

Fiabilidad y conservación de las instalaciones fijas ferroviarias en los países no industrializados^(*)

Por MANUEL DIAZ DEL RIO Y JAUDENES

Prof. Dr. Ingeniero de Caminos, C. y P.

Se analiza el carácter secuencial de las distintas decisiones económicas en la Empresa (renovación, conservación, stocks), y se definen los criterios de valor para su aplicación de forma genérica. Las distintas situaciones en que puede perfilarse la investigación operativa, se relacionan con los conceptos de fiabilidad y avería, con indicación de las funciones que las rigen.

Un análisis de la situación del ferrocarril en los países no industrializados, permite contemplar los horizontes del problema, donde el empleo de las modernas técnicas de gestión pueden jugar un gran papel.

Desde un punto de vista de futuro, el ferrocarril debe enfrentarse en la actualidad con una coyuntura tal vez favorable si se tiene en cuenta su rendimiento energético, pero incierta si se contemplan los mercados financieros y la recesión económica que se avecina.

En efecto, no debe ignorarse que el ferrocarril sólo se justifica económicamente cuando existe un tráfico superior a ciertos niveles (cuya determinación aun siguiendo los procedimientos más complejos no presenta grandes dificultades), y por ello cuando no se alcanzan esos umbrales de utilización mínimos, el problema deficitario y financiero atenaza y agobia a la Empresa, máxime dados los órdenes de inversión en los que se mueve.

Es muy posible que en muchos países las inversiones en los capítulos de energía, organización del territorio, protección de la naturaleza, salud y enseñanza e investigación, tengan un carácter preferente en la adjudicación de los medios financieros, y si a esto añadimos la escasez actual de bienes de capital, más notable todavía hoy por la penuria de energía a medio plazo, podemos darnos una idea del problema con el que debe enfrentarse la mayor parte de las empresas ferroviarias, en particular en los países no industrializados. Júzguese cuál sería el problema en estos países cuando el reparto de inversiones en los transportes interiores presenta, a título de ejemplo, en algunos países europeos, el siguiente balance en un año clave como 1976, de por sí muy significativo.

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta Revista, hasta el 31 de diciembre de 1980.

Puede comprenderse, además, que al ser la automoción uno de los motores del desarrollo, su reducción de actividad no va a yugularse en favor de los medios de transporte colectivos.

Así las cosas (disminución progresiva de la fiabilidad del equipamiento, penuria de capitales, riesgo en la inversión y tantos otros problemas estructurales y coyunturales), surge la idea de emplear en nuestro caso la investigación operativa, al igual que lo hizo, por primera vez, el físico inglés Blackett, al resolver por métodos matemáticos, la implantación óptima de los equipos de radar en Gran Bretaña, y así poner las bases reales para la victoria en la batalla de Inglaterra.

Aunque parezca raro, unas condiciones dramáticas excepcionales (donde se dan simultáneamente problemas de mantenimiento y energéticos), pero que van a ser cada día más frecuentes, se han podido constatar y sufrir el pasado verano en Estados Unidos. La conjunción de un dramático accidente en un tipo de avión comercial, de gran radio de acción, atribuido a falta de conservación, provocó durante el tiempo de retirada de servicio de los de su clase, un verdadero colapso del transporte en los Estados Unidos, agravado por una escasez de gasolina que impedía el empleo de transportes de superficie como sustitutivo de algunos vuelos de corto recorrido suspendidos. La sensibilización del gran país americano al tener todavía fresco el recuerdo del accidente imputado a una manipulación y conservación defectuosa, en una central nuclear del Este de los Estados Unidos, daba mejor que cualquier explicación retórica el volumen del problema, su importancia, y, sobre todo, la incidencia en el modo de vivir de uno de los países realmente más avanzados del mundo.

FIABILIDAD DE LAS INSTALACIONES FERROVIARIAS

Comentar ciertos aspectos de la economía de la empresa ferroviaria por métodos matemáticos avanzados es el objeto del presente estudio, amén de deshacer la dictomía existente entre decisiones secuenciales (como son la inversión y la conservación) mal comprendidas en muchos casos.

LAS DISTINTAS DECISIONES ECONOMICAS EN LA EMPRESA

Tras la adquisición de bienes y equipos sigue su puesta en explotación, luego vienen los ciclos de renovación y reparación y, finalmente, la venta o eliminación de los materiales y bienes inservibles. Puede suceder también que en el momento de la inversión o después de una reparación, el material sea almacenado o reserva de un uso ulterior, pero en todo caso estas fases sucesivas constituyen un verdadero ciclo.

Así, pues, aparecen tres grandes categorías de problemas secuenciales:

- Determinación de las inversiones (naturaleza, cantidad, calendario, etc.).
- Gestión de un funcionamiento satisfactorio, o sea, seguro y fiable (conservación).
- Gestión técnico-económica de los abastecimientos y stocks.

Es evidente que las decisiones no se pueden tomar aisladamente, pues cada una condiciona en parte o decisivamente las otras. Por consiguiente, la elección no es a realizar entre dos o tres decisiones alternativas, sino entre varias políticas, que

no son otra cosa que *secuencias* de una decisión global. La elección debe tener en cuenta la política hasta un horizonte económico determinado, lo cual puede suponer sacrificios necesarios en ciertos periodos.

En el caso más general, donde el porvenir es aleatorio, estocástico o Markoviano, una política fija de una forma única, la respuesta a dar al azar: A cada una de las situaciones posibles un determinado algoritmo hace corresponder una decisión determinada.

Los tres problemas que hemos citado (inversiones, mantenimiento y almacenamiento) no son independientes puesto que, por ejemplo, la elección de una política de inversiones está ligada a su fiabilidad.

Comencemos por las inversiones.

En la Empresa se pueden distinguir fundamentalmente dos tipos de inversión:

Por una parte el deseo de acrecentar la capacidad o el potencial de la Empresa lleva a efectuar las inversiones llamadas de *expansión*.

Por otra parte el desgaste y la obsolescencia arrastran a inversiones llamadas de renovación.

Estas dos posiciones, que deben forzosamente diferenciarse, pues son radicalmente distintas, implican tres tipos característicos de inversión:

1. Inversiones puras (de expansión).
2. Inversiones mixtas (renovación y expansión).
3. Inversiones de renovación pura.

Inversiones en transportes interiores (C.E.M.T. Año 1976)

País	Producto interior bruto (*) P.I.B.	Formación bruta de capital fijo Inversiones brutas (*) F.B.C.F.	Inversiones en los transportes interiores		
			Valor total (*)	% P.I.B.	% F.B.C.F.
Alemania (1975)	1.045.520	221.060	39.436	3,8 (2,0)	17,8 (9,6)
Grecia (1975)	673.430	140.170	24.233	3,6 (1,9)	17,3 (9,3)
Holanda (1975)	205.360	43.660	7.755	3,8 (2,7)	17,8 (12,7)
Portugal (1975)	373.500	50.700	6.745	1,8 (0,5)	13,3 (3,9)
Reino Unido (1975)	102.969	20.460	4.065	3,9 (2,2)	19,9 (11,3)
Suecia (1975)	288.011	59.757	13.187	4,6 (2,8)	22,1 (13,6)
Suiza (1975)	139.800	33.565	6.444	4,6 (2,2)	19,2 (9,1)

(*) Montantes en monedas nacionales y en millones de unidades.
Entre paréntesis: solamente vehículos automóviles.

Decidir un programa de inversiones necesita previamente una información de la situación actual (leyes de duración de vía) y de los criterios futuros que se fijen para la misma (evolución de la demanda, nivel de los precios, previsiones que pueden ser consideradas como ciertas o aquellas en las que interviene un factor de probabilidad, etc.).

Existen numerosos criterios cuyos desarrollos, perfectamente conocidos y cuantificables, vamos a enumerar, si bien su análisis detallado se sale, por su extensión, del ámbito de este trabajo.

Es importante distinguir entre los criterios que llamaremos de riesgo y los criterios económicos simplemente.

Los criterios *económicos* son:

En porvenir cierto:

- El criterio del beneficio actualizado (a diferentes tasas).
- El criterio de la tasa de rentabilidad máxima.
- El criterio de capitalización y de plusvalía (de empleo delicado y que a menudo se clasifica entre los criterios de riesgo).

En porvenir aleatorio:

- El criterio de esperanza de beneficio actualizado (a diferentes tasas).
- El criterio de una tasa de rentabilidad esperada.

Los criterios de *riesgo* son:

En porvenir cierto:

- El criterio del tiempo de recuperación.
- El criterio del precio de coste.

En porvenir aleatorio:

- El riesgo de ruina o accidente.

Tratamos a continuación el concepto de conservación.

Debe definirse, ante todo, el concepto de duración de vida de un bien o de un equipo. Se entiende por tal, el tiempo que transcurre desde el nacimiento industrial de la pieza hasta su muerte técnica (por oposición a su muerte económica); la obsolescencia no interviene generalmente en esta definición. En un estudio de esta naturaleza el cálculo de probabilidades y la estadística asimilan los procesos de avería a leyes perfectamente determinadas para cada tipo de bien o material.

Debe tenerse igualmente en cuenta que a los procesos habituales de mantenimiento se añaden las repercusiones de los costos de avería inducidos que pueden ser muy elevados.

La definición de una política de gestión de un parque, permite establecer previsiones (eventualmente aleatorias) de materiales a renovar, en función de los cuales se calcula el stock de piezas de recambio.

Para fijar el orden de magnitud de las cantidades a almacenar, y el espacio de las órdenes de compra, la consideración de un régimen permanente en el consumo de los stocks es una hipótesis interesante. En este tema de la gestión de almacenes, ampliamente desarrollado en la actualidad no se profundizará en este trabajo.

CRITERIOS DE VALOR

Debemos recalcar la preocupación esencial para asegurar que sean tomadas y ejecutadas las decisiones correctas en cuanto a inversiones, conservación y stocks se refiere. Las relaciones de prioridad deben estar organizadas de forma que se consiga obtener las informaciones necesarias, difundirlas entre aquellos que las precisan, verificar que se toman las decisiones de acuerdo con los fines de la Empresa y, finalmente, controlar la ejecución de estas decisiones. A causa de su papel central el análisis de la noción de decisión debe ser necesariamente el punto de partida de todo estudio de gestión, cualquiera que sean los aspectos a que afecta.

Considerada abstractamente, una decisión es una elección entre un conjunto de actos posibles. Esta decisión es correcta si, al haber sido hecha en función de un criterio de valor que permite clasificar las consecuencias de estos actos, escoge el acto que engendra las consecuencias teniendo el mayor valor.

Aislando los elementos constitutivos de una decisión, encontramos:

- Estudio del campo de actos posibles.
- Estudio de sus consecuencias.
- Maximización de un criterio de valor.

De esta definición se obtienen ciertas técnicas económicas muy fructíferas que nos ayudarán a precisar el campo del estudio. Se notará que se ha evitado caracterizar una decisión correcta como la elección del mejor medio para alcanzar un fin dado. En efecto, lo que es un fin en un cierto aspecto puede no ser más que un medio cuando se le contempla con una perspectiva más amplia. Dicho de otra forma, existe una jerarquía de criterios de valor y según el tipo de decisiones que se consideran, es preciso recurrir a un criterio más o menos elevado en la jerarquía.

LA SITUACION DEL FERROCARRIL EN LOS PAISES NO INDUSTRIALIZADOS

No puede analizarse con rigor el problema de la fiabilidad de las instalaciones fijas ferroviarias, sin hacer antes una somera revisión de la problemática que ha supuesto el pasado del ferrocarril en los países no industrializados. Para ello, se resume lo que ha sido hasta el momento la posición del International Bank for Reconstruction and Development en este tema.

«Puede considerarse que la mayor parte de los ferrocarriles de los países no industrializados se encuentran en alguna de las etapas de la pauta de deterioro que se esboza a continuación. Por lo general, los ferrocarriles se construyeron en su mayor parte con anterioridad al inicio del transporte por carretera, con el objeto de atender todo tipo de necesidades de transporte, puesto que en los comienzos el ferrocarril gozaba prácticamente de un monopolio, resultó fácil asignarle funciones en el proceso de desarrollo, que con frecuencia se cumplían mediante estructuras tarifarias que no reflejaban sus verdaderos costos. Se cobraban las tarifas que el tráfico soportaba, y las metas financieras globales se alcanzaban mediante subvenciones entre las distintas clases de usuarios o, por lo menos, mediante diferencias muy sustanciales en la aportación de los diversos tipos de tráfico a los costos generales. Debido a que el ferrocarril no tenía competencia, también era fácil utilizarlo como medio de proporcionar empleo costeando el público el costo del exceso de empleados en forma de tarifas más altas. Era también posible hacer, y de hecho se hacían, inversiones de dudosa justificación que eran absorbidas sin que se produjera un desastre financiero. Cuando la competencia del transporte por carretera se convirtió en una realidad, el logro de las metas financieras del ferrocarril se vio amenazado inmediatamente. No obstante, en vez de eximir al ferrocarril de su función en materia de desarrollo y empleo y de modificar su ya tradicional sistema tarifario, se trató de protegerlo de esa competencia.

Muchos de los ferrocarriles en países no industrializados se encuentran en esa etapa de monopolio vulnerable, sostenidos por restricciones al transporte por carretera y a las inversiones viales. La duración de esta etapa depende de la solidez administrativa de las restricciones, del grado de identificación que exista entre el Gobierno y el ferrocarril, y de la iniciativa de la industria local de transporte por carretera. Pero por lo general, no puede durar mucho tiempo. En la mayoría de los países en cuestión, la situación está cambiando rápidamente y el monopolio de los ferrocarriles está a punto de desaparecer. En los casos en que persista el monopolio, el problema irá adquiriendo

mayores proporciones y sería más difícil de resolver.

Recargados frecuentemente con demasiada mano de obra y precios excesivos, los ferrocarriles comienzan a perder dinero una vez que el monopolio llega a su fin y la competencia capta el tráfico de tarifas elevadas, muy superiores a los costos ferroviarios, dejándole al ferrocarril los flujos que contribuyen poco o nada a cubrir los costos generales. En la mayor parte de los casos, los déficits constituyen una subvención a la industria, la agricultura, los pasajeros y la fuerza laboral, su eliminación plantea un importante problema político. No obstante, el Estado, por lo general, se resiste a seguir conteando esos déficits y el ferrocarril no puede defenderse en forma convincente contra las inevitables acusaciones de ineficiencia.

Entonces empiezan a hacerse economías contraproducentes: primero, se reduce radicalmente la depreciación; *luego se suprimen las asignaciones para conservación*, y, por último, se cortan las inversiones en modernización. De ese modo, se crea un círculo vicioso de déficits financieros, subinversión, deterioro de la calidad del servicio, pérdida de tráfico y déficits aún mayores.

La situación se ve agravada a menudo por la débil administración ferroviaria, que se siente protegida, y a la vez desmoralizada, por los efectos de la política del sector público y del funcionamiento a base de déficit. La política pública lleva a la larga a un punto en que el ferrocarril se encuentra en grave peligro de perder el papel que desempeña en la economía. En esa situación, se alienta la realización de inversiones importantes, y a menudo excesivas para incrementar la capacidad del transporte por carretera, en competencia con el ferrocarril, lo que supone un elevado costo económico para el país. En esta etapa se encuentran muchos países desarrollados, así como una serie de países en desarrollo.

Hay que contribuir a eliminar o evitar ese tipo de deterioro en todos aquellos casos en que el ferrocarril puede desempeñar una función económica importante en el desarrollo futuro de sus países. Aunque es posible que haya algunos proyectos que comprendan nuevas obras de construcción encaminadas a atender la demanda «cautiva», en la gran mayoría de los proyectos ferroviarios será preciso seguir aplicando la estrategia mencionada. Esos proyectos se concentrarán en la rehabilitación, la implantación de amplias reformas y la eliminación de sistemas demasiado extensos, con el fin de permitir al ferrocarril desempeñar el papel que le corresponde en la economía en un clima de competencia».

Finalmente, resulta del mayor interés recalcar lo que Fogel llama «devorador apetito de capital

del ferrocarril» y que obliga forzosamente a una más racional conservación de equipos con períodos de amortización medios y largos.

Nada se conseguirá de un plan importante de inversión sin una puesta a punto de una conservación que permita tener en valor los activos permanentes.

LA INVESTIGACION OPERATIVA

Se define la investigación operativa como el análisis de las situaciones en las estructuras y la previsión utilizando métodos científicos. Kaufmann clasifica someramente estas situaciones de la siguiente forma:

a) Las estructuras están descritas por magnitudes perfectamente conocidas, el porvenir puede ser tratado como determinado. Si las estructuras son muy simples una débil referencia a la lógica y a la experiencia permite escoger la solución o soluciones que convienen a los objetivos y hacer óptima la función económica que se dé. Si estas estructuras son más complicadas las magnitudes determinadas pueden según los casos:

- Formar relaciones lineales o no; por ejemplo, aquellas que se encuentran en los programas lineales.
- Hacer intervenir relaciones de orden; por ejemplo, aquellas que se encuentran en problemas de prioridad.
- Suministrar conjuntos que se examinarán bajo su aspecto combinatorio; por ejemplo, problemas de planning.
- Constituir relaciones secuenciales, o sea, en las que cada estado determine el estado siguiente.

El hombre está en presencia de un Universo determinado.

b) Cada decisión está asociada a una serie de estados aleatorios: ciertas magnitudes están determinadas, otras son aleatorias, es decir, toman valores al azar, pero se conoce la distribución de la probabilidad de cada uno de los valores. Es evidente que relaciones de todas las clases pueden existir entre las magnitudes determinadas y las magnitudes aleatorias.

Muy a menudo se descubre la presencia de fenómenos de naturaleza estocástica, cuyas probabilidades de estado varían con el tiempo.

Frente a tales situaciones se trata de predecir, apoyándose sobre conocimientos estadísticos lo

que es observable y medible; estas situaciones se encuentran, por ejemplo, en los problemas de stocks (demanda aleatoria), de sustitución (desgaste aleatorio), etc.

El hombre se encuentra en presencia de un Universo regido por el azar, que puede deducir de medidas estadísticas ciertas probabilidades.

c) En las dos situaciones precedentes no hay reacción inteligente del medio exterior, pero a menudo esta reacción existe, por ejemplo, la de las actividades concurrentes.

La preparación de la decisión toma entonces el aspecto de un juego de estrategia. Se pueden imaginar las acciones posibles de los adversarios aplicando valores y/o probabilidades a éstos. Una decisión puede entonces ser considerada como una estrategia.

El hombre se encuentra en presencia de un concurrente inteligente.

d) Se posee un cierto conocimiento de las estructuras, pero las soluciones futuras asociadas a nuestras situaciones son desconocidas en probabilidad. Se considera la naturaleza como un adversario y paso a paso se busca la solución más favorable. El método científico no es aplicable y la intuición lo reemplaza a menudo.

El hombre se encuentra en presencia de un Universo desconocido.

Esta clasificación es sobre todo útil, desde el punto de vista de los instrumentos de la investigación operativa y permite poner en evidencia los dominios teóricos a partir de los cuales son contruidos. Es lógico que para resolver problemas concretos sea preciso, a menudo, utilizar ciertos instrumentos que pertenecen a una u otra de las categorías definidas más arriba.

SEGURIDAD Y REDUNDANCIA

Otro tema de extraordinaria importancia es el análisis del concepto de seguridad en el ferrocarril, donde se solucionan los problemas de esta índole, basándose en el principio de que ante cualquier dispositivo que falle se activa una señal u orden reglamentaria en la posición de no permitir la circulación como medida de garantizar aquella seguridad. Es evidente que los otros medios de transporte, en concurrencia con el ferrocarril, y en particular la aviación, disponen de un concepto de seguridad basado principalmente en la redundancia, esto es, la entrada en servicio activo (en serie, paralelo, etc.) de mecanismos como alternativa de sustitución de elementos en posición de avería.

Puede comprenderse, por tanto, que los equipos ferroviarios deben tener mucho más en cuenta en el futuro el concepto de fiabilidad para poder hacer frente a las necesidades de regulación de las circulaciones con precisiones muy elevadas, abandonando el antiguo concepto de la seguridad que no es compatible con una fiabilidad aceptable.

No se comprende, hoy en día, que una instalación del tipo que sea, para garantizar la seguridad, no disponga, en muchos casos, de otra alternativa, que la de no permitir la circulación, pues si bien es evidente que no circulando la seguridad es máxima, también lo es que sin actividad regulada y fiable no puede establecerse una explotación económica de activos tan importantes como los ferroviarios.

Se da por hecho que la seguridad debe garantizarse dentro de límites establecidos pero no al precio de paralizar el transporte más tiempo que el previamente marcado en un proyecto de fiabilidad y por supuesto garantizando una explotación más regular y planificada y, por tanto, más acorde con una explotación económica del ferrocarril como empresa.

Como se sabe, la redundancia es el empleo de varios medios para cumplir una función dada, cuando ésta podía ser cubierta por un solo dispositivo. Esta superabundancia de dispositivos debe permitir obtener una fiabilidad del conjunto, más grande que la del dispositivo solo.

Se distinguen varios tipos de redundancia:

a) La redundancia simple llamada a veces activa, en la que los dispositivos funcionan continuamente. El conjunto será considerado como averiado cuando todos los dispositivos hayan fallado o cuando solamente una cierta parte de éstos hayan fallado.

Un ejemplo de redundancia simple lo constituye la función renal. El hombre posee dos riñones pero puede vivir con uno sólo.

b) La redundancia de reserva, secuencial o de conmutación, en la cual un solo dispositivo está en servicio a la vez. Cuando presente una avería un dispositivo (órgano de decisión y de conmutación) se registra el fallo y conmuta en línea otro dispositivo, que funciona en forma permanente o secuencial.

Un ejemplo de este tipo de redundancia es el de los neumáticos de un automóvil. Ante la avería de uno de ellos, el conductor lo reemplaza y sigue funcionando con los cuatro.

c) La redundancia mayoritaria en la cual varios dispositivos funcionan simultáneamente. Un dispositivo de control da unas señales internas de las

funciones suministradas por los dispositivos que son comparadas con unos niveles de actividad preestablecidos. No hay conmutación en ningún caso.

Este tipo de redundancia se encuentra en el sistema sensible y nervioso de la vista.

En general, la redundancia simple se emplea principalmente al nivel de componentes, la redundancia con conmutación a los niveles de sus conjuntos o aparatos, y la redundancia mayoritaria al nivel de sistemas en el caso de una seguridad exigida muy grande, e igualmente a nivel de los circuitos lógicos.

FIABILIDAD Y AVERIA

Conviene hacer, antes de seguir, algunas precisiones sobre conceptos hasta hoy no empleados o casi ignorados en el ferrocarril.

La Comisión Electrotécnica Internacional (CEI) define la fiabilidad como una característica de un dispositivo expresada por la probabilidad que cumpla una función precisa, en condiciones dadas durante un tiempo dado.

Por tanto, la fiabilidad se caracteriza por cuatro conceptos: la probabilidad, los rendimientos a cumplir, las condiciones de operación y, finalmente, la duración; por tanto, queda definida la fiabilidad como una probabilidad, función del tiempo, expresable por una relación matemática y susceptible de evaluación.

Normalmente la fiabilidad se expresa bajo la forma de una probabilidad de no avería durante un tiempo dado.

Existen varias clasificaciones de avería:

a) En primer lugar la clasificación más usual responde a las repercusiones de un fallo o avería y se acepta el clasificarlas en: críticas, mayores o menores, siendo el alcance de estos conceptos perfectamente asequibles sin mayor aclaración.

b) La clasificación según la forma de aparición de una avería permite dividir éstas en las siguientes clases:

Averia repentina. — Aquella que no ha podido ser prevista en un examen o inspección anterior.

Averia progresiva. — Aquella que ha podido ser prevista en un examen o inspección anterior.

Averia parcial. — Que resulta de desviaciones de una o varias de las características más allá de los límites especificados, pero de tal forma que no supone una anulación completa de la función.

Averia completa. — Aquella que resulta de una

FIABILIDAD DE LAS INSTALACIONES FERROVIARIAS

desviación de alguna o de varias características del equipo que supone una desaparición de la función.

Avería cataléctica. — Repentina y completa.

Avería por degradación. — Progresiva y parcial.

Estas dos últimas clases corresponden como es evidente a combinación de conceptos de las anteriores.

Debe llamarse la atención de hasta qué punto es delicado querer introducir demasiado rigor en este campo. En efecto, la velocidad de aparición del defecto es una noción completamente cualitativa, que depende esencialmente de la periodicidad de las verificaciones o de los controles efectuados.

c) En ciertos equipos existe también otra forma de clasificación de las averías, según sean éstas de tipo precoz, de tasa de avería constante o simplemente de desgaste.

Estas tres clases corresponden a otros tantos períodos de la vida de un equipo. La primera es la que podíamos llamar averías de la primera edad, con tasa decreciente; la segunda corresponden a la época de madurez del equipo, con tasa de avería sensiblemente constante y, finalmente, se presenta la que corresponde al período de desgaste con tasa de avería creciente.

En general, el segundo período (llamado de vida útil) corresponde a la aparición de las averías cataléticas que ocurren sin causa sistemática, de forma aleatoria con una tasa de aparición sensiblemente constante.

La tasa de averías de este período es, para un equipo dado, un índice de su calidad y es posible mediante los controles necesarios en el proceso de fabricación disminuir aquéllas fuertemente.

El primer período corresponde a la aparición de averías debidas a defectos de fabricación, a sus procesos o a concepción, pero en todo caso a controles insuficientes.

Los ensayos de rodaje (principalmente en fábrica) de los equipos tienen por fin conseguir que el producto a la salida de fábrica tenga un conjunto de características de fiabilidad muy próximos a los del segundo período.

El último período corresponde al desgaste de los dispositivos. Corresponde a una degradación irreversible de las características de concepción y de fabricación del producto, que en todo caso afectan no solamente al principio de funcionamiento sino también a las materias primas utilizadas y a las técnicas que se hayan empleado. Las averías que surgen en este período son siempre averías de degradación.

Para los equipos reparables se utiliza el concepto, que definiremos más adelante, «TIEMPO MEDIO DE BUEN FUNCIONAMIENTO» (MTBF = mean time between failures) que es función creciente de la fiabilidad.

La utilización de la investigación operativa es en muchos casos un instrumento fundamental para describir la evolución de los procesos de avería y de fiabilidad.

El concepto de mantenimiento o conservación comienza en el momento en que se estudia un equipo determinado y cuando se verifica la proposición de su adquisición. Una mala elección es en efecto generadora de inconvenientes de todo tipo, paradas, degradación de los equipos, rendimiento insuficiente, reparaciones demasiado frecuentes, etc. Es por ello que las adquisiciones deben ser en lo posible preparadas por especialistas a la vez en el empleo de los equipos y en los métodos de fabricación y sistemas de conservación a utilizar.

Insistamos un poco más sobre las modalidades preventiva y correctiva de la conservación.

La prevención hace intervenir no solamente el personal que está especializado en esta tarea, sino también el encargado de supervisar los procesos de construcción o fabricación. Importa, por tanto, la presencia de un servicio especializado encargado de establecer los sistemas permanentes de inspección y de control, de manera que se permita asegurar que todas las medidas preventivas están bien tomadas y que dadas las consignas de supervisión y vigilancia son respetadas en realidad. Otro aspecto de control preventivo es el control de calidad; este género de control que se encuentra codificado en los países desarrollados para la mayor parte de las actividades y el carácter sistemático de las operaciones a efectuar ha contribuido a crear una doctrina de control que de hecho está al alcance de todos los usuarios.

El mantenimiento correctivo, al fin, conduce a recalcar la importancia de una organización racional con vista a supervisar las reparaciones a efectuar; en todo caso es preferible la detención o retirada de servicio de un equipo o una máquina para repararlos, que utilizarlos en condiciones desfavorables, incluso si la producción o el servicio debe detenerse o ralentizarse momentáneamente.

Finalmente, debemos recalcar que, como es lógico, la fiabilidad de los componentes, ya sean mecánicos, electromecánicos o electrónicos, depende fundamentalmente de dos factores:

1.º La concepción en el sentido más amplio del dispositivo, que comprende:

— Su esquema teórico de funcionamiento.

- Las características de las materias primas empleadas.
- Las técnicas de construcción.

2.º Su proceso de fabricación o construcción, que comprende en el caso más general:

- Las técnicas y procesos de construcción con los automatismos necesarios.
- La precisión de los útiles empleados en la construcción.
- El proceso de control a lo largo de toda la fabricación, incluido el de la recepción de las materias primas.

En todo caso, los ensayos de fiabilidad comportan procesos de estadística descriptiva, dado que muy rara vez el comportamiento de todos los dispositivos de una población puede ser ensayado.

Como es lógico, en cada caso se utilizará el método científico de la estadística descriptiva en cada una de sus variantes para determinar el carácter representativo de los parámetros elegidos estableciendo, en definitiva, la dicotomía bueno-malo que todo carácter de representación tiene en los tests cualitativos.

Por otra parte, de los datos obtenidos de distintas observaciones, podemos determinar los modelos matemáticos más apropiados para describir de una forma general y sintética los resultados que hayamos obtenido. Esto representa el paso de los procesos de la estadística descriptiva a la estadística matemática; el juicio sobre la muestra y la estimación de la misma son las operaciones más conocidas y empleadas.

Finalmente, los tests de hipótesis conducen a saber si se puede adoptar una hipótesis determinada supuesta «a priori» o por el contrario conviene rechazarla. Como es sabido, los tests de hipótesis llevan como consecuencia el establecimiento de una curva de eficacia muy empleada entre los que habitualmente se dedican al control de calidad.

LAS LEYES DE FIABILIDAD

Los equipos mecánicos responden en cierto sentido a un esquema vital, similar al de los seres vivos, comenzando su existencia con su «creación» en taller, necesitando posteriormente una conservación para mantener su estado correcto, cara al servicio que deben prestar y, finalmente, produciéndose la «muerte» técnica, que coincide o no con lo que podríamos llamar muerte económica. En este aspecto la obsolescencia no es más que una consecuencia del precio no competitivo que resulta de la actividad del equipo.

Para que el «ser artificial» llamado «máquina» se mantenga en condiciones de funcionamiento aceptables, es preciso que se den ciertos condicionantes de conservación, justificados en razón fundamentalmente a dos parámetros, que son:

- La *rentabilidad* de la actividad y la *fiabilidad* que resulta para los equipos, de unos planes sistemáticos de conservación.

En los últimos treinta años se ha manifestado un profundo interés por todo lo relacionado con los problemas de la duración de vida y de la fiabilidad de las máquinas y de sus componentes.

Ello ha llevado a la deducción de ciertos modelos de probabilidad que se adaptan en cada caso particular de una forma conveniente a la realidad, aunque por otra parte la naturaleza física de las máquinas y sus componentes sirven de base para el planteamiento de la probabilidad de avería y su casuística.

Los fundamentos teóricos en los que se basa una teoría suficientemente perfecta del desgaste y de la avería de los equipos han servido de base para la explotación de unos resultados teóricos para:

- Perfeccionar la construcción y la tecnología de la producción.
- La elección racional de los componentes y materiales.
- La adaptación de las características de duración de vida de los mismos para evitar en lo posible grandes reparaciones mediante la utilización de reparaciones preventivas en las que se sustituyen conjuntos completos modulados.
- Precisar las técnicas de recepción de componentes y de reparación.
- Un mejor conocimiento resistente de las piezas y de sus conjuntos.

Aunque los métodos matemáticos y estadísticos se emplearon inicialmente en la industria automovil con fines de racionalización de su conservación y mejora en el diseño de sus partes mecánicas, la mayor parte del desarrollo actual en esta técnica se ha extendido a todas las máquinas y equipos de la industria en general y de la construcción en particular, principalmente en los países desarrollados.

Debe notarse que múltiples métodos empleados en las técnicas anteriormente indicadas, han tenido recientemente su mayor desarrollo en los componentes de la electrónica, cuya expansión comercial ha tenido características muy especiales en los últimos años y que de rechazo ha servido para

MODELOS DE FIABILIDAD

DISTRIBUCION	TASA DE AVERIA $a(x)$	FUNCION DE FIABILIDAD $R(x)$	FUNCION DE DISTRIBUCION $F(x)$	DENSIDAD DE PROBABILIDAD $f(x)$	NOTAS
EXPONENCIAL	λ λ	$e^{-\lambda x}$ $e^{-\lambda(x-x_0)}$	$1-e^{-\lambda x}$ $1-e^{-\lambda(x-x_0)}$	$\lambda e^{-\lambda x}$ $\lambda e^{-\lambda(x-x_0)}$	$x \geq 0$ $x \geq x_0$
WEIBULL	$\frac{\beta(x-y)^{\beta-1}}{\eta^\beta}$	$e^{-\left(\frac{x-y}{\eta}\right)^\beta}$	$1-e^{-\left(\frac{x-y}{\eta}\right)^\beta}$	$\frac{\beta(x-y)^{\beta-1}}{\eta^\beta} \cdot e^{-\left(\frac{x-y}{\eta}\right)^\beta}$	$x \geq y$ $-\infty < y < +\infty$ LEY DE WEIBULL CON
MAXWELL RAYLEIGH	λx	$e^{-\frac{\lambda}{2} x^2}$	$1-e^{-\frac{\lambda}{2} x^2}$	$\lambda x e^{-\frac{\lambda}{2} x^2}$	$\beta=2 \quad \lambda=\frac{2}{\eta^2} \quad y=0$
FREUDENTHAL Y GUMBEL	$\frac{\beta(x-x_0)^{\beta-1}}{(\delta-x_0)^\beta}$	$e^{-\left(\frac{x-x_0}{\delta-x_0}\right)^\beta}$	$1-e^{-\left(\frac{x-x_0}{\delta-x_0}\right)^\beta}$	$\frac{\beta(x-x_0)^{\beta-1}}{(\delta-x_0)^\beta} \cdot e^{-\left(\frac{x-x_0}{\delta-x_0}\right)^\beta}$	$x \geq 0$
VALORES * EXTREMOS	e^y	e^{-e^y}	$1-e^{-e^y}$	$e^y - e^y$	SE DEDUCEN DEL MODELO (*) POR LA TRANSFORMACION $\ln\left(\frac{x-x_0}{\delta-x_0}\right) = y = \beta(z-u)$
	$\beta e^{\beta(x-v)}$	$e^{-z^{\beta}(z-v)}$	$1-e^{-z^{\beta}(z-v)}$	$\beta e^{\beta(z-v)} - e^{\beta(z-v)}$	$z = \ln(x-x_0)$ $u = \ln(\delta-x_0)$
	$\lambda \beta e^{\beta x}$	$e^{-\lambda(2^{\beta} x - 1)}$	$1-e^{-\lambda(2^{\beta} x - 1)}$	$\lambda \beta e^{\beta x} - e^{-\lambda(2^{\beta} x - 1)}$	
	$\frac{f(x)}{R(x)}$	$\int_x^{\infty} \frac{\lambda^{\beta}}{\Gamma(\beta)} v^{\beta-1} e^{-\lambda v} dv$	$\int_0^x \frac{\lambda^{\beta}}{\Gamma(\beta)} v^{\beta-1} e^{-\lambda v} dv$	$\frac{\lambda^{\beta}}{\Gamma(\beta)} x^{\beta-1} e^{-\lambda x}$	
	$\frac{\lambda^{\beta} x^{\beta-1}}{(\beta-1)! \sum_{j=0}^{\beta-1} \frac{(\lambda x)^j}{j!}}$	$\sum_{j=0}^{\beta-1} \frac{e^{-\lambda x} (\lambda x)^j}{j!}$	$\sum_{j=\beta}^{\infty} \frac{e^{-\lambda x} (\lambda x)^j}{j!}$	$\frac{\lambda^{\beta}}{(\beta-1)!} x^{\beta-1} e^{-\lambda x}$	$x \geq 0$
GAMMA	$\frac{\lambda^2 x}{1+\lambda x}$	$(1+\lambda x)e^{-\lambda x}$	$-(1+\lambda x)e^{-\lambda x}$	$\lambda^2 x e^{-\lambda x}$	$\beta=2 \quad x \geq 0$
NORMAL	$\frac{\frac{1}{\sigma} \varphi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)}{1-\phi\left(\frac{z-\mu_z}{\sigma_z}\right)}$	$1-\phi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)$	$\phi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)$	$\frac{1}{\sigma} \varphi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)$	$\phi(y) = \int_{-\infty}^y \varphi(v) dv$ $\varphi(v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{v^2}{2}}$
LOG. NORMAL	$\frac{0.4343}{x \sigma_z} \cdot \varphi\left(\frac{z-\mu_z}{\sigma_z}\right)$ $1-\phi\left(\frac{z-\mu_z}{\sigma_z}\right)$	$1-\phi\left(\frac{z-\mu_z}{\sigma_z}\right)$	$\phi\left(\frac{z-\mu_z}{\sigma_z}\right)$	$\frac{0.4343}{x \sigma_z} \varphi\left(\frac{z-\mu_z}{\sigma_z}\right)$	$z = \log 10^x$
LOGISTICA	$\frac{\beta(1-\delta)}{1-\delta(1-e^{-\beta x})}$	$\frac{e^{-\beta x}}{1-\delta(1-e^{-\beta x})}$	$\frac{(1-\delta)(1-e^{-\beta x})}{1-\delta(1-e^{-\beta x})}$	$\frac{\beta(1-\delta)e^{-\beta x}}{[1-\delta(1-e^{-\beta x})]^2}$	$\beta > 0, 1 \geq \delta > 0, x \geq 0$

cionalizar el empleo de las máquinas de construcción.

DEFINICIONES QUE AFECTAN AL ESTUDIO DE LOS EQUIPOS

Debe hacerse la observación que la duración de funcionamiento se refiere siempre a condiciones de la propia máquina y del entorno donde trabaja, muy precisas y concretas.

No son, por tanto, asimilables ni pertenecen al mismo conjunto de pruebas comparables, por ejemplo el ensayo de un motor en una bancada en fábrica, en condiciones precisas de engrase, de alimentación y de regulación, que las que sufriría un motor del mismo tipo, en el ambiente de una obra, con variaciones en su inclinación que pueden afectar a las condiciones de lubricación y en situación adversa por el grado de humedad y polución en el que trabaja.

Los principales parámetros a estudiar son:

Densidad de probabilidad de duración de vida = $f(t)$.

Responde a la siguiente expresión:

$$\text{Prob}(t < T < t + dt) = f(t) dt$$

Así la probabilidad que una avería suceda entre 0 y t será la que definimos a continuación como función de reparto de vida.

Función de reparto de duración de vida = $F(t)$.

Su expresión es: $\text{Prob}(T < t)$.

Por definición:

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt$$

Función de seguridad de funcionamiento o fiabilidad = $R(t)$.

Es la complementaria de la función de reparto y significa la probabilidad que un material funcione sin averías y en ciertas condiciones prefijadas durante un tiempo dado. La función de fiabilidad se representa con una curva monótona, función no creciente del tiempo.

$$R(t) = 1 - F(t)$$

Debe establecerse que la fiabilidad es en realidad una probabilidad con valores comprendidos entre 0 y 1, por tanto, no tiene sentido la expresión, en horas, de este parámetro.

Igualmente, la fiabilidad depende de la duración de funcionamiento y como antes hemos observado es decreciente de una forma continua, partiendo del valor 1 al principio de la vida de la máquina y llegando al valor 0 en el límite de aquélla.

Coeficiente de avería = $a(t)$.

Entendemos por tal la probabilidad que una pieza o máquina que funciona en el momento t sufra una avería entre t y $t + dt$.

Su expresión es:

$$a(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = - \frac{R'(t)}{R(t)}$$

MTBF (Mean Time Between Failure).

Se emplean a menudo las siglas MTBF para expresar el tiempo entre averías a esperar de un equipo o instalación.

Este tiempo medio entre averías tiene su origen en la expresión inglesa «MEAN TIME BETWEEN FAILURES», de uso muy extendido, sobre todo en la técnica de la electrónica y de la aviación.

Puede obtenerse con facilidad el valor de la MTBF de acuerdo con la siguiente expresión:

$$M = \int_0^{\infty} t f(t) dt$$