



PROBLEMÁTICA DE LAS DECISIONES EN MANTENIMIENTO

Concepto y tipos de mantenimiento



A tarea de «mantenimiento» fue durante mucho tiempo sinónimo de «reparación» y considerada como un mal necesario en la mayoría de las plantas industriales hasta hace pocos años. La maquinaria era diseñada para su utilización hasta el límite de duración y el mantenimiento se traducía en un trabajo de reparación o reemplazo de componentes de la máquina que, por haber presentado anomalía o destrucción, se consideraban defectuosos.

Con esta idea del mantenimiento comenzaron las plantas industriales del siglo XIX en el Reino Unido, aunque ya en el año 1895, T. W. Barber consideraba el mantenimiento tan importante en el proceso como la reparación, tratándolos como conceptos diferenciados y entendiendo que el mantenimiento era el cuidado y conocimiento profundo de la máquina. Por consiguiente, constituía éste el mejor camino para evitar averías, destrucción de máquinas o piezas, y pérdidas de tiempo.

La definición de mantenimiento hoy se expresaría entonces como «la función logística que comprende todas las acciones que han de ejercerse sobre el material, para conservarlo permanentemente en las mejores condiciones de eficacia y rendimiento», de forma que, dada la alta tecnología de las instalaciones de un buque actual, puede considerarse claramente el mantenimiento de éste como una ciencia propia de la Ingeniería.

A pesar de todos los progresos, el mantenimiento no es una ciencia exacta. Existen muchos argumentos que defienden la reparación por reemplazo, pero la decisión de cuándo debe hacerse esta operación va unida, inexorablemente, a los costes de las reparaciones y debe tenerse en cuenta que no sobrepasen los costes de un mantenimiento convencional, presentándose, en este sentido, la eterna disyuntiva de las políticas de mantenimiento: «¿Qué hacer, y cuándo?».

Atendiendo a las acciones a que se someta el material, el «Reglamento de Mantenimiento para la Fuerza Naval e Instalaciones de Apoyo», aprobado por O. M. delegada núm. 282/81, de 9 de septiembre, y modificado por O. M. delegada núm. 153/82, de 24 de mayo, del Estado Mayor de la Armada, a propuesta de la Jefatura del Apoyo Logístico, estableció los cinco siguientes tipos, que define específicamente:

1. Mantenimiento de comprobación.
2. Mantenimiento preventivo.
3. Mantenimiento correctivo.
4. Mantenimiento de rehabilitación.
5. Mantenimiento de modificación.

Dada la rapidez con que la tecnología progresa actualmente, aunque las modificaciones no puedan considerarse una acción de mantenimiento en sí, si tenemos en cuenta que la política de mantenimiento busca la conservación, eficacia y rendimiento, es imprescindible contar con introducir modificaciones a cualquier sistema a lo largo de su vida útil para conseguir estos fines, tan importantes en el caso de un buque de guerra.

Por otro lado, podría también subdividirse el mantenimiento preventivo en otros dos, de los que se derivarán acciones diferentes en cada caso:

2.1. *Mantenimiento preventivo programado.*—Consiste en la revisión total o parcial de equipos o instalaciones de forma periódica y programada en el tiempo, con objeto de restaurar sus características iniciales o de proyecto y de garantizar su fiabilidad durante un período determinado.

2.2. *Mantenimiento preventivo por condición.*—Comprende las acciones que se aplican como consecuencia de la observación e investigación del estado en que se encuentran determinados componentes de un sistema, que a su vez se puede subdividir en mantenimiento por condición actual y mantenimiento de condición por tendencia.

El orden establecido obedece, en cierta medida, al ordenamiento temporal del desarrollo tecnológico y la condición de eficacia de los sistemas en cualquier momento de la vida del buque. En este aspecto, es significativo que este reglamento se editara en uno de los momentos de mayor impulso de los arsenales, como fueron los años posteriores e inmediatos a la construcción de las fragatas de la clase *Baleares*. Sin embargo, la aplicación a este orden resulta con frecuencia inversa a las posibilidades económicas de los presupuestos, de modo que, cuando éstos se resienten, una de las primeras políticas afectadas es la de mantenimiento.

No solamente será importante no abandonar los avances realizados en las diferentes políticas de mantenimiento, sino que resulta ya imprescindible, a mi juicio, incorporar los nuevos criterios del denominado *mantenimiento predictivo*, que consistirán en estudiar los diferentes sistemas del buque, incluso durante su navegación o encendido en puerto, para que a través de los datos obtenidos se puedan predecir los posibles fallos, evitando así averías incidentales peligrosas para el buque, para las dotaciones, o para la eficacia de los diferentes sistemas.

El mantenimiento de predicción tiene como fin, por tanto, determinar además el tiempo en que se debe llevar a cabo la sustitución de un componente o la inmovilización de la máquina, a fin de desarrollar las tareas correspondientes de mantenimiento preventivo, rehabilitación o modificación, es decir, resuelve la eterna disyuntiva indicada del mantenimiento en la medida de su aplicación a cada uno de los sistemas e instalaciones del buque.

Políticas y eficacia del mantenimiento

Puede asumirse, como norma general, que la relación entre el desgaste del material (w) y el coste de mantenimiento (m) es el representado en el diagrama:

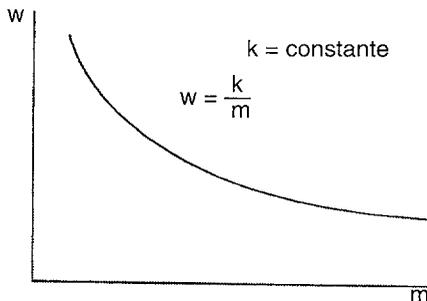


Figura 1-1.

Esto significa que el nivel de desgaste del material se reduce a medida que aumenta el gasto en mantenimiento, por lo que, en función de este concepto, podemos disponer tres criterios de decisión y acciones a tomar:

1) Lograr minimizar el gasto de mantenimiento, sin que el desgaste del material (w) exceda de un predeterminado nivel (w_1).

El mínimo nivel de gasto de mantenimiento a realizar será entonces el definido por (m_1), verificado por inspección y conocimiento de la maquinaria, situación que se refleja en el diagrama siguiente:

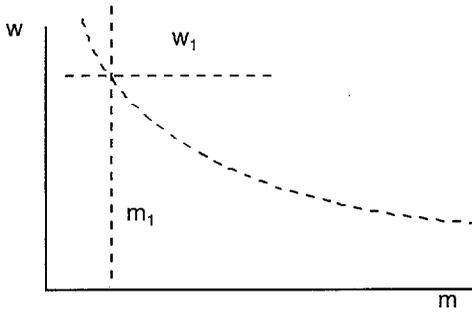


Figura 1-2.

2) Minimizar el coste total de mantenimiento y de desgaste del material, conjuntamente.

En este caso, el problema no puede resolverse fácilmente por inspección y conocimiento de la maquinaria, y tendríamos de un diagrama como el que se muestra en la figura 1-3, en donde:

m = coste del mantenimiento.

$C(w)$ = costes correspondientes a pérdida de material por desgaste.

$T = m + C(w)$ = coste total de mantenimiento y desgaste del material.

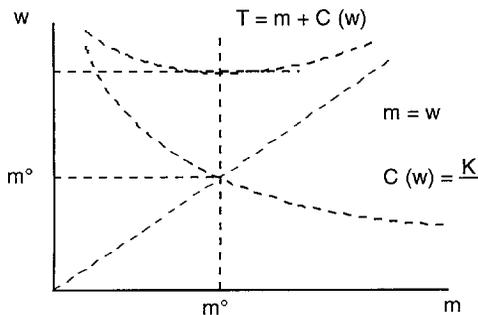


Figura 1-3.

La relación entre w y m se mostraba en la figura 1-1, en función de una constante, siendo $C(w) = K/m$, por lo que tendremos:

$$T = m + K/m$$

que se minimiza derivando T respecto a m , e igualando a cero:

$$dT/dm = 1 - K/m^2 = 0$$

obteniéndose:

$$\frac{K}{m^2} = 1, \text{ ó } m = \sqrt{K} = m^\circ$$

Este m° es el nivel óptimo de gasto de mantenimiento que corresponde con el mínimo de la curva de T en la figura 1-3, y el valor correspondiente de coste de mantenimiento por desgaste de material será entonces:

$$C(w^\circ) = \frac{K}{m^\circ} = \frac{K}{\sqrt{K}} = \sqrt{K} = m^\circ$$

es decir, el mismo valor m° que el coste de mantenimiento, lo que significa que conocida la relación entre w y m , sus niveles óptimos se obtienen en la intersección de la curva $C(w) = k/m$, y una recta trazada con un ángulo de 45° ($m = w$).

3) Minimizar el coste correspondiente al desgaste del material hasta un valor w_2 , con la condición que el coste de mantenimiento no exceda de un determinado valor prefijado m_2 :

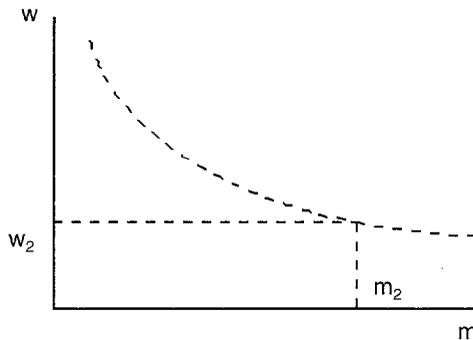


Figura 1-4.

Este nivel de gasto de mantenimiento m_2 se conocerá por inspección y conocimiento del proceso o maquinaria.

Por consiguiente, la decisión que haya de tomarse para solventar los problemas que se plantean implica:

- la identificación de los objetivos previstos;
- la identificación y análisis de las alternativas que se pueden elegir para alcanzar los objetivos marcados;
- la identificación de las variables conocidas, de forma que las diferentes alternativas de acción puedan ser evaluadas;
- la identificación de las variables incontroladas que puedan interferir en la solución adoptada, y
- definición de un criterio de decisión, entre las diferentes alternativas, que constituya la mejor dirección para el alcance de estos objetivos.

Aunque el esfuerzo inicial necesario para desarrollar las reglas de decisión puede ser complejo e importante, una vez desarrolladas estas reglas resultan, en general, muy interesantes los beneficios que se pueden obtener con un buen mantenimiento.

Un ejemplo de lo que sería una de estas reglas de decisión sería el siguiente:

Se parte de la base de estar, en principio, operando con una política de mantenimiento no preventivo, de forma que no se repara hasta que el sistema sufre avería de colapso o se produce su inoperatividad. Cada parada de este tipo supone un tiempo de inutilidad de una semana en el funcionamiento de ese sistema, y se pretende elegir el método óptimo de la política de mantenimiento para un período de «n» semanas, para lo que habrá que decidir entre las alternativas siguientes:

1. No hacer mantenimientos preventivos durante el período en estudio.
2. Hacer revisiones durante ese período (mantenimiento preventivo).
3. Reemplazo de componentes averiados cuando se produzca la inoperatividad del sistema.

En ese período de decisión, el número máximo de averías será «n» y la probabilidad de que el sistema quede paralizado por una avería dependerá del número promedio de averías en este tiempo analizado, y si ha existido revisión o no.

Por consiguiente, la probabilidad de que la avería de colapso se produzca en el próximo período de decisión, cuando se realizan mantenimientos preventivos, será:

$$p_1 = f_1(b)$$

siendo b = número promedio de averías en el período de estudio de «n» semanas.

Si el sistema, en cambio, ha sido revisado, será:

$$p_2 = f_2(b)$$

y cuando se elige la tercera opción de reemplazos, la probabilidad de avería será:

$$p_3 = p_3 \text{ (independiente de } b)$$

disponiendo, por tanto, de tres alternativas:

- 1) Sin mantenimiento preventivo $p_1 = f_1(b)$
- 2) Con mantenimiento preventivo $p_2 = f_2(b)$
- 3) Reemplazos $p_3 = p_3$ (independiente de b)

siendo: $p_1 > p_2 > p_3$

Continuando con el ejemplo de cálculo, se relacionan los tres casos de criterios a adoptar, teniendo en cuenta los costes de cada uno de ellos que suponemos obtenidos ya de la experiencia:

- Coste de una avería por colapso A
- Coste de una revisión B
- Coste de reemplazos por período de decisión C

siendo: $A > B$ y $B < C$

1) *Alternativa n° 1.*—No realizar mantenimientos preventivos. La expectativa de coste viene dada por la expresión:

$$\sum_{x=1}^{x=n} P(x) \cdot C(x)$$

cuyos términos indican:

- $P(x)$ = probabilidad de que ocurran «x» averías en un período de «n» semanas.
- $C(x)$ = coste de «x» averías = $x \cdot C(1)$, siendo $C(1)$ el coste de una avería.

asumiendo que $P(x)$ responde a una distribución binomial, según:

$$P(x) = C_x^n \cdot p^x \cdot q^{(n-x)}$$

en donde:

x = número de averías por período de decisión.

n = número de ocasiones que puede aparecer una avería que es equivalente al número de semanas del período de decisión, por ser equivalente cada parada a una semana de inactividad.

p = probabilidad de que ocurra una avería.

$q = (1 - p)$ probabilidad de que no ocurra la avería.

por lo que la expectativa de coste resulta:

$$\sum_{x=1}^n P(x) C(x) = C(1) \sum_{x=1}^n x P(x) = C(1) \left[\sum_{x=0}^n xP(x) - 0 P(0) \right] = C(1) \bar{x}$$

teniendo en cuenta que:

$$\bar{x} = \text{media aritmética de la distribución binomial} = n \cdot p$$

Por consiguiente, en el caso de que el sistema no haya sido revisado, el coste $C(1) = A$, $p_1 = f_1(b)$, y la expectativa de coste es:

$$A \cdot n \cdot p_1 = A \cdot n \cdot [f_1(b)]$$

de modo que en « n » semanas se reflejará la siguiente tabla en función del número promedio de averías « b » que pueden ocurrir en el período en estudio:

b	-----	<u>0</u>	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	.....	<u>n</u>
coste	-----	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	.....	A_n

2) *Alternativa n° 2.*—Revisar el sistema durante el período en estudio (mantenimiento preventivo).

$C(1)$ = coste de una avería por colapso, que continúa siendo A , mientras que la probabilidad de que esta avería por colapso se produzca en el próximo período de decisión sería:

$$p_2 = f(b)$$

$$\text{Expectativa de coste} = A \cdot n \cdot p_2 = A \cdot n \cdot [f_2(b)]$$

Se sumará, en este caso, el coste fijado (B) de una revisión de mantenimiento y, por tanto, se obtiene:

$$\text{Coste previsible} = B + A \cdot n \cdot p_2 = B + A \cdot n \cdot [f_2(b)]$$

y para el período de «n» semanas se obtendrá una tabla similar al caso anterior, con otros costes y dependiente igualmente de *b*:

b	-----	<u>0</u>	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	.....	<u>n</u>
coste previsible	--	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	.....	B _n

3) *Alternativa n.º 3.*—Política de reemplazos cuando se produce la avería.

$p = p_3$ (independiente de *b*)
 Expectativa de coste = $A \cdot p_3$

siendo *A* = coste de una avería por colapso.

Corresponde además considerar, en este tercer caso, el coste de reemplazos por período de decisión, que se ha fijado anteriormente en *C*, por lo que:

$$\text{Coste previsible mantenimiento} = C + A \cdot p_3 = D$$

en donde *D* es constante para cualquier valor de *b*.

Finalmente, con estos datos y las tres alternativas analizadas se puede elaborar la siguiente *matriz de decisión*, en la que *b* = promedio de averías de colapso por período de decisión.

Alternativas:

b	-----	<u>0</u>	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	.....	<u>n</u>
1) No revisar la máquina	--	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	.....	A _n
2) Revisar la máquina	---	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	.....	B _n
3) Reemplazar la máquina	-	D	D	D	D	D	D	.....	D

Las expectativas de coste serán:

$$A_1 < B_1 < D, \quad \text{para } b = 0$$

pero a medida que aumenta el valor de *b* (*A*₁ ... *A*_n) crecerá en mayor proporción que (*B*₁ ... *B*_n), manteniéndose *D* constante, y se podrá disponer de un diagrama como el de la figura 1-5, en el que se pueden diferenciar tres zonas: α , β y γ , cada una de ellas representando la alternativa más idónea para cada caso:

— Si *b* esta contenido en zona α , la solución más económica está en la alternativa número 1.

- Si b está contenida en zona β , la solución más económica está en la alternativa número 2.
- Si b está contenida en zona γ , la solución más económica está en la alternativa número 3.

En el caso de la aplicación de estos criterios a un buque, teniendo en cuenta las características tan específicas de la navegación con su entorno de aislamiento y dureza, la elaboración de la llamada *matriz de decisión* se complica, y los parámetros que hay que considerar aumentan, además de hacerse críticos cuando el buque está navegando, o cuando la máquina que resulta inoperativa puede acarrear, incluso, peligrosidad para la seguridad del buque y la dotación.

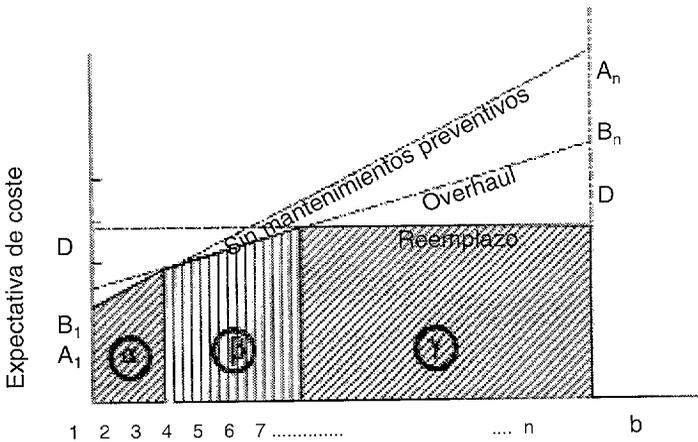


Figura 1-5.—Respuesta de la curva de mínimo coste.

Resulta evidente que, a medida que aumente la edad del buque, no haber practicado una política de mantenimientos preventivos encarecerá las acciones de reparación posteriores que se deriven de las averías incidentales, además de incrementarse la magnitud de cada una de ellas por sí mismas, por lo que siempre se podrá considerar rentable, a largo plazo, que los buques de la Armada se encuentren inmersos en una organización constante de mantenimientos preventivos, que no ha de abandonarse nunca, aun cuando los presupuestos sufran alteraciones a la baja.

Incluso sería muy interesante introducir ya el concepto de mantenimiento predictivo de los diferentes sistemas, mediante el análisis de variables de estado «críticas» relacionadas con máquinas o sistemas vitales del buque, para programar mantenimientos y prever futuras averías, resolviendo así la incertidumbre de cuál es la política de mantenimiento óptima en cada caso.

Los buques, por sus características especiales de aislamiento en la mar,

dureza del entorno, costes de inoperatividad, dotación restringida, complejidad de sus instalaciones y dificultades para encontrar asistencia técnica cualificada en cualquier puerto, constituyen *uno de los complejos físicos más necesitados de una programación de mantenimiento más rigurosa y exacta.*

Se trataría, entonces, de dotar a la programación del mantenimiento de un buque de un sistema de análisis basado en la medición continua de una serie de parámetros vitales, que guardan relación directa con el estado de vida de los componentes de la máquina con la que se relacionan, de forma que se pueda, en lo posible, predecir una avería o inoperatividad antes de que suceda, contribuyendo así a lograr una toma de decisiones lo más acertada posible.

Para ello se utilizaría una instalación de transductores en los puntos adecuados de cada sistema de estudio, que aportasen datos de mediciones de temperatura, presión, vibraciones, aceleraciones, desplazamientos, ruidos, tacómetros, termopares, posición, desgastes, tensiones e intensidades eléctricas, etc.

Los datos así obtenidos se procesarían y se someterían a un tratamiento informático que permitiera su presentación en la pantalla de un ordenador. El esquema de la configuración de un sistema de vigilancia de variables de estado obedecería, fundamentalmente, a la figura 1-6, en la que el corazón lo constituye la unidad de proceso de datos (CPU), que recibiría las señales procedentes de los sensores instalados en los diferentes sistemas del buque, así como su entorno, ya que éste actúa sobre los sistemas modificando condiciones que sobrepasen los límites normales.

La unidad CPU contendría los programas, incluyendo los modelos matemáticos y las instrucciones, con los que calculan los parámetros de servicio y los compara con los de referencia que *a priori* se habrían introducido en la memoria, para disponer de los desvíos que se produjeran a lo largo de un tiempo determinado.

El ordenador entregaría la información de salida, sobre indicadores digitales, impresoras o pantallas. Esta información la proporcionaría cada cierto tiempo programado, así como cada vez que lo demandase el utilizador o astillero. En resumen, destacaría la importancia de cada desvío calculado, evolución de los parámetros, su tendencia, e incluso recomendaciones al operador que servirían para una búsqueda constante de la eficacia y seguridad de los buques como objetivo fundamental.

Resumen

Se pretende hacer hincapié en la importancia que tiene una política de mantenimiento organizada y programada, de acuerdo con las diferentes clasificaciones de mantenimiento que se pueden realizar, presentando un estudio comparativo de costes y eficacia respecto a las decisiones más idóneas en cada uno de estos tipos de mantenimiento que se pueden elegir, añadiendo, por otro

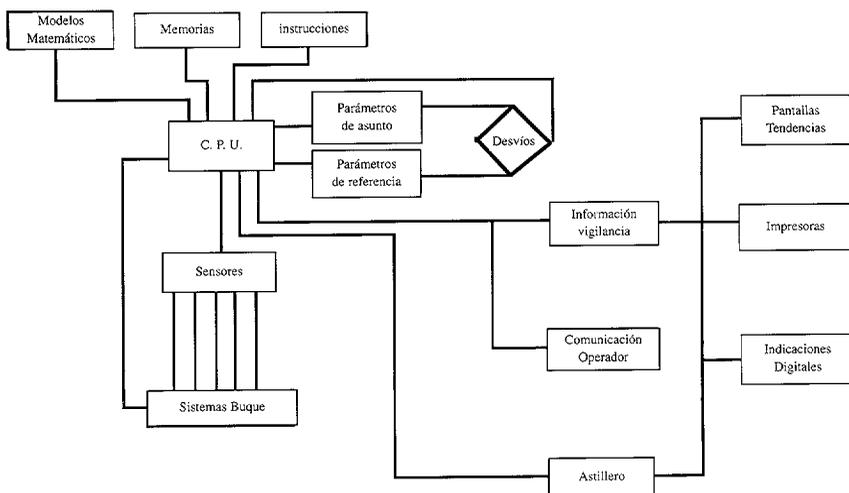


Figura 1-6.

lado, la necesidad de implantar los nuevos criterios de mantenimiento predictivo, con el fin de lograr una vida útil más larga para los buques de la Armada y una mayor eficacia de sus sistemas en cualquier momento.

Pedro FRAGA LÓPEZ



BIBLIOGRAFÍA

- ARMITAGE, W. y JARDINE A. K. S.: *Maintenance Performance. A decision Problem?* The International Journal of Production Research. Vol. 7, n.º 1, 1969.
- BLACKETT: *Studies of War, Oliver and Boyd*. 1962.
- COLLCUT, R. H.: *The First Twenty Years Operational Research*. The British Iron and Steel Research Association. London, 1965.
- Comdeslant Instruction 3.590.1 U. S. Navy-1951*. Instrucciones para el Mando de Destroctores del Atlántico.
- CHORRO ENCINA, R.: *Cátedra de Construcción Naval III*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales. Madrid. Enero 1980. Seminario de Terotecnología Naviera.
- ECHVERRÍA IZAGUIRRE, J.: Ingeniero Naval, director de Astilleros Españoles S. A. División Norte. Seminario: *Las reparaciones de buques*. Universidad de La Coruña, Escuela Politécnica Superior. Ferrol, abril 1994.
- Reglamento de Mantenimiento para la Fuerza Naval e Instalaciones de Apoyo*, aprobado por O. M. delegada núm. 282/81, de 9 de septiembre, y modificado por O. M. delegada núm. 153/82, de 24 de mayo, del Estado Mayor de la Armada.
- Robótica: Los sensores en las instalaciones automatizadas*. Revista de Automatización integrada. R. R n.º 52. Octubre 1990.