema general; ninguno está todavía en producción, pero sólo es asunto de tiempo antes de que se introduzcan.

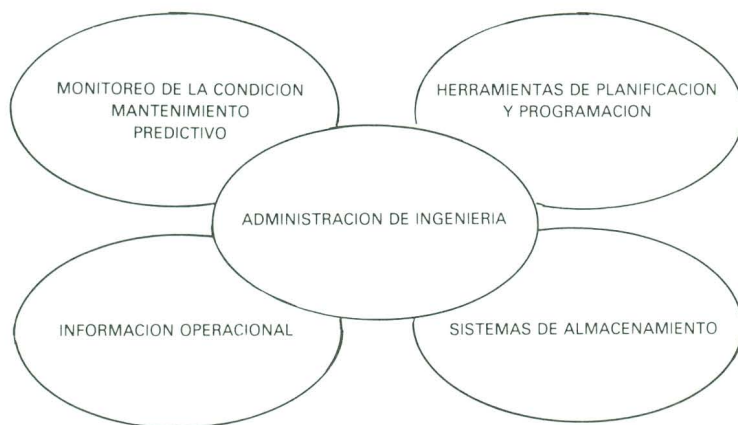


Figura 9

SISTEMAS DE ADMINISTRACION DE INGENIERIA BASADOS EN COMPUTACION

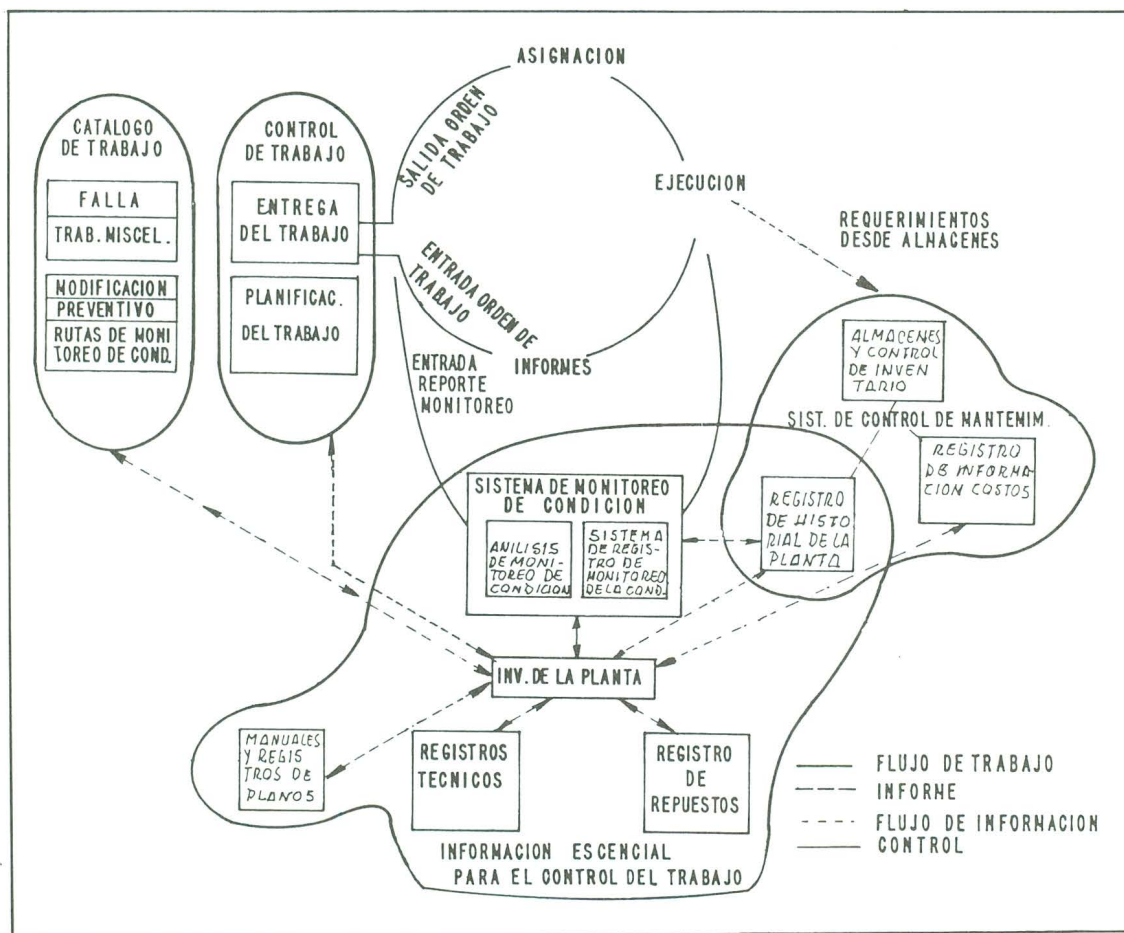


Figura 10

MODELO DE DOCUMENTACION DE MANTENIMIENTO QUE INCORPORA EL MANTENIMIENTO BASADO EN LA CONDICION

COSTO-EFECTIVIDAD

El tema de costo-efectividad del CBM en el computador y en el monitoreo de la condición es difícil de aplicar a una organización como la Real Armada. Todos "saben" que se ahorrará dinero y personal. Se han calculado ahorros de hasta un 80% en los costos de mantenimiento de algunas compañías. El análisis detallado revela que las compañías realmente no conocían sus costos de mantenimiento y, lo que es más probable, no tenían establecido un sistema de administración de mantenimiento antes de introducir el monitoreo de la condición.

Los ahorros debidos a dicho monitoreo en una industria de producción que antes tenía un claramente definido y controlado sistema de mantenimiento planificado se cree que son del orden del 7%. Esto comprende una combinación de ahorros en costos de mano de obra, repuestos y pérdida de producción, comparado con el costo de implementación del sistema, tanto en la provisión de "hardware" como de "software" y en la mano de obra para hacerlo funcionar (los costos de entrenamiento pueden ser altos en una organización sometida a frecuentes cambios de personal). En consecuencia, tendría sentido predecir que la Real Armada debiera esperar los mismos ahorros, pero el cálculo de estos no es una tarea fácil.

La mayor ganancia que debe esperarse con el CBM y el monitoreo de la condición es el aumento de disponibilidad. Esto se puede calcular fácilmente en términos de producción, no así para un buque de guerra.

La Real Armada ha estado aplicando un eficiente sistema de administración de mantenimiento durante muchos años, pero no puede cuantificar con exactitud los costos de mantenimiento anuales para un sistema o buque de guerra. El personal de mantenimiento empleado en la industria rara vez tiene alguna otra responsabilidad (en la Real Armada, el mantenedor opera, administra, combate incendios, entrena, etc.). La reducción de la carga de mantenimiento en una industria se relaciona directamente a una reducción de hombres, pero no es necesariamente el caso de la Real Armada. En consecuencia, los ahorros de mano de obra que se esperan en la Dirección General pueden no ser tales, sin que haya otros cambios en los procedimientos y actitudes del servicio.

¿Dónde estará entonces la ganancia del servicio? Tal como se estableció, la introducción de un mantenimiento basado en la condi-

ción y el monitoreo de la condición, con las herramientas apropiadas y una clara definición de requerimientos, responsabilidades y procedimientos, conducirá a un aumento de disponibilidad significativo. Habrá una reducción del tiempo de para planificado. La reducción en el mantenimiento basado en el tiempo reducirá el costo de los "refits", los cuales tenderán a ser predominantemente correctivos y de mejoramiento de la capacidad de la unidad. Puede haber una pequeña reducción en el complemento del buque, pero habrá un mayor ahorro de mano de obra en las Unidades de Mantenimiento de la Flota y en otros apoyos de tierra. Habrá reducciones en los costos de "overhaul" y quizás la eliminación de ciertas líneas de "overhaul" con más reducciones en los costos de apoyo. Esto ha sido demostrado usando cifras derivadas del uso de turbinas de gas, donde se puede ver que la detección de una falla incipiente lleva a la detención y la reparación antes que sea catastrófica, cuyos costos de reparación pueden ser tan pequeños que alcanzan un tercio de aquellos de un "overhaul" o reconstrucción. La prolongación de la vida entre "overhauls" ya ha producido ahorros significativos para Olympus y Tynes y producirán aún más.

La computarización del monitoreo de la condición y de los datos obtenidos de las guardias conducirán a adelantos mayores en el flujo de información ARM a las autoridades de control de operación y de diseño, permitiendo detectar las debilidades, establecer su corrección y evitar problemas similares en nuevos diseños.

CONCLUSION

Después de una partida lenta, el mantenimiento basado en la condición y el monitoreo de la condición están avanzando con rapidez dentro de la Real Armada. Todo indica que las diversas pruebas y la investigación que se está llevando a cabo conducirán a la introducción de un sistema de administración de mantenimiento apropiado para emplear el monitoreo de la condición, basado totalmente en la computación. Habrá ahorros en los costos de mantenimiento, que compensarán con creces el costo de introducción al sistema; los ahorros en mano de obra no serán tan grandes como se espera y serán principalmente de personal con base en tierra, tanto civiles como militares.

BIBLIOGRAFIA

- J.P.W. MIDDETON (Capitán de Fragata, RN): "Where exactly does it hurt, Mr. Feed Pump?", *Revista de Ingeniería Naval*, diciembre de 1977.
- D.J.G. ROGERS (Capitán de Corbeta, RN): "Condition monitoring - chronicle of development", *Diario de Ingeniería Naval*, junio de 1981.
- R.W. THORNE (Capitán de Fragata, RN): "Condition monitoring in the Royal Navy", *Trans IMarE (IM)*, Val. 99, Trabajo 4.
- SIMON P. JOHNSON: "Condition Based Maintenance - the way ahead", Comadem 1988.

