



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



PROCEDIMIENTOS
DE CONSTRUCCIÓN

**FIABILIDAD
Y MANTENIMIENTO
DE LA MAQUINARIA**

Julián Alcalá

Procedimientos de Construcción
FIABILIDAD Y MANTENIMIENTO DE LA MAQUINARIA

©2022 Julián Alcalá González (jualgon@upv.es)
Departamento de Ingeniería de la Construcción
y de Proyectos de Ingeniería Civil
Ref.: 0025-0004-PRC-0021-0012

Índice

1. Disponibilidad de las máquinas	3
1.1. Distribución del tiempo de una máquina	3
1.2. Disponibilidad matemática	4
1.3. Disponibilidad de máquinas trabajando en grupo	5
2. Fiabilidad de las máquinas	7
2.1. Modelo exponencial de la fiabilidad	9
2.2. Ensayos de fiabilidad	11
3. Mantenimiento de los equipos	11
3.1. Escalón de mantenimiento	12
3.2. Políticas de mantenimiento	12
4. Reparaciones	13
A. Ejercicios resueltos	14
B. Bibliografía	23

(Página intencionadamente dejada en blanco)

1. Disponibilidad de las máquinas

1.1. Distribución del tiempo de una máquina

El número total de horas en las que una máquina está en una obra se puede dividir entre el tiempo que ocurre en el calendario laboral, y el que ocurre fuera del calendario laboral: noches, fines de semana o festivos. Evidentemente, en el calendario no laboral la máquina estará parada, aunque puede ocurrir que en algunas obras haya máquinas trabajando de forma constante. Por ejemplo, las tuneladoras (Figura 1) suelen trabajar por turnos y funcionan 24/7, con paradas por festivos muy esporádicas. Estos calendarios se establecen en cada obra en función de los ritmos particulares que se necesite llevar, o de los plazos a cumplir.



Figura 1: Tuneladora Alberes (Fuente: Red Eléctrica de España)

En el tiempo que discurre dentro del calendario laboral (ver figura 2) habrá momentos en los que la máquina esté parada por inclemencias meteorológicas (heladas, lluvias intensas, etc.) huelgas o catástrofes. En una obra en la costa que tenga una duración importante es muy difícil que no hayan días de temporal en los que no se pueda trabajar. Estos períodos provocan paradas en las máquinas que no se pueden controlar.

A partir de aquí, se denomina *tiempo laborable aprovechable* H_l al tiempo (normalmente medido en horas) en el que la máquina está en condiciones de trabajar. Este es el tiempo en el que no hay impedimentos externos y la máquina puede hacer su trabajo.

Este tiempo se puede dividir a su vez entre el que discurre estando la máquina a disposición de la obra (H_d), y el que no lo está debido a operaciones de mantenimiento (H_m) o por reparación de averías (H_a). El mantenimiento puede estar programado en función de un número un determinado número de horas de funcionamiento, o de un número de kilómetros recorridos, o no estarlo, pero en cualquier caso la decisión de llevarla a cabo la tienen los gestores de la máquina. Las averías sin embargo son por causas sobrevenidas que no se pueden controlar. Lo que si se sabe es que a mayor tiempo dedicado al mantenimiento, menos fallos y averías sufren las máquinas.

Incluso cuando la máquina está a disposición de la obra habrán momentos en los que estará realmente siendo utilizada (H_u), y momentos en los que no trabajará debido a la planificación y organización de los tajos (H_p). Es responsabilidad de los técnicos de la obra programar las actividades y los tajos para que la maquinaria esté el menor tiempo posible parada. En condiciones ideales H_p es nula, pero es difícil conseguir en las obras una coordinación perfecta, sobre todo cuando las máquinas trabajan en equipos unas con otras. Por ejemplo, si una pala esta cargando a un grupo camiones

que transportan la carga a un vertedero, o bien los camiones deben esperar su turno para ser cargados, o bien la pala debe esperar a que los camiones regresen del viaje hasta el vertedero. Finalmente, incluso cuando la máquina está trabajando también puede dividirse el tiempo entre el que dedica a hacer un trabajo productivo (H_t), y el que dedica a hacer un trabajo no productivo (H_c), por ejemplo, cuando se desplaza de un lugar a otro dentro de la obra.

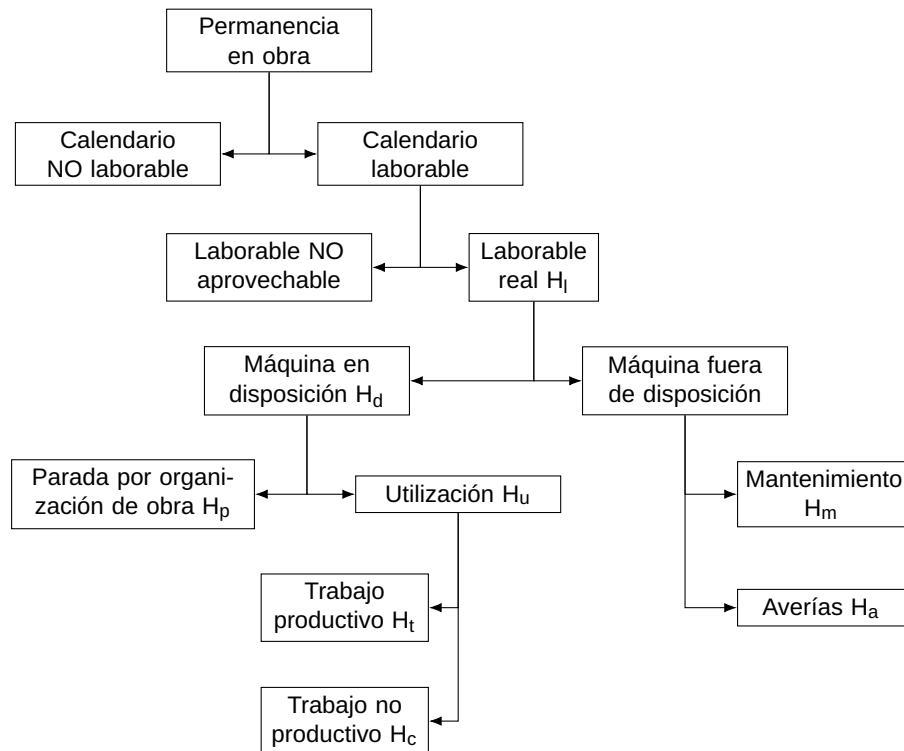


Figura 2: Distribución del uso del tiempo de una máquina en obra.

1.2. Disponibilidad matemática

La disponibilidad se define como la proporción del tiempo que la máquina estará a disposición, respecto al tiempo total laborable en la obra. De acuerdo con las definiciones del apartado anterior, se define el factor de disponibilidad como el cociente entre el número de horas de máquina en disposición H_d y el número de horas del calendario laborable real H_l :

$$F_d = \frac{H_d}{H_l} = \frac{H_d}{H_d + H_m + H_a} \quad (1)$$

Este factor representa la proporción del tiempo en el que la máquina NO permanece parada por causas derivadas de las operaciones de mantenimiento o averías. Es el tiempo en que podemos usarla, pero eso no significa que la vayamos a usar, porque podemos tener la máquina parada por problemas en la organización de la obra.

Como las averías se producen solamente cuando la máquina está trabajando, para medir la disponibilidad imputable a la propia máquina se usa a veces la disponibilidad intrínseca como:

$$d = \frac{H_u}{H_l} = \frac{H_u}{H_u + H_m + H_a} \quad (2)$$

Este factor depende solamente de la robustez y eficacia de la máquina para hacer el trabajo sin sufrir averías. Un factor de disponibilidad intrínseca bajo significa que la máquina está siendo mal utilizada, que no es apta para ese trabajo o que está llegando al fin de su vida útil.

Si las paradas por avería y mantenimiento se minimizan, la disponibilidad de la máquina aumenta, lo cual siempre es deseable. Las averías se producen de forma aleatoria y no controlada, más allá de los límites de uso convencional, y llevando a cabo un correcto mantenimiento. Pero las operaciones de mantenimiento se pueden programar para llevarlas a cabo fuera del horario laboral (de noche o en fin de semana). Ello elimina el término H_m de la ecuación 1 y aumenta la disponibilidad de la máquina. En ese caso, la disponibilidad intrínseca se puede obtener a partir del cociente:

$$d = \frac{TMEF}{TMEF + TMDR} \quad (3)$$

siendo TMEF el *Tiempo Medio entre Fallos*, y TMDR el *Tiempo Medio de Reparación*. Estos conceptos se verán más adelante con más detalle.

1.3. Disponibilidad de máquinas trabajando en grupo

Cuando las máquinas trabajan en equipo, es decir, cuando el trabajo de una máquina afecta al de otra, es evidente que una parada por avería en la primera repercute en la segunda, que se queda parada.

Es fácil encontrar ejemplos de esto:

- Pala que carga camiones para llevar el material al vertedero (figura 3a).
- Bomba en el hormigonado de un muro (figura 3b).
- Extendedora de aglomerado en una pavimentación (figura 3c).

En los casos anteriores, si la pala, la bomba de hormigón o la extendedora sufren una avería, los camiones que trabajan con ellas se quedan parados también. Por ello, cuando hay máquinas que trabajan acopladas, en las que unas alimentan a otras, hay que identificar las que son principales, y las que son secundarias. En las primeras una avería afecta a otras máquinas, mientras que en las segundas la avería afecta solo a la máquina que se detiene.

Cuando las máquinas trabajan en grupo interesa conocer el factor de disponibilidad del grupo, que se obtiene a partir de la disponibilidad de cada máquina del modo siguiente:

Máquinas trabajando en serie La disponibilidad del grupo es el producto de las disponibilidades de cada máquina. Si hay n máquinas trabajando en cadena, y cada una tiene una disponibilidad d_i , la disponibilidad del grupo es:

$$d_{gr} = \prod_{i=1}^n d_i \quad (4)$$

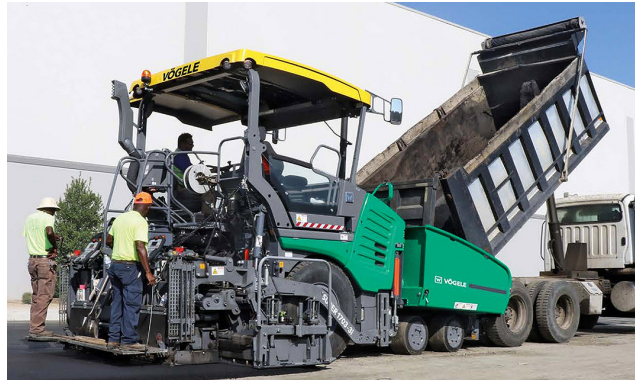
Como la disponibilidad es un número menor que la unidad, en una cadena de máquinas se tiene siempre una disponibilidad menor que la de las máquinas por separado. La única forma de no reducir disponibilidad en este caso es disponer de acopios intermedios que garanticen que mientras se



(a) Pala cargadora (Agg-net).



(b) Bomba de hormigón (Villabomb).



(c) Extendedora (Equipment Journal).

Figura 3: Ejemplo de máquinas trabajando acopladas.

repara una máquina hay acopio suficiente para que las que le siguen puedan trabajar. En ese caso la disponibilidad del grupo es la menor de las disponibilidades de las máquinas individuales.

$$d_{gr} = \min(d_i) \quad (5)$$

Máquinas trabajando en paralelo La disponibilidad de un grupo de máquinas que trabajan en paralelo puede entenderse como la probabilidad de que todas ellas sufran una parada. Procediendo al revés, puede entenderse que la disponibilidad d es la probabilidad de que en un momento cualquiera la máquina está funcionando.

Si hay n máquinas todas con la misma disponibilidad d , la probabilidad de que en un instante dado haya x máquinas funcionando viene dada por la distribución binomial:

$$P(x) = \binom{n}{x} d^x (1-d)^{n-x} = \frac{n!}{x!(n-x)!} d^x (1-d)^{n-x} \quad (6)$$

La probabilidad de que todas estén paradas la da la expresión anterior cuando x es cero:

$$P(0) = (1-d)^n \quad (7)$$

y la disponibilidad del equipo será lo contrario de lo anterior, es decir, que al menos una máquina esté en marcha:

$$d_{gr} = 1 - (1-d)^n \quad (8)$$

Máquinas trabajando en paralelo acopladas en serie con otro grupo de máquinas trabajando en paralelo A partir de los apartados anteriores, el caso de n máquinas de disponibilidad d_p trabajando en paralelo, que alimentan indistintamente a m máquinas de disponibilidad d_s que también trabajan en paralelo será:

$$d_{gr} = 1 - (1 - d_p)^n \quad (9)$$

para las máquinas primarias,

$$d_{gr} = 1 - (1 - d_s)^m \quad (10)$$

para las secundarias, y

$$d_{gr} = [1 - (1 - d_p)^n] \times [1 - (1 - d_s)^m] \quad (11)$$

para el conjunto.

Por ejemplo: supongamos que tres excavadora con un factor de disponibilidad de $d_{exc} = 0.87$ están cargando un grupo de cinco camiones dúmper que tienen cada uno una disponibilidad de $d_{dum} = 0.91$. La disponibilidad del grupo será de:

$$d_{gr} = [1 - (1 - 0.87)^3] \times [1 - (1 - 0.91)^5] = 0.998 \quad (12)$$

La disponibilidad es mucho mayor que la de las máquinas por separado. Esto es lógico porque para que este tajo se detenga tendrían que detenerse las tres excavadoras simultáneamente, o los cinco camiones simultáneamente, y es poco probable que ocurra ninguna de las dos cosas. Obviamente si una pala o un camión se avería la producción se resentirá, pero el tajo seguirá abierto.

Esa es la razón por la que en ocasiones se recurre a poner equipos en paralelo, cuando una parada en la actividad resulte especialmente grave. Un ejemplo de ello es el vertido de hormigón en piezas importantes, en las que un corte en el proceso de vertido del hormigón puede ser fatal para la resistencia de la pieza. Normalmente se duplican las máquinas principales para reducir el riesgo de parada, que en este caso son la bomba de hormigón y la planta que lo fabrica. Tal vez la segunda planta de hormigón ni siquiera se ponga en marcha, pero se queda en reserva y preparada para ponerse en funcionamiento si la primera planta fallase.

2. Fiabilidad de las máquinas

A pesar de que las máquinas se fabrican para trabajar en condiciones duras, hay numerosas causas por las que a veces sufren fallos. No hay ninguna máquina que no tenga fallos alguna vez. Las causas son innumerables, desde errores humanos del maquinista hasta defectos en la fabricación, usos indebidos, o simplemente desgastes por el paso del tiempo.

A efectos prácticos estos fallos se clasifican por sus consecuencias:

- Avería: Causa el cese de una función.
- Fallo de deterioro: Afecta a la calidad o causa deterioro funcional. Es decir, el equipo sigue funcionando pero creando defectos o baja productividad.

Se define la fiabilidad como la probabilidad de que una unidad funcione satisfactoriamente en un intervalo de tiempo determinado (siempre que dicho dispositivo se emplee en condiciones establecidas).

Es decir, la fiabilidad es un concepto estadístico, y como tal, puede ser tratado como una variable estadística que tendrá una determinada función de probabilidad. Y asociado a ese concepto estadístico existe el denominado Tiempo Medio Entre Fallos (*TMEF*), que se define como la relación del número de horas trabajadas en un intervalo de tiempo y el número de averías sufridas en ese mismo período. A la inversa de este valor se le denomina tasa de fallos ($\lambda = 1/TMEF$).

Aunque similares, los conceptos de disponibilidad y de fiabilidad no son lo mismo, porque en el primero cuenta sobre todo el tiempo destinado a reparaciones, y en el segundo cuenta el número de reparaciones. Por poner un ejemplo, una máquina que se avería una vez al mes, pero que se puede reparar en una noche, tendrá una disponibilidad alta, pero una fiabilidad baja frente a una máquina que se avería una vez al año pero necesita dos semanas para ser reparada.

Además, en el concepto de fiabilidad no interviene de forma explícita el mantenimiento, aunque depende de él porque a mayor mantenimiento menor número de averías.

La fiabilidad no es constante en el tiempo. Si se representa en un gráfico la tasa de fallos en función del tiempo se vería una curva como la de la figura 4. Es la típica curva «en bañera», que significa que a edades tempranas la máquina suele sufrir muchas averías (fallos infantiles) achacables a:

- Errores de diseño
- Errores de fabricación
- Errores de utilización
- Otras causas identificables

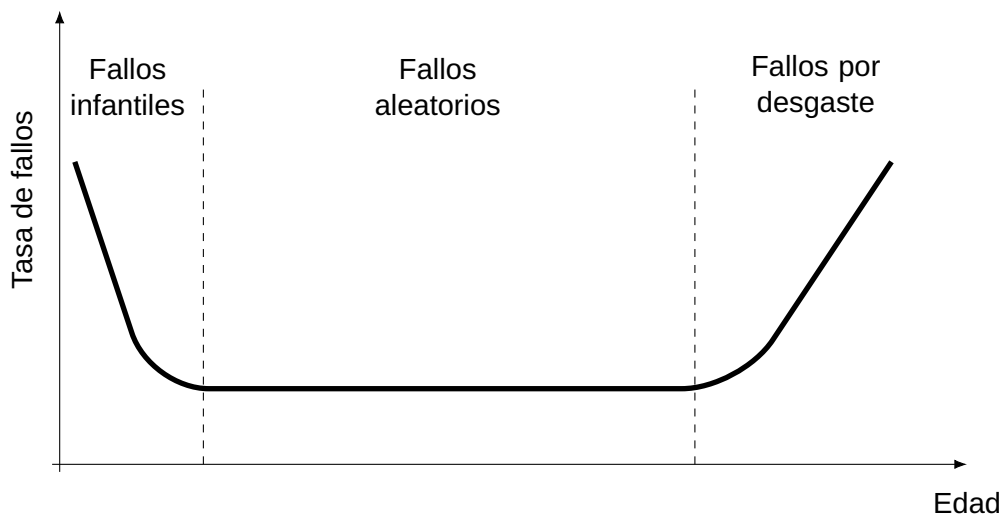


Figura 4: Evolución de la tasa de fallos con la edad de las máquinas.

Una vez están esos fallos corregidos, durante la vida útil de la máquina se producen fallos de forma aleatoria. Ahora pueden ser por razones como:

- Fallos accidentales
- Percances de uso
- Mal mantenimiento
- Limitaciones de diseño

A partir de una edad determinada que se alcanza antes o después según el ritmo de uso de la máquina o del mantenimiento que se haya aplicado aparecen los fallos de desgaste, que cada vez son más frecuentes, y suponen un incremento de la tasa de fallos. Este incremento anuncia el final de la vida útil de la máquina salvo que se lleven a cabo mejoras. Se producen, además de los anteriores, otros achacables a la vejez, y al deterioro asociado a esa vejez.

2.1. Modelo exponencial de la fiabilidad

Si la fiabilidad se define como una probabilidad, la forma de expresarla matemáticamente será mediante alguna función de probabilidad. La función más empleada es la normal, pero en el caso de la fiabilidad de las máquinas se suelen usar la exponencial o la de Weibull.

La función exponencial de probabilidad aplicada a la fiabilidad tendrá esta forma:

$$P(t) = e^{-\frac{t}{\theta}} = e^{-t\lambda} \quad (13)$$

La forma que toma esta función es la que se representa en la figura 5, con un rápido descenso al principio, pero que se estabiliza a medida que aumenta el período t .

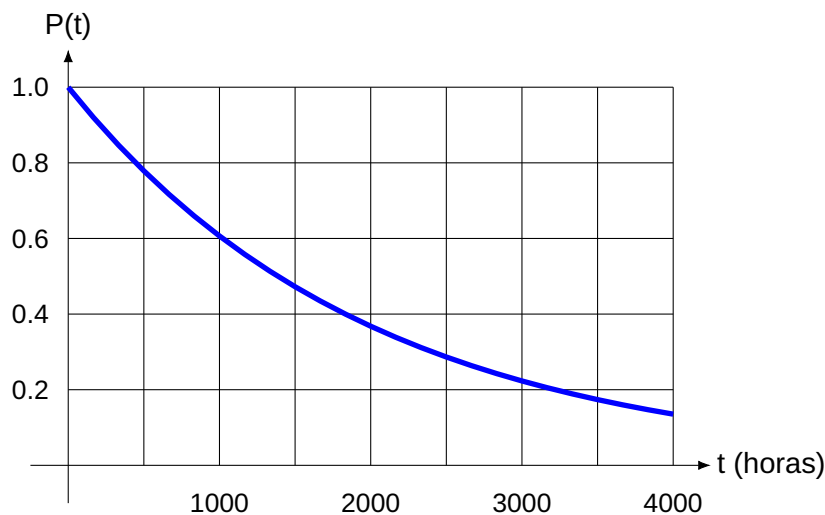


Figura 5: Función de fiabilidad de una máquina con $\theta = 2000$ h según una distribución exponencial.

En la expresión anterior se está suponiendo que el factor de disponibilidad es constante, lo cual, como se vio anteriormente, solo es cierto cuando la máquina está en la fase de fallos aleatorios. Si la tasa no es constante la función a emplear sería la de Weibull:

$$P(t) = e^{-(t/\theta)^\beta} = e^{-t\lambda^\beta} \quad (14)$$

En esa ecuación, si β vale la unidad la función es la exponencial, si β es menor que la unidad la tasa de fallos es creciente, y si β es mayor que la unidad la tasa de fallos es decreciente (figura 6).

La probabilidad de que una máquina se averíe en un tiempo t vendrá dada por la opuesta de la fiabilidad:

$$R(t) = 1 - P(t) \quad (15)$$

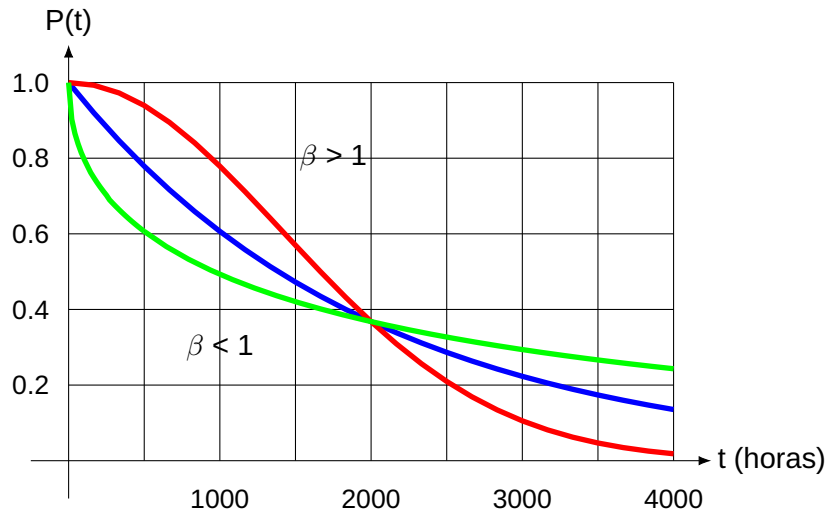


Figura 6: Función de fiabilidad de una máquina con $\theta=2000$ h según una distribución de Weibull.

Máquinas trabajando en serie Cuando las máquinas trabajan en cadena, el fallo de una de ellas detiene el trabajo de todas. Así la probabilidad de que en un tiempo t la cadena no se pare será el resultado de multiplicar las probabilidades individuales de no fallar en ese tiempo t , es decir, la fiabilidad del conjunto es el producto de las fiabilidades individuales.

$$R(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (16)$$

La probabilidad de fallo de la cadena, por tanto, se obtendrá del modo que sigue:

$$P(t) = 1 - R(t) = 1 - \prod_{i=1}^n R_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P_i(t)] \quad (17)$$

Si las probabilidades de fallo son pequeñas se puede simplificar esa ecuación:

$$P(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P_i(t)] \approx 1 - \left[1 - \sum_{i=1}^n P_i(t) \right] = \sum_{i=1}^n P_i(t) \quad (18)$$

Máquinas trabajando en paralelo Cuando las máquinas trabajan en paralelo el fallo se producirá cuando todas fallen simultáneamente. La probabilidad de que todas fallen en un período de tiempo se obtiene como el producto de las probabilidades de fallo individuales:

$$P(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t) \quad (19)$$

La fiabilidad por tanto será:

$$R(t) = 1 - P(t) = 1 - \prod_{i=1}^n P_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - R_i(t)] \quad (20)$$

2.2. Ensayos de fiabilidad

Independientemente del modelo matemático que se utilice para estimar la fiabilidad hay que conocer la tasa de fallos de los equipos de forma individual. Para conocer esta tasa se controla el número de averías (n) y el número de horas trabajadas (T). Si ambos datos se conocen el tiempo medio entre fallos será:

$$\bar{\theta} = \frac{T}{n} \quad (21)$$

Si no se lleva control sobre estos datos hay que hacer ensayos, que pueden ser:

- Ensayos censurados. El ensayo se lleva a cabo hasta que se alcanza un número predeterminado de fallos (r). En ese caso, la duración esperada del ensayo viene dado por:

- Si NO se reemplazan los equipos tras su fallo:

$$E(t) = \theta \sum_{i=1}^r \frac{1}{n-r+i} \quad (22)$$

- Si SI se reemplazan los equipos tras su fallo:

$$E(t) = \frac{r \cdot \theta}{n} \quad (23)$$

- Ensayos truncados. El ensayo se lleva a cabo durante un plazo determinado previamente. En ese caso, el número de fallos estimado es:

- Si NO se reemplazan los equipos tras su fallo:

$$E(r) = \left(1 - e^{-T/\theta}\right) n \quad (24)$$

- Si SI se reemplazan los equipos tras su fallo:

$$E(r) = \frac{n \cdot T}{\theta} \quad (25)$$

3. Mantenimiento de los equipos

Se define como mantenimiento: *Actividades encaminadas a disponer de una máquina para su funcionamiento al mínimo costo, en condiciones óptimas de operatividad y seguridad.*

Efectivamente, el uso de las máquinas, aunque sea el uso normal para el que la máquina ha sido diseñada, unido al propio paso del tiempo produce una paulatina reducción de prestaciones de la máquina. Este proceso terminará dando un fallo de funcionamiento, bien por avería, bien por falta de calidad o productividad. El mantenimiento pretende compensar esta reducción de prestaciones, pero tiene un coste, tanto porque la máquina para y deja de funcionar, como porque el mantenimiento supone un consumo de piezas y horas de trabajo. Este coste se compensa si ese mantenimiento reduce el riesgo de paradas por averías (aumentará su disponibilidad), y si evita pérdida de calidad o productividad de la máquina.

3.1. Escalón de mantenimiento

En los parques de maquinaria se emplea el término «escalón de mantenimiento» para referirse al estado en que la máquina está en relación con las operaciones de mantenimiento, en qué consisten y quién las lleva a cabo. Aunque no hay un criterio universalmente admitido al respecto, se pueden definir del modo que sigue:

- Primer escalón: la máquina está en obra y trabajando. Las operaciones de mantenimiento en este escalón son el pequeño entretenimiento diario, semanal o quincenal de revisión de niveles, limpieza y repostaje de la máquina, presión y estado de neumáticos, comprobación de ajustes, detección de pérdidas de lubricante, etc. Corre a cargo del propio maquinista, y es responsabilidad del Jefe de Obra.

Por ejemplo, el conductor de un dumper revisa el nivel de aceite del motor antes de empezar la jornada de trabajo, y si hace falta, rellena la cantidad que se haya perdido.

- Segundo escalón: es mensual, trimestral o semestral. Aunque se hace en la obra, lo llevan a cabo mecánicos. Las operaciones de mantenimiento en este escalón son la sustitución de lubricantes y su análisis, manguitos, limpieza o cambio de filtros, control de vibraciones, ajustes ligeros, localización de averías, etc. Es responsabilidad del Jefe de Maquinaria de la empresa.

Por ejemplo, en el segundo escalón se cambia el aceite lubricante del motor de un dumper.

- Tercer escalón: suele hacerse a demanda cuando es necesario. Se hace en talleres, a veces del propio fabricante. Las operaciones de mantenimiento en este escalón son la sustitución de partes completas de la máquina, desmontaje del motor, verificaciones y análisis más profundos, etc. Es responsabilidad del Jefe de Maquinaria de la empresa. Por ejemplo, se cambia el motor de arranque de un dumper que estaba fallando.

En algunos parques de maquinaria existe incluso un cuarto escalón, en el que la máquina está siendo reparada de una avería grave. Por ejemplo, se cambia la caja entera de un dumper después de un accidente con una gran roca.

3.2. Políticas de mantenimiento

La forma en que se lleva a cabo el mantenimiento es una decisión del gestor de la máquina, y puede ir desde un mantenimiento programado y planificado hasta la corrección por avería. Dependiendo del valor de la máquina, del tipo de trabajo que realiza y del riesgo de avería que se pueda asumir, el mantenimiento es más o menos intenso. De un modo general puede hablarse de tres casos:

Corrección por avería. Consiste en dejar los equipos en servicio hasta que se produzca el fallo, y en ese momento, reparar la avería. El único mantenimiento es el correspondiente al primer escalón. Es el que se lleva a cabo en pequeñas empresas que no tienen recursos para hacer mantenimiento de otro tipo, y que deben recurrir a empresas terceras para hacer las reparaciones.

Aunque aparentemente hay una economía al no tener que invertir en el mantenimiento, a medio y largo plazo es más costoso, y solo está justificado en algún caso con muchas máquinas iguales y capacidad holgada. En todo caso, si la máquina es principal en un equipo, el problema económico se agrava por dejar fuera de producción a otras máquinas.

Mantenimiento rutinario. Consiste en seguir unas instrucciones generales para el entretenimiento de los equipos. Se hace con cierta regularidad, pero no se sigue una planificación precisa (al terminar la obra, aprovechando unos días de parada, cuando se detecta alguna anomalía, etc.).

La decisión de actuar se basa en el buen sentido y experiencia del responsable de mantenimiento. Incluyen engrases, pruebas, inspecciones y reglajes periódicos. Es un sistema simple y de bajo coste que evita muchas averías. Es el que más se emplea.

Mantenimiento preventivo planificado. Se siguen ciclos de revisiones y sustituciones de piezas antes de su fallo, independientemente de su estado, en función de instrucciones dadas por el fabricante o en función del régimen de trabajo o del emplazamiento de la obra. El control de las operaciones de mantenimiento es tan exhaustivo que se permite el registro de averías, frecuencias, piezas dañadas, etc. Ello proporciona el conocimiento de la esperanza de vida de los elementos en funcionamiento, lo que permite mejorar la programación del mantenimiento.

Se utiliza el denominado «método de la pieza crítica», que consiste en que el elemento que presenta menor esperanza de vida establece la cadencia temporal de la sustitución del resto de piezas. Aprovechando una parada para sustituir una pieza se reemplazan las que no podrán aguantar hasta la siguiente parada.

4. Reparaciones

Las reparaciones corrigen los fallos que se producen por avería, o por pérdida de prestaciones de la máquina. Se llevan a cabo en los escalones segundo, tercero o cuarto, según su importancia. Los talleres de los parques de maquinaria tienen que disponer de un stock de las piezas que van a ser necesarias para las reparaciones más habituales. Para poder estimar la previsión de repuestos que van a ser necesarios se debe conocer la tasa de fallos, y a partir de ahí, se utiliza una distribución de Poisson (probabilidad de que ocurran r fallos en un tiempo t , si la tasa de fallos es λ):

$$Pr(t) = \frac{e^{-\lambda t} (\lambda t)^r}{r!} \quad (26)$$

El número de recambios necesarios para cubrir las averías en un período t con una probabilidad P vendrá dado por la suma:

$$P(r, t) = \sum_{i=1}^r \frac{e^{-\lambda t} (\lambda t)^i}{i!} \quad (27)$$

porque el número de averías puede ser r , o menor.

A. Ejercicios resueltos

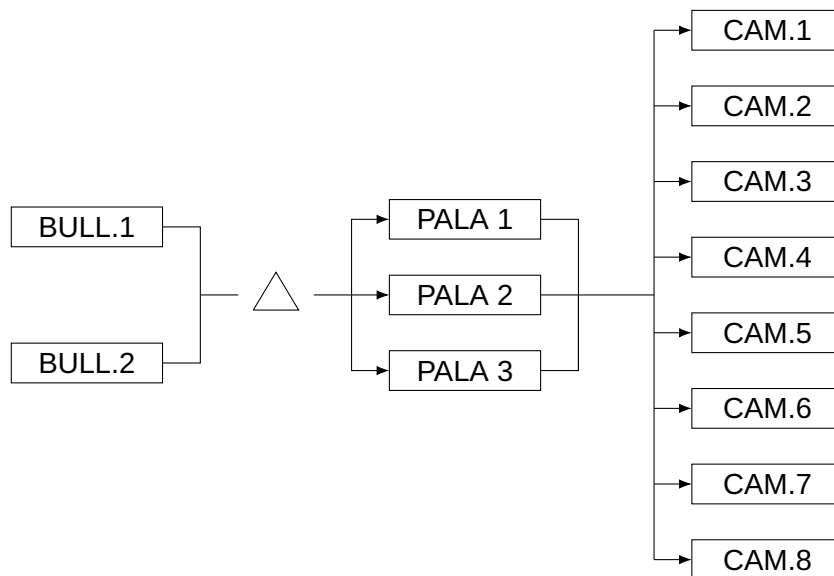
EJERCICIO 1

Enunciado En un tajo de movimiento de tierras, se encuentran trabajando dos bulldozers que van excavando un frente de cantera y amontonando el material en un acopio lo suficientemente grande para no entorpecer el trabajo de tres cargadoras. Las cargadoras cargan el material del acopio sobre un equipo de 8 camiones, que de forma indistinta acuden a cualquiera de ellas. Suponiendo los factores de disponibilidad que se adjuntan en la tabla, calcular el factor de disponibilidad de todo el equipo formado por las 12 máquinas.

Máquina	Disponibilidad
Bulldozer	0.90
Cargadora	0.85
Camión	0.82



Solución Si se representa esquemáticamente el equipo de trabajo, se tendría lo siguiente:



El acopio intermedio entre los bulldozers y las palas hace que la disponibilidad del conjunto sea la mínima entre los primeros y el resto (ver ec. 5).

La disponibilidad de los dos bulldozers se puede obtener como máquinas en paralelo:

$$d_{eq,bull} = 1 - (1 - 0.90)^2 = 0.9900$$

La del resto se debe obtener como el producto de la del grupo de palas por la del grupo de camiones, porque ambos grupos trabajan en cadena. La del grupo de palas es a su vez la de máquinas en paralelo:

$$d_{eq,pa} = 1 - (1 - 0.85)^3 = 0.9966$$

y la de los camiones:

$$d_{eq,ca} = 1 - (1 - 0.82)^8 \approx 1.0000$$

Con ello, la de la cadena palas y camiones es:

$$d_{eq,pa+ca} = 0.9966 \cdot 1.0000 = 0.9966$$

Por tanto, la disponibilidad del conjunto es de $d_{eq} = 0.99$, que es la de los bulldozers, por ser menor que la del grupo del resto de máquinas.

La disponibilidad del conjunto si no hubiese ese acopio sería:

$$d_{eq} = d_{bull} \cdot d_{pa} \cdot d_{ca} = 0.99$$

es decir, se tendría el mismo resultado, luego el acopio no está proporcionando ninguna ventaja desde el punto de vista de la disponibilidad.

EJERCICIO 2

Enunciado El tiempo medio entre fallos de un dúmper extraviario es de 5.000 horas, y en una obra se emplean 6 de ellos. Estimar el tiempo en el cual aparecerán 3 fallos en los siguientes casos:

- No se sustituye el dumper que se avería.
- Se sustituye de inmediato el dumper averiado.

También en ambos casos estimar cuántos fallos se esperarían tras 4.500 horas de funcionamiento.



Solución En este problema se tiene un caso equiparable a un ensayo de fiabilidad censurado. Es decir, se esperan tres fallos en un equipo de seis máquinas, de las que conocemos la tasa de fallos.

En el primer caso en el que no se sustituyen los dúmperes averiados se aplicaría la ecuación 22, con $\theta = 5000$ (tiempo medio entre fallos), $n=6$ (número de unidades) y $r=3$ (número de fallos):

$$E(t) = 5000 \left[\frac{1}{6-3+1} + \frac{1}{6-3+2} + \frac{1}{6-3+3} \right]$$

Del mismo modo, cuando se sustituyen los dúmperes averiados se aplicaría la ecuación 23:

$$E(t) = \frac{3 \cdot 5000}{6} = 2500 \text{ horas}$$

Como se puede ver, si se reemplazan los equipos averiados se alcanza la tercera a vería antes, lo cual es lógico, pues al mantener el número de dúmperes en seis es más probable que hayan averías que si el número de dúmperes se va reduciendo. Dicho de otro modo, en el segundo caso hay más máquinas que pueden averiarse que en el primero.

En la segunda parte del ejercicio se procede igual, pero ahora se tiene el tiempo $t=4500$ horas, y hay que averiguar el número de averías r . En el primer caso, en el que no se sustituyen los dúmperes averiados se aplicaría la ecuación 2.2:

$$E(r) = \left[1 - e^{-4500/5000} \right] 6 = 3.6$$

Y cuando se sustituyen los dúmperes averiados se aplica la ecuación 25:

$$E(r) = \frac{6 \cdot 4500}{5000} = 5.4$$

El número de averías es mayor cuando se sustituyen las máquinas averiadas por la misma razón explicada en el caso anterior.

EJERCICIO 3

Enunciado La tabla adjunta muestra los tiempos en que 10 componentes de una tuneladora deben ser ajustados, reparados o reemplazados. Aplicando el método de la pieza crítica, establecer un plan de revisión, reparación y sustitución de los componentes del equipo, de modo que se sepa la cadencia para cada uno de ellos.

Componente	Horas	Componente	Horas
C1	390	C6	660
C2	250	C7	375
C3	580	C8	910
C4	1200	C9	2100
C5	870	C10	1550



Solución Lo que se pide en el enunciado es definir la cadencia de paradas para hacer el mantenimiento, estableciendo a qué número de horas de funcionamiento debe detenerse la máquina para hacer correcciones.

Para ello se procede del modo siguiente: se identifica en primer lugar el componente que tiene una vida útil más corta. Este es el C2, que debe ser reemplazado cada 250 horas. Por tanto, puede establecerse ya el estadillo de revisiones, definiendo paradas cada 250 horas. En cada parada esta pieza será reemplazada:

Componente	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750
C1											
C2	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
C3											
C4											
C5											
C6											
C7											
C8											
C9											
C10											

Ahora se localizan los componentes cuya vida es inferior a dos veces la de la pieza crítica, es decir, menos de 500 horas. Estas piezas se reemplazarán aprovechando la parada de la pieza crítica, porque de lo contrario obligarían a parar antes del segundo reemplazo de ésta. Son los componentes C1 (390 horas), y C7 (375 horas). Por tanto:

Componente	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750
C1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
C2	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
C3											
C4											
C5											
C6											
C7	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
C8											
C9											
C10											

A continuación se localizan los componentes que tienen una vida inferior a 3 veces la de la pieza crítica, es decir, menor a 750 horas. Son los componentes C3 (580 horas) y C6 (660 horas). Estos componentes se reemplazarán cada 500 horas, porque no pueden esperar a la siguiente parada.

Con ello:

Componente	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750
C1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
C2	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
C3		X		X		X		X		X	
C4											
C5											
C6		X		X		X		X		X	
C7	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
C8											
C9											
C10											

Ahora se identifican los componentes cuya vida útil es inferior a cuatro veces la de la pieza crítica (1000 horas) y son los C5 (870 horas) y C8 (910 horas):

Componente	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750
C1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
C2	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
C3		X		X		X		X		X	
C4											
C5			X			X			X		
C6		X		X		X		X		X	
C7	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
C8			X			X			X		
C9											
C10											

Continuando el proceso se completa el estadillo de revisiones, que quedaría:

Componente	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750
C1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
C2	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
C3		X		X		X		X		X	
C4				X				X			
C5			X			X			X		
C6		X		X		X		X		X	
C7	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
C8			X			X			X		
C9								X			
C10						X					

Si la máquina llevara en funcionamiento, por ejemplo, 1800 horas, ya se sabría que la próxima revisión de mantenimiento se produce a las 2000 horas, y se revisan o sustituirán los componentes C1, C2, C3, C4, C6, C7 y C9.

EJERCICIO 4

Enunciado Se prevé que una pieza de un martillo neumático de perforación va a fallar en servicio con una tasa de fallo constante de 0.000625 fallos por hora de funcionamiento. Si se tienen tres martillos iguales, y cada martillo trabaja una media de 1600 horas al año, calcular el número de repuestos que debe tener el parque para cubrir las necesidades durante 1 año con un nivel de confianza del 90 %.



Solución La previsión de piezas en taller se analiza mediante la función de probabilidad de Poisson, según la ecuación 27, que tiene en cuenta la probabilidad acumulada para un número r de averías o menos. Aplicando esa ecuación a este problema se quiere obtener el valor de r , para que la probabilidad $Pr(r, t) > 0.9$, siendo t el número de horas. En un año, el número de horas trabajadas será de $t = 3 \cdot 1600 = 4800$, porque hay tres martillos. La tasa de fallos es de $\lambda = 0.000625$. Como el valor de r aparece en el límite del sumatorio, hay que proceder por iteraciones, calculando la probabilidad desde $r=0$ hasta que la acumulada sea superior a 0.9. Para $r=0$ se tendría:

$$Pr(0, 4800) = \frac{e^{-0.000625 \times 4800} (0.000625 \cdot 4800)^0}{0!} = 0.0498$$

Como la probabilidad es menor a 0.9, se prueba con $r=1$:

$$Pr(1, 4800) = 0.0498 + \frac{e^{-0.000625 \times 4800} (0.000625 \cdot 4800)^1}{1!} = 0.1992$$

Se prueba con $r=2$:

$$Pr(2, 4800) = 0.1992 + \frac{e^{-0.000625 \times 4800} (0.000625 \cdot 4800)^2}{2!} = 0.4232$$

Con $r=3$:

$$Pr(3, 4800) = 0.4232 + \frac{e^{-0.000625 \times 4800} (0.000625 \cdot 4800)^3}{3!} = 0.6472$$

Con $r=4$:

$$Pr(4, 4800) = 0.6472 + \frac{e^{-0.000625 \times 4800} (0.000625 \cdot 4800)^4}{4!} = 0.8152$$

Y finalmente con $r=5$:

$$Pr(5, 4800) = 0.8152 + \frac{e^{-0.000625 \times 4800} (0.000625 \cdot 4800)^5}{5!} = 0.9160$$

Como ya se supera el valor de 0.9, el número de repuestos es de 5.

B. Bibliografía

Referencias

- [1] Victor Yepes Piqueras. *Gestion de coste y produccion de maquinaria de construccion*. Spanish. Valencia: Universidad Politecnica de Valencia, 2023. ISBN: 978-84-1396-046-3.
- [2] Manuel Díaz del Río. *Manual de maquinaria de construcción*. Spanish. OCLC: 1123931153. España. McGraw-Hill, 2001. ISBN: 978-84-481-3028-2.

NOTAS

[illegible]