

Introducción al cálculo del LCC de vehículos ferroviarios



David González de la Peña

Ingeniero del ICAI, promoción del 98. Ha desarrollado diversas actividades relacionadas con el mantenimiento ferroviario en la empresa CAF. En la actualidad es el Gerente del Mantenimiento del Metro de Roma, Línea A.

El coste del ciclo de vida (en adelante LCC, del inglés *Life Cycle Cost*) de una máquina o de un equipo es un valor resultante del cálculo teórico de los gastos que, previsiblemente, tendrá que afrontar el operador o el dueño de la máquina o del equipo durante toda su vida útil, como consecuencia del desempeño previsto para dicha máquina o equipo.

La utilidad de este cálculo estimado consistía inicialmente en poder verificar, antes de la compra de una máquina, la capacidad económica del futuro propietario para asumir la adquisición, el mantenimiento y la operación de dicha máquina durante toda su vida útil prevista. Pero enseguida se descubrió otra utilidad para el comprador potencial de equipos: poder hacer comparativas (económicas) entre equipos diferentes durante toda su vida útil, añadiendo al coste de adquisición todos los gastos posteriores necesarios para asegurar la funcionalidad del equipo. Así, se dispone de otro criterio de gran relevancia para la decisión final de qué equipo comprar.

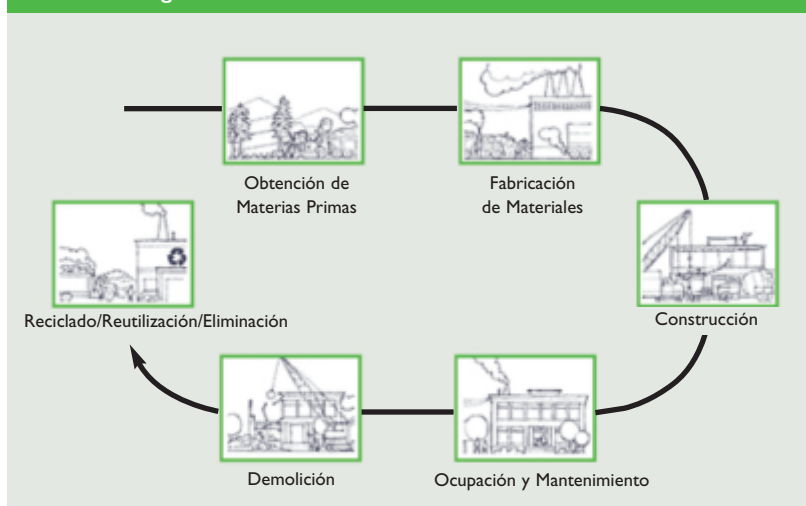
Además, este valor calculado aglutina diversas características técnicas del equipo, ponderándolas adecuadamente para facilitar la comparativa. Por ejemplo, la fiabilidad está

valorada en el LCC, puesto que una tasa de averías alta penalizaría el coste de mantenimiento. Ocurre lo mismo con la disponibilidad (proporción de horas en que el equipo está operativo), la mantenibilidad (que indica la facilidad del equipo para ser mantenido, y suele estar expresada en unidades monetarias) o la eficiencia energética (a menor eficiencia, mayor gasto energético).

Lógicamente, el empleo del LCC para hacer comparativas entre equipos requiere que su cálculo para todos ellos sea homogéneo. Es decir, que se calcule en las mismas condiciones de operación: igual exigencia de servicio, mismas condiciones externas, etc. Sin embargo, puesto que el cálculo del LCC debe ser realizado por el fabricante del equipo, que es quien lo conoce y quien debe garantizar el resultado, y el fabricante no tiene por qué conocer las condiciones de operación de cada usuario, se debe tender a eliminar del cálculo todos aquellos factores exclusivos o particulares de cada operador. Esto significa que el LCC debería ser un valor que depende exclusivamente del equipo, independientemente de las condiciones en que se le haga funcionar (o, más bien, para unas condiciones de operación estándar, asumidas por todos los fabricantes para sus cálculos). O sea, el LCC debería ser una característica inherente al equipo, como su peso o sus dimensiones.

Por ejemplo, el LCC de un tren debería ser el mismo, ya se destinara a un servicio en Túnez o a otro en Noruega. Lógicamente, esto requiere un esfuerzo muy importante de normalización o estandarización. Y, aún así, para equipos de cierta complejidad resulta casi imposible conseguir esta homogeneidad.

Figura 1. Ciclo de Vida de Construcciones de Edificios



Lo cual no es óbice para intentarlo, con todo el empeño posible en cada caso.

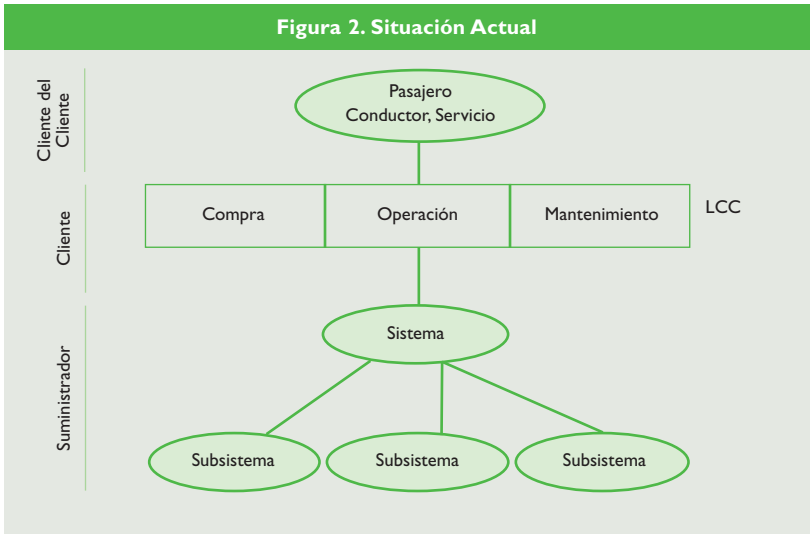
El cálculo del LCC se basa en estimaciones y previsiones, las cuales, a su vez, se basan habitualmente en datos procedentes de las siguientes fuentes:

- Experiencia del fabricante con equipos similares que hayan funcionado tiempo suficiente para permitir la obtención de datos fiables que sirvan de referencia.
- Cálculos teóricos del fabricante, a partir del diseño del equipo: fiabilidad, mantenibilidad, consumo energético, etc.
- Información proporcionada por el cliente, comprador potencial del equipo, a partir de su experiencia como operador de equipos similares.
- Información proporcionada por los fabricantes de subsistemas montados en el equipo. Por ejemplo, la tasa de fallos de todo el equipo debería ser la suma de todas las tasas de fallos de cada subsistema que lo compone.

A continuación, y una vez explicadas las ideas más generales, se particulariza la exposición para vehículos ferroviarios. Un tren, después de un avión o un buque, es probablemente el ejemplo más didáctico y oportuno, por dos razones fundamentales: por el enorme número de equipos diversos que lo componen (eléctricos, neumáticos, mecánicos, electrónicos, hidráulicos, de confort, etc.) y porque es, históricamente y junto con los otros vehículos mencionados antes, donde primero y con más frecuencia y éxito se ha profundizado en el cálculo del LCC. Además, en estos tres vehículos se han analizado exhaustivamente los parámetros RAMS (fiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y seguridad), los cuales intervienen decisivamente en el resultado del cálculo.

En este caso particular, el usuario del equipo no es el maquinista o conductor, sino la administración o el operador ferroviario (por ejemplo, RENFE o Metro de Madrid), responsable de la adquisición de los vehículos y de su mantenimiento y operación durante toda la vida útil de éstos. La vida útil que se suele considerar para vehículos ferroviarios está entre los 25 y los 30 años.

La siguiente figura pretende ilustrar las interrelaciones entre los viajeros (cliente del cliente), la administración ferroviaria u operador (cliente), el fabricante de los trenes (suministrador del sistema) y los fabricantes de equipos integrados en el tren (suministradores de subsistemas).



Generalmente, cuando un operador se dispone a analizar la adquisición de nuevos trenes, solicita de los fabricantes oferentes el LCC como una característica técnica más a evaluar para decidir la compra. Para ello, define lo más detalladamente posible las condiciones de operación previstas para los trenes y todas aquellas que deben considerarse para realizar los cálculos. Después, dando la ponderación que estime oportuna a cada aspecto o criterio, calcula la puntuación y realiza la compra del vehículo cuya puntuación sea máxima.

Ahora bien, puesto que la compra se ha basado en parte en el compromiso del fabricante respecto a los costes de operación y mantenimiento, lo normal es que el operador realice un control de los parámetros que cuantifican dicho compromiso, y que someta al fabricante a penalizaciones en caso de que no se alcancen los parámetros prometidos. Este hecho hace que los fabricantes sean los primeros interesados en disponer de la información y de los medios que permiten obtener cálculos de LCC cada vez más rigurosos y precisos.

De hecho, en el mercado ferroviario se han creado diversas asociaciones entre fabricantes, con presencia también de algunos operadores, que pretenden establecer y normalizar los procedimientos de cálculo de LCC de trenes (por ejemplo, UNIFE, que ha propuesto un modelo consensuado entre diversos operadores, fabricantes de trenes y fabricantes de equipos ferroviarios).

Otra consecuencia de las eventuales penalizaciones por incumplimiento de los valores de LCC es que éstos pueden estar afectados de un coeficiente “conservador” (mayor que 1) que intente minimizar los riesgos de incurrir

en costes superiores a los garantizados, o de un coeficiente “comercial” (menor que 1), derivado de la decisión de arriesgar; reduciendo el coste garantizado, para mejorar las posibilidades comerciales de la propuesta. Estas dos circunstancias, aun no siendo habituales, desvirtúan lógicamente el cálculo del LCC.

Antecedentes y premisas de cálculo

Aunque ha habido algunos intentos de normalizar el cálculo del LCC, no existe ninguna convención universal que todo el mundo acepte. Sin embargo, sí parece que existe práctica unanimidad sobre los costes que se deben incluir y excluir:

La intención primera es incluir todos aquellos costes que son inherentes al vehículo y a su diseño, y excluir los costes derivados o afectados por condicionantes ajenos al diseño del vehículo.

En principio, y salvo casos particulares, se excluyen del cálculo los siguientes costes para el operador:

- **Coste de adquisición de los vehículos.**

Aunque conceptualmente debería incluirse, habitualmente se excluye porque depende de factores ajenos al tren: estrategias comerciales, tamaño de la flota, etc. Además, generalmente el precio final de la compra no se conoce hasta que finalizan las negociaciones comerciales, que son posteriores al cálculo del LCC. El coste de adquisición suele ser parecido al coste “convencional” del LCC (es decir, al final de la vida del vehículo el coste global es el doble del de adquisición).

- **Coste de eliminación de los residuos durante la operación.** Estos costes suelen depender de las exigencias normativas de cada país, de las costumbres del operador, etc. Como es variable y depende de circunstancias ajenas al tren, no se incluye en el LCC. Además, estos costes suelen ser muy similares para cualquier tren que opere en la misma línea, y no son una característica diferenciadora.

- **Coste de eliminación del residuo final.** Este coste, para vehículos nuevos, suele ser negativo, porque al final de la vida son sometidos a una rehabilitación que permite venderlos a otros operadores más pobres, generando un beneficio. Su valor depende de muchas circunstancias ajenas al vehículo, por lo que no se incluye en el LCC.

- **Coste de operación.** Este coste se excluye del cálculo del LCC porque depende principalmente del operador. Los costes de operación son, entre otros, los siguientes:

- Costes financieros de la operación de compra de la flota.

- Costes de la infraestructura (por ejemplo, compra y mantenimiento de talleres e instalaciones de mantenimiento de trenes).

- Costes de los recursos humanos necesarios para operar la flota (maquinistas, revisores, controladores, personal de oficina, plantilla de mantenimiento, etc.).

- Costes de limpieza (interior y exterior). Estos costes dependen de la estrategia comercial del operador y de la tasa horaria del personal sin cualificación (que depende del grado de desarrollo del país).

- Coste energético para la tracción de los vehículos (consumo eléctrico o de gasóleo).

Sin embargo, en ocasiones sí se incluye en el LCC el coste del consumo energético para un perfil de línea establecido a priori, puesto que esto sí depende de las características del equipo de tracción del tren. En estos casos, más que conocer el coste verdadero, se pretende penalizar el coste del vehículo que requiera mayor consumo energético, habitualmente por motivos medioambientales o políticos. En la misma línea de razonamiento, en ocasiones se incluye en el LCC un coste proporcional al peso del vehículo, para penalizar a aquellos que provoquen un desgaste excesivo en la vía.

- **Coste de modernización, rehabilitación o *refurbishment* del tren,** porque consiste principalmente en la renovación de la imagen, en mejoras de interiorismo y confort, y en otras reformas que dependen de la estrategia comercial del operador.

- **Condiciones particulares, específicas de la línea y del servicio a realizar:** reparaciones por accidentes o vandalismo, rep Perfilado de ruedas (depende fundamentalmente del estado de la vía), etc.

De lo anterior se desprende que, si se obvia el coste de adquisición del vehículo, el componente principal del LCC es el coste de mantenimiento. Este coste vendrá desglosado típicamente en un 30% de costes de materiales, un 55% de costes de mano de obra y un 15% de costes varios (estos valores son aproximados, únicamente se pretende dar una idea del reparto de costes de mantenimiento).

En algunas ocasiones, demostrando más rigor, se emplea el término LSC, *Life Support Cost* en lugar de LCC para referirse al coste calculado según lo indicado más arriba. El

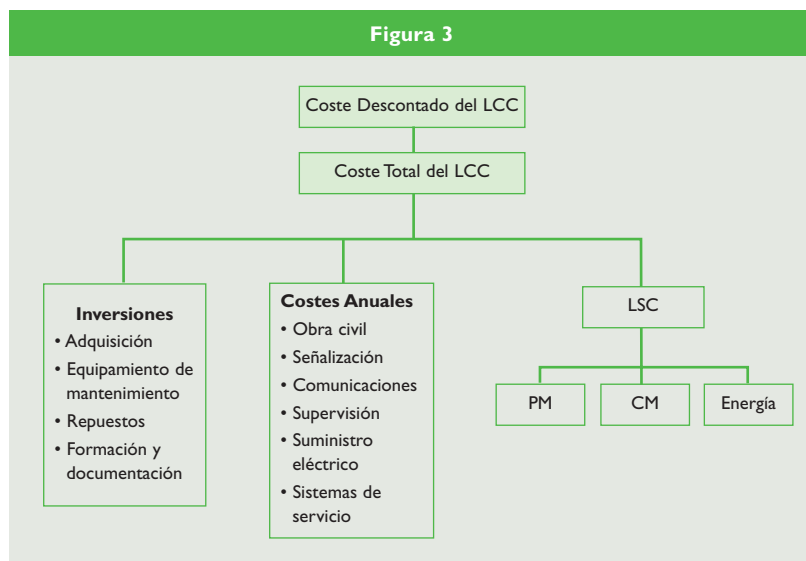
LSC, sin ningún tipo de duda y sin requerir más aclaraciones, incluye únicamente los costes por mantenimiento preventivo (PM), mantenimiento correctivo (CM) y consumos energéticos (que son los costes considerados a continuación). La figura siguiente ilustra este concepto.

En este texto, no obstante, para adaptarse a la denominación más generalizada y popular, se continúa con la expresión LCC, aunque se emplee con el significado de LSC.

Probablemente la dificultad más importante a la hora de incluir o excluir costes en el cálculo del LCC consiste en el recuento de las horas de trabajo empleadas para tareas de mantenimiento. Por un lado, para unificar criterios, es preciso fijar una tasa horaria de referencia (para que el resultado no dependa de factores empresariales, laborales, locales, etc.). Pero, aún así, surgen las siguientes dudas:

- ¿Cómo se miden las horas empleadas para el mantenimiento? ¿Se miden horas “de reloj”, horas “estándar”, tiempos netos...? ¿Se incluyen en el cálculo las horas no productivas (vacaciones, enfermedad, absentismo...)? ¿Se considera un rendimiento o eficiencia ideal (del 100%) de la mano de obra, o se toma un valor más real (rondando el 60%, habitualmente)?
- ¿Se deben incluir los costes de la parte alícuota de mano de obra indirecta? ¿Hasta qué nivel jerárquico de la plantilla se deben incluir los costes por horas de trabajo (operarios, mandos intermedios, estructura, staff, dirección, etc.)?
- La tasa horaria de referencia (coste de la mano de obra en Euros/hora por cada trabajador considerado), ¿es estrictamente el coste para la empresa de la plantilla involucrada directamente, o incluye otros costes?

La respuesta más habitual a estas cuestiones suele ser la siguiente: en el LCC se cuentan sólo las horas netas de la mano obra directa. Es decir, las horas empleadas para mantenimiento se calculan suponiendo un rendimiento del 100% de los operarios, prescindiendo de la estructura (mano de obra indirecta) y eliminando tiempos muertos, tiempos de preparación, tiempos logísticos, etc. Después de estas correcciones se obtiene un tiempo teórico “ideal”, que suele rondar el 30% del tiempo real requerido para las actividades. En ocasiones se compensa este ahorro de costes al convertir las horas



en coste económico, considerando una tasa horaria (euros/hora) muy superior a la real, para que el resultado medido en euros incluya los costes eliminados y así obtener un coste más verosímil.

En cualquier caso, para permitir comparaciones entre LCC lo principal es que se asuma un modelo de cálculo y que se haga siempre igual, según el modelo establecido.

Cálculo del LCC

Como se ha adelantado en párrafos anteriores, a continuación se simplifica identificando el LCC con los costes de mantenimiento, prescindiendo de otros costes de operación. Así, los conceptos que se suman para calcular el LCC del vehículo son los siguientes:

- Mano de obra para mantenimiento preventivo.
- Mano de obra para mantenimiento correctivo.
- Materiales para mantenimiento preventivo.
- Materiales para mantenimiento correctivo.

Nota: El mantenimiento preventivo es el realizado periódicamente, según una programación establecida, para evitar fallos, mientras que el mantenimiento correctivo tiene por objeto la reparación de los fallos que ocurran. Se prescinde en esta explicación de otros tipos de mantenimiento, que se han incluido dentro del preventivo por simplificar: predictivo, proactivo, *on condition*, RCM, TPM, etc.

Es decir, el coste total se calculará como el sumatorio de horas y materiales para preventivo y correctivo. Los costes parciales se pueden calcular para un período de tiempo determinado, o para una distancia recorrida determinada. Habitualmente se expresan en

costes anuales (euros/año) o en costes por cada 1000 km de operación (euros/1000 km), siendo el recorrido anual medio (km/año) el factor de conversión de una unidad a la otra.

La estimación de los cuatro costes parciales anteriores requiere haber diseñado antes el plan de mantenimiento preventivo programado (influencia de la mantenibilidad) y haber desarrollado un análisis de averías de todo el tren (influencia de la fiabilidad).

El coste de la actividad de mantenimiento será el sumatorio del coste de los materiales aportados y el coste de las horas empleadas. El coste de los materiales incluye el de los materiales nuevos y el de las piezas reparadas (siendo el coste de éstas el de la reparación que las dejó útiles para ser reutilizadas).

Los costes de mantenimiento preventivo se calculan como sigue:

- Se calcula el coste de cada tarea de mantenimiento preventivo (horas más materiales, según el párrafo anterior). Esto requiere disponer del plan de mantenimiento diseñado para el vehículo.
- Se multiplica el coste de cada tarea por el número de veces que se repite dicha tarea en el período considerado (cada tarea se realiza a intervalos fijos, según la programación prevista en el plan de mantenimiento preventivo).
 - Se suman los costes de cada tarea preventiva, y se obtiene el coste total por mantenimiento preventivo en el período considerado.

Los costes de mantenimiento correctivo se calculan análogamente, cambiando para cada tarea el concepto de su frecuencia fija programada por el de frecuencia de la avería que da lugar a cada tarea correctiva (según la tasa de fallos correspondiente):

- Se calcula el coste estimado, de horas y de materiales, para cada reparación (para ello, se requiere haber realizado un análisis de averías). El coste de las horas será el producto del número de horas empleadas en la tarea concreta por el precio promedio de cada hora (tasa horaria, expresada en euros/hora). El tiempo para cada tarea correctiva se suelen denominar MTTR (*Mean Time To Repair*), y suele incluir el tiempo de búsqueda de la avería, el tiempo de sustitución y/o reparación y el de pruebas posteriores.

- Se multiplica el coste de cada reparación por su frecuencia (tasa de fallos) estimada, según el análisis de fiabilidad previo.
 - Se suman los costes de cada tarea correctiva, y se obtiene el coste total por mantenimiento correctivo en el período considerado.

Lo anterior es una simplificación del proceso empleado realmente, ya que en la práctica se tienen en cuenta además los siguientes aspectos:

- El coste de los materiales requiere una estimación del porcentaje de piezas sustituidas y piezas reparadas (ya que tienen costes diferentes).
- El coste de las reparaciones realizadas en el propio taller de mantenimiento puede contabilizarse como horas de trabajo (según las horas empleadas en la reparación) o como coste de materiales (suponiendo que se ha comprado la pieza reparada por un precio equivalente a su coste de reparación). La primera opción refleja la realidad, pero la segunda permite conocer el valor real del almacén de repuestos, puesto que se asigna un valor también a las piezas reparadas disponibles en *stock*.
- En el plan de mantenimiento preventivo programado se incluyen numerosas tareas *on condition*, cuya frecuencia de realización es variable, dependiendo del resultado de una inspección realizada a frecuencia fija. Por ejemplo: "Inspección visual de los cojinetes; sustitución si el diámetro es menor de 20 mm". En estos casos, es preciso estimar la proporción de veces que se realiza la tarea que depende de la inspección programada, con respecto al número de veces que se realiza dicha inspección (por ejemplo: un 30% de las inspecciones del cojinete incluyen su sustitución o, lo que es igual, en todas las inspecciones se sustituyen el 30% de los cojinetes).
- Aunque se pretende que el resultado del LCC sea invariable e independiente de la explotación concreta, la realidad es que se deben realizar algunos ajustes en cada caso. Por ejemplo, el precio de los repuestos depende del país donde se compran. Ocurre lo mismo con la tasa horaria (coste de la hora de trabajo), que además de adaptarse a la zona donde se realice el mantenimiento debe estimarse como una media ponderada de las diversas tasas horarias según la especialidad o cualificación: peones, técnicos, soldadores, mandos intermedios, etc. Para ser rigurosos, también se debe tener en cuenta la necesidad de establecer turnos nocturnos, que

resultan más caros y con un rendimiento más bajo que los diurnos (la necesidad de turnos nocturnos viene determinada por la disponibilidad requerida por el operador y por el tiempo requerido para el mantenimiento, que a su vez depende de la mantenibilidad y de la fiabilidad del tren).

Cálculo del coste real a partir del LCC

Como ya se ha comentado, la utilidad principal del cálculo del LCC es obtener una característica técnica del tren que permita evaluarlo y compararlo con otros. Pero su resultado no indica un coste real, sino un coste teórico basado en determinadas estimaciones, convenciones y simplificaciones.

Sin embargo, una vez realizado el trabajo de calcularlo, se pueden aplicar correcciones para obtener, a partir de la estimación del LCC, la estimación del coste real de mantenimiento del tren. Estas correcciones consisten principalmente en adaptar el cálculo a una situación u operación concreta, en una línea concreta, con un operador concreto y prestando un servicio concreto.

De forma genérica y simplificada se pueden enumerar las siguientes correcciones a aplicar al LCC para obtener el coste real:

- La corrección en el término correspondiente a los materiales es sencilla: sólo consiste en aplicar un coeficiente que ajuste los precios de los materiales al lugar donde vayan a operar los vehículos y otro coeficiente correspondiente a los costes financieros del stock inmovilizado. Esta corrección, además de sencilla, suele ser pequeña en términos porcentuales (inferior al 10%).
- La corrección del término correspondiente a la mano de obra es más compleja. Se pueden enumerar los siguientes ajustes, que convierten horas netas en horas brutas o reales (mediante coeficientes que son mayores de 1 si afectan a las horas, pero que podrían ser menores de 1 si se aplican a la tasa horaria convencional asumida).
- Considerar un rendimiento o eficiencia de la plantilla inferior al 100% (habitualmente es del 60%, en estas actividades).
- Considerar el aumento de la plantilla debido a vacaciones, bajas, absentismo, etc.
- Introducir tiempos muertos antes y después de cada tarea de mantenimiento (tiempos logísticos, tiempos para movimiento de trenes, tiempos de preparación, descansos del personal, etc.).
- Incluir la mano de obra indirecta (estructura): dirección y mandos, administrativos,

almacenes y departamentos de staff (seguridad y salud, medio ambiente, calidad, ingeniería, financiero...).

En ocasiones estas correcciones ya están previstas en la tasa horaria (euros/h) que se ha fijado para el cálculo, considerando un coste de la mano de obra superior al real, para incluir los aspectos anteriores. Lógicamente, debe tenerse en cuenta esta posibilidad antes de aplicar ninguna corrección al coste de la mano de obra.

Después de realizadas las correcciones anteriores, normalmente el coste real de mantenimiento ronda el triple del LCC. Este ratio permite dimensionar aproximadamente la plantilla: se multiplican por 3 las horas del LCC en un año, y se dividen por las horas anuales que trabaja la plantilla.

Además de estas correcciones, se pueden incluir todos los términos que convencionalmente se excluyen del cálculo del LCC, como se indica en los *Antecedentes y Premisas de Cálculo*.

Deficiencias del modelo

El modelo descrito más arriba, aun siendo muy útil y a pesar de las mejoras introducidas continuamente para mejorar su cálculo, adolece de una serie de limitaciones. Se indican las principales a continuación:

- El resultado del cálculo depende de la información y los datos disponibles. Disponer de estos datos requiere experiencia con vehículos o equipos similares. Por tanto, es muy difícil estimar con algo de rigor el LCC cuando se trata de un producto único, o tan innovador que no tiene precedentes de los que obtener referencias.
- Los datos disponibles siempre se extraen en una situación (línea, servicio, operador, etc.) concreta, y deben ser extrapolados a la situación “genérica” convencional que se desea para el LCC (independiente del contexto operativo, inherente al tren).
- El LCC no permite dimensionar directamente la plantilla, sino que se requieren determinadas correcciones o ajustes, cuya exactitud es desconocida a priori.
- El LCC es una suma de los LCC parciales de cada equipo montado en el tren. Esta suma es, en mayor o menor grado, una suma heterogénea, puesto que es casi imposible uniformizar o normalizar los criterios de cálculo para todos los fabricantes de equipos.
- El resultado puede verse afectado por estrategias comerciales: los fabricantes de equipos pueden verse tentados de adaptarlo

a sus “necesidades” de vender su producto al fabricante del tren, y el fabricante del tren corre el mismo peligro para vender su producto al operador o administración.

- El LCC no suele contemplar una eventual reducción de los costes por optimización del mantenimiento. Ésta comienza a ser una limitación seria, puesto que muchos mantenedores están consiguiendo reducciones muy importantes en los costes después de pocos años de servicio, gracias a las nuevas técnicas optimización del mantenimiento (como RCM, equilibrio del mantenimiento, predictivo, etc.).

- El resultado del LCC es difícilmente fiscalizable a priori. Son la experiencia y el tiempo de explotación los que determinan la precisión del cálculo inicial. Esto requiere que los compradores se protejan con unas penalidades que, en muchos casos, obligan al fabricante a aplicar un coeficiente de seguridad (>1) para reducir el riesgo de superar el coste establecido. De cualquier modo, en ocasiones también conlleva dificultades serias fiscalizar el LCC durante la explotación, porque no fueron definidos con la suficiente precisión los términos en que fue calculado (por ejemplo, se debe definir a priori claramente cómo deben medirse las horas de mantenimiento para verificar el compromiso incluido en el LCC).

- El LCC no contempla costes medioambientales y de seguridad, aun siendo éstos dos aspectos que cada vez influyen más en la satisfacción de un operador. Un vehículo que contamina mucho, o que cuenta con pocas protecciones de seguridad para los operarios que lo operan o mantienen, debería ser penalizado incluyendo este inconveniente en el LCC.

Con todo, el cálculo del LCC es válido y útil, siempre que se conozcan sus limitaciones. Además de ser útil para el comprador (operador o administración), lo es para el fabricante, puesto que le permite tomar conciencia de muchos aspectos críticos de su producto que, hasta ahora, no se habían podido o querido cuantificar.

Conclusión

Recapitulando lo expuesto más arriba, se puede extraer la conclusión según el siguiente esquema:

- **Utilidad.** El LCC es de una utilidad manifiesta para las partes involucradas en el negocio ferroviario (operadores y administraciones, fabricantes y mantenedores de trenes, fabricantes de equipos...). Mientras que para unos es una garantía de la mantenibilidad del

tren y un criterio de evaluación de cara a su adquisición, para otros es un incentivo para la gestión de la información relativa a los costes de operación y mantenimiento (obtención, tratamiento, almacenamiento e interpretación de datos).

- **Limitaciones.** Como se ha comentado, las limitaciones son claras e importantes, pero tienen la ventaja de ser conocidas y de ser susceptibles de solución mediante la convención o establecimiento de los estándares necesarios para la “normalización” del cálculo.

- **Futuro.** A la vista del cambio de mentalidad en los últimos años, se puede prever una implantación progresiva en un futuro próximo del cálculo sistemático y metódico del LCC. La generalización de su uso permitirá ir superando las limitaciones actuales.

Actualmente, no es sencillo encontrar publicaciones realmente útiles sobre el cálculo del LCC, y es realmente difícil encontrarlas sobre el LCC de vehículos ferroviarios. Se pueden proponer las siguientes referencias, más por su interés como ejemplos de enfoques diversos que por su utilidad didáctica en relación con este texto (salvo la referencia de UNIFE, que sí es muy conveniente para este caso). ■

Bibliografía

Origami Science & Art. Proceedings of the Second International Meeting of Origami Science and Scientific Origami. Otsu, Japón; nov.-dic. 1994. Editor Koryo Miura. Seian University of Art and Design. The International Center of Arts.

www.unife.org

www.unife.org/workgroups/lcc_2.htm

www.eed.state.ak.us/facilities/publications/LCCAHandbook1999.pdf

http://interscope2.doa.state.nc.us/Guidelines/lcca/LCCA_Link.htm

www2.state.ga.us/Departments/does/procure/environ/life-cycle.pdf

<http://rac.alionscience.com/pdf/LifeCycleCostAnalysis-Process.pdf>

www.fhwa.dot.gov/infrastructure/asstmgmt/lccafact.htm

www.weibull.com/SystemRelWeb/life_cycle_cost_analyses.htm

www.cheresources.com/costzz.shtml

www.wbdg.org/design/resource.php?cn=0&rp=6

www.sandia.gov/pv/docs/LCcost.htm

Life cycle cost and good practices, de P.H. Barringer (NPR Association, 1998).

Controlar el coste de un producto: el coste del ciclo de vida, de Claude Gromand (2004).

Mantenibilidad, de J. Knezevic (1996).

Fiabilidad, mantenibilidad, efectividad: un enfoque sistémico, de Alberto Sols (2000)

“Ingeniería de Confiabilidad; Pilar Fundamental del Mantenimiento”

Medardo Yañez, Jose L. Perdomo, Hernando Gomez de la Vega

Reliability and Risk Management S.A

Teléfonos: (58) 261-7986204; (58) 416-6651073

E-mail: yanezml@reliarisk.com , perdomojk@reliarisk.com,

hagovemo@reliarisk.com

Resumen

Este trabajo se enfoca en el “Diagnóstico proactivo e integrado de equipos, procesos y/o sistemas”, como la base fundamental del mantenimiento . Se define “Diagnóstico proactivo e integrado” como un proceso que busca caracterizar el estado actual y predecir el comportamiento futuro de equipos, sistemas y/o procesos, mediante el análisis del historial de fallas, los datos de condición y datos técnicos, con la finalidad de identificar las acciones correctivas y proactivas que puedan efectivamente optimizar costos a través de la sistemática reducción de la ocurrencia de fallas y eventos no deseados, y minimizar en consecuencia, su impacto en el negocio medular.

Adicionalmente, se destaca a la Ingeniería de Confiabilidad como el marco teórico-conceptual en el que conviven las metodologías y técnicas para lograr este fin; y adicionalmente se define Confiabilidad Operacional como un proceso de mejora continua, que incorpora, en forma sistemática, avanzadas herramientas de diagnóstico, metodologías basadas en confiabilidad y el uso de nuevas tecnologías, en la búsqueda de optimizar la planificación y la toma de decisiones.

“Ingeniería de Confiabilidad; porque una de las mejores formas para agregar valor; es evitar que se destruya”^[1]

Palabras claves: Confiabilidad, Riesgo, Estimación, Costos, Diagnóstico, Optimización, Condición, Equipos, Sistemas.

1.- Modelos de Decisión en Mantenimiento

En años recientes, grandes corporaciones especialmente del sector de hidrocarburos y de la industria de procesos, han volcado su atención hacia el modelo de decisión “Costo Riesgo”, debido a que el mismo permite comparar el costo asociado a una acción de mantenimiento contra el nivel de reducción de riesgo o mejora en el desempeño debido a dicha acción.; en otras palabras, el modelo permite saber “cuanto obtengo por lo que gasto”.

El análisis “Costo-Riesgo” resulta particularmente útil para decidir en escenarios con intereses en conflicto, como el escenario “Operación – Mantenimiento”, en el cual el operador requiere que el equipo o proceso opere en forma continua para garantizar máxima producción, y simultáneamente, el mantenedor requiere que el proceso se detenga con cierta frecuencia para poder mantener y ganar confiabilidad en el mismo. El modelo Costo-Riesgo es el indicado para resolver el conflicto previamente mencionado, dado que permite determinar el nivel óptimo de riesgo y la cantidad adecuada de mantenimiento, para obtener el máximo beneficio o mínimo impacto en el negocio.[2]

La figura 1 muestra gráficamente el modelo mencionado, y en el mismo pueden destacarse tres curvas que varían en el tiempo:

- La curva del nivel de riesgo (riesgo = probabilidad de falla x consecuencia), asociado a diferentes periodos de tiempo o frecuencias de mantenimiento
- La curva de los costos de mantenimiento, en la cual se simulan los costos de diferentes frecuencias para la acción de mantenimiento propuesta

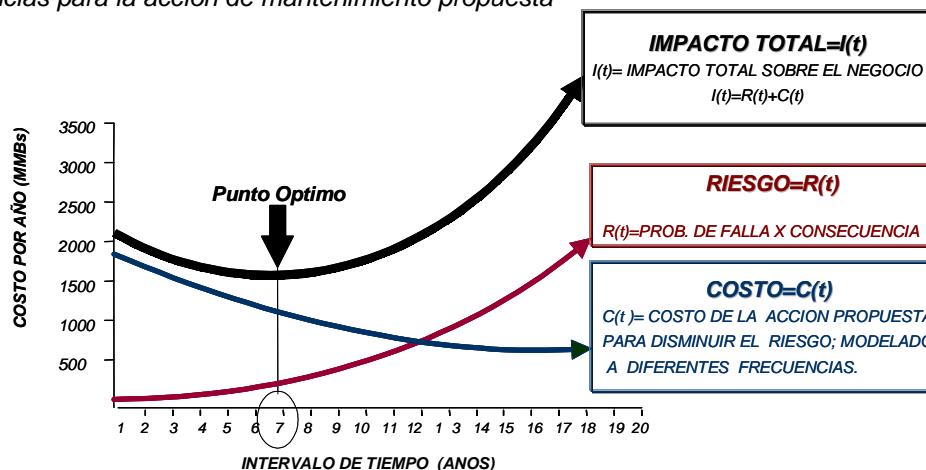


Fig. 1.- Modelo Costo Riesgo

- La curva de impacto total, que resulta de la suma punto a punto de la curva de riesgos y la curva de los costos de mantenimiento. El “mínimo” de esta curva, representa la frecuencia para la cual la suma de los costos de la política de mantenimiento con el nivel de riesgo asociado a esta política son mínimos; es decir hay el “mínimo impacto posible en el negocio” Este mínimo está ubicado sobre el valor que puede traducirse como el periodo o frecuencia óptima para la realización de la actividad de mantenimiento. Un desplazamiento hacia la derecha de este punto implicaría “asumir mucho riesgo” y un desplazamiento hacia la izquierda del mismo implicaría “gastar demasiado dinero”.

La dificultad para el uso del modelo, se centra en la estimación o modelaje de la curva del riesgo, ya que la misma requiere la estimación de la probabilidad de falla (y su variación con el tiempo), y las consecuencias. En la próxima sección, se detallan las herramientas para lograr el correcto modelaje y estimación del riesgo.

2.- Riesgo, un indicador para el Diagnóstico Integrado

El riesgo $R(t)$, base fundamental del modelo de decisión descrito en la sección anterior, es un término de naturaleza probabilística, que se define como “egresos o pérdidas probables consecuencia de la probable ocurrencia de un evento no deseado o falla”, y comúnmente se expresa en unidades monetarias, (Bs. o \$).^{[1],[3]}. Matemáticamente, el riesgo se calcula con la siguiente ecuación:

$$\text{Riesgo}(t) = \text{Probabilidad de Falla}(t) \times \text{Consecuencias}$$

El análisis de la ecuación del riesgo, permite entender el poder de este indicador para el diagnóstico y la toma de decisiones, debido a que el mismo combina probabilidades o frecuencias de fallas con consecuencias, permitiendo la comparación de unidades como los equipos rotativos, que normalmente presentan alta frecuencia de fallas con bajas consecuencias, con equipos estáticos, que normalmente presentan patrones de baja frecuencia de fallas y alta consecuencia.

La figura 2, refleja gráficamente lo expresado en el párrafo anterior

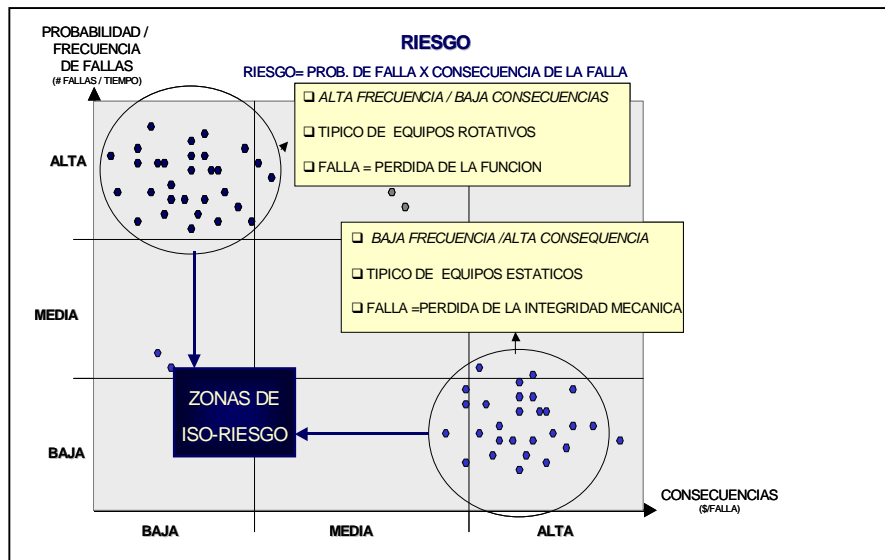


Fig 2: Gráfico Probabilidad de Falla vs. Consecuencias

El riesgo, se comporta como una balanza, que permite pesar la influencia de ambas magnitudes (Probabilidad de Falla y Consecuencia de la Falla) en una decisión particular.

El mantenimiento moderno, sustentado en la Ingeniería de Confiabilidad, requiere de un cuidadoso proceso de diagnóstico de equipos y sistemas. El diagnóstico, basado en el “riesgo”, puede entenderse entonces como un proceso que busca caracterizar el estado actual y predecir el comportamiento futuro de equipos y sistemas.

Para el logro de un diagnóstico integrado, el riesgo debe calcularse usando toda la información disponible; es decir, debe incluir el análisis del historial de fallas, los datos de condición y datos técnicos. De esta forma, se podrán identificar las acciones correctivas y proactivas que puedan efectivamente optimizar costos y minimizar su impacto en el negocio medular.

La figura 3, muestra el proceso de “Diagnóstico Integrado”



Fig. 3.- Proceso de Diagnóstico Integrado

Entendiendo entonces que el “riesgo” es el indicador para un diagnóstico integrado, se analizará a continuación en detalle, el proceso para estimarlo.

3.- Estimación de Riesgo

Como se mencionó en el punto 2, el cálculo del riesgo, involucra la estimación de la Probabilidad de Fallas y/o la Confiabilidad, ($\text{Confiabilidad} = 1 - \text{Probabilidad de Fallas}$), y de las Consecuencias. La figura 4 muestra la descomposición del indicador “riesgo” en sus componentes fundamentales. En ella se muestra claramente que para calcular riesgo, deben establecerse dos (2) vías, una para el cálculo de la confiabilidad y/o la probabilidad de fallas, en base a la historia de fallas o en base a la condición; y otra para el cálculo de las consecuencias.

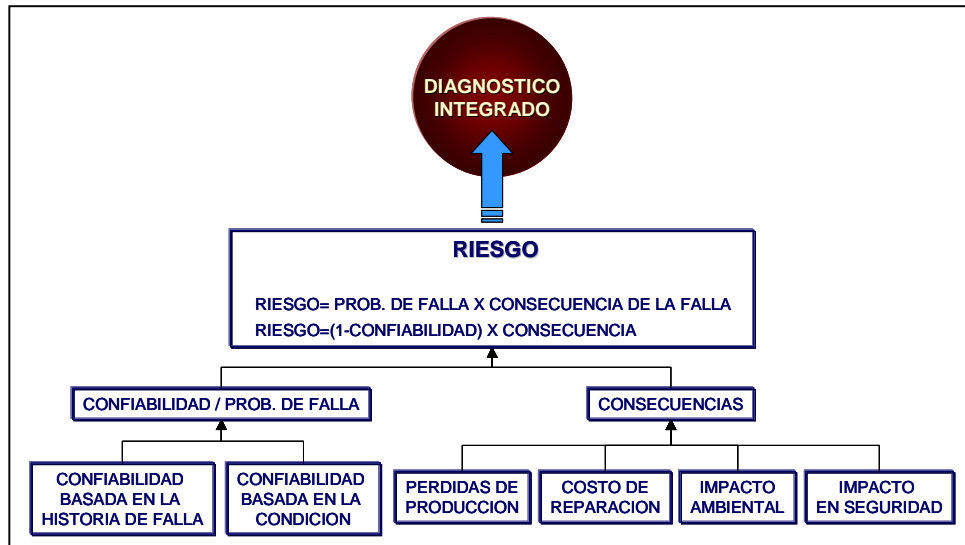


Fig. 4: Descomposición del Indicador “Riesgo”

3.1.- Estimación de la Probabilidad de Fallas y/o la Confiabilidad.

Para la estimación de la confiabilidad o la probabilidad de fallas, existen dos métodos que dependen del tipo de data disponible; estos son:

- *Estimación Basada en Datos de Condición, altamente recomendable para equipos estáticos, que presentan patrones de “baja frecuencia de fallas” y por ende no se tiene un “historial de fallas” que permita algún tipo de análisis estadístico.*
- *Estimación Basada en el Historial de Fallas: recomendable para equipos dinámicos, los cuales por su alta frecuencia de fallas, normalmente permiten el almacenamiento de un historial de fallas que hace posible el análisis estadístico.*

3.1.1.- Estimación de Confiabilidad Basada en Condición

El análisis tradicional de confiabilidad, basado en el análisis estadístico del tiempo para la falla, ha sido exitosamente utilizado para mejorar el mantenimiento preventivo y traer los equipos y sistemas hasta los actuales niveles de desempeño. Sin embargo, buscando la mejora continua de sus procesos, en las tres últimas décadas, algunas industrias han hecho grandes esfuerzos en la recolección de data diferente a la data de falla, a través de programas de monitoreo de la

condición (mantenimiento predictivo) con la finalidad de optimizar las frecuencias de mantenimiento de sus equipos y tomar acciones proactivas para evitar la ocurrencia de la falla.

La mencionada data de condición, ha sido usada principalmente en forma determinística, es decir, para hacer diagnósticos puntuales, debido a la falta de una adecuada metodología de análisis probabilística. En esta sección se establecen las bases conceptuales para el cálculo de confiabilidad y probabilidad de falla de equipos basado en la data de condición. La columna vertebral de este método es el análisis Carga-Resistencia [1].

a. Análisis Carga-Resistencia

El análisis Carga-Resistencia tiene como premisa el hecho de que las fallas son el resultado de una situación donde la carga aplicada excede la resistencia. Carga y Resistencia son usados en el sentido más amplio de la palabra; es decir, la carga pudiera ser la presión de operación, mientras la máxima presión de operación permisible sería la resistencia. Similar análisis se hace para cualquier otro parámetro relevante de la condición como vibración para equipos dinámicos, o reducción de espesor para el caso de equipos estáticos.

En todos los casos existirá un valor actual de la condición que se monitorea, el cual representará la carga, y un valor límite de la condición que representara la resistencia. Esta última normalmente esta regulada por normas y estándares de la ingeniería.

Contrario a la creencia general, en la mayoría de los casos ni la carga ni la resistencia son valores fijos, por el contrario, sus valores son estadísticamente distribuidos. Cada distribución tiene su valor medio, denotado por μ_Y para la carga y μ_X para la resistencia y sus desviaciones estándar σ_Y y σ_X respectivamente. Esto es ilustrado en la figura 5.

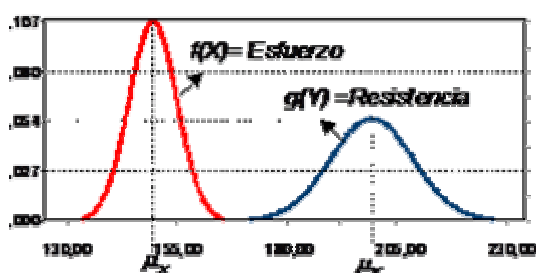


Figura 5: Distribuciones sin solapamiento

Cuando la distribución de la condición medida o monitoreada en el equipo tiene algún solape con la distribución de la condición límite o criterio de rechazo, en ese momento existe probabilidad de falla. Esta situación es mostrada en la figura 6.

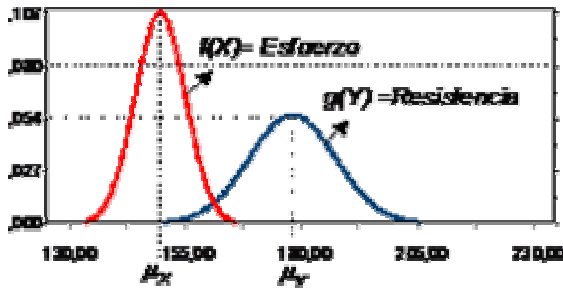


Figura 6: Distribuciones solapadas

La confiabilidad de un elemento bajo la aplicación de una carga es la probabilidad de que su resistencia exceda la carga. Dicha confiabilidad puede calcularse con la siguiente expresión:

Confiabilidad = Probabilidad (Resistencia > Carga) ^{[1],[5],[8],[9],[10]}

$$\text{Confiabilidad} = \Phi \left(\frac{\mu_Y - \mu_X}{\sqrt{\sigma_Y^2 + \sigma_X^2}} \right) \quad \text{Probabilidad de Falla: } 1 - \Phi \left(\frac{\mu_Y - \mu_X}{\sqrt{\sigma_Y^2 + \sigma_X^2}} \right)$$

Donde μ_Y y μ_X son las medias de las distribuciones de la resistencia o criterio límite y el esfuerzo o condición monitoreada respectivamente, y σ_Y y σ_X las respectivas desviaciones estándar.

NOTA: El operador “ Φ ”, indica que con el resultado obtenido de la ecuación entre paréntesis, debe buscarse el valor de probabilidad correspondiente en una tabla de la distribución normal

b. Estimación de la confiabilidad basada en la condición

Un parámetro de condición (PC) es cualquier variable física que revele información acerca de las características de desempeño de un equipo o componente. Un Parámetro Relevante de Condición (PRC) es un parámetro cuyo valor numérico caracteriza y cuantifica la condición de un equipo o componente en cualquier instante de su vida operativa.

Para que un PC sea un PRC, debe cumplir con los siguientes requisitos:

- Caracterizar la condición del equipo.
- Ajustar su valor continuamente durante su vida operativa.
- Describir numéricamente la condición del equipo o componente.

Un buen ejemplo de un PRC es el espesor de pared “E”, el cual es comúnmente usado en la industria petrolera para caracterizar el proceso de deterioro debido al fenómeno Erosión-Corrosión en tuberías en general y en algunos recipientes a presión. Otros PRC famosos en la industria del gas y del petróleo son:

- *Nivel de Vibración (Equipos Dinámicos)*
- *Partículas Metálicas disueltas en el aceite (Equipos Dinámicos)*
- *Velocidad de Declinación (Pozos y Yacimientos)*
- *Presión Estática de Fondo (Yacimientos)*

3.1.2 Predicción del Número de Fallas Basado en el Historial de Fallas

En este punto, se presenta la metodología y la plataforma matemática para predecir la disponibilidad en sistemas reparables, a través del tratamiento estadístico de su historial de fallas y reparaciones. En otras palabras, los equipos son caracterizados usando su distribución probabilística del “tiempo para fallar” y el “tiempo para reparar”.

Este tipo de análisis es particularmente valioso para equipos dinámicos, los cuales tienen una frecuencia de falla relativamente alta. Normalmente, la data de fallas y reparaciones está disponible.

Para equipos reparables existen cinco posibles estados en los que ellos pueden quedar, una vez reparados después de una falla:

1. *Tan bueno como nuevo*
2. *Tan malo como antes de fallar.*
3. *Mejor que antes de fallar pero peor que cuando estaba nuevo.*
4. *Mejor que nuevo.*
5. *Peor que antes de fallar.*

Los modelos probabilísticos tradicionalmente usados en análisis de confiabilidad, se basan en los estados 1 y 2 (estados límites), sin tomar en cuenta los estados 3, 4 y 5 a pesar de que el estado 3 es más realista en la práctica. La razón para esto radica en la dificultad de desarrollar una solución matemática para modelar este estado.^{[3],[6]}

Este trabajo muestra el modelo probabilístico desarrollado, el cual se denomina “Proceso Generalizado de Restauración” (PGR) ^{[3],[6]}. Este modelo elimina las limitaciones antes mencionadas porque toma en cuenta todos los posibles estados de un equipo después de una reparación. Esto da como resultado una nueva plataforma conceptual para análisis de confiabilidad en equipos reparables, la cual se ajusta en mayor grado a lo que sucede en la realidad, eliminando las desviaciones derivadas del uso de los análisis tradicionales, especialmente en cuanto a la predicción del número esperado de fallas y el tiempo para la próxima falla.

Formulación Matemática del PGR:

Las ecuaciones básicas del PGR tienen su base en distribuciones probabilísticas de Weibull condicionales^[3], y son las siguientes:

$$F(t_i) = 1 - e^{-\left[\left(\frac{q}{\alpha} \sum_{j=1}^{i-1} t_j \right)^\beta - \left(\frac{t_i + q \sum_{j=1}^{i-1} t_j}{\alpha} \right)^\beta \right]} \quad \text{Prob. de Falla}$$

$$C(t_i) = e^{-\left[\left(\frac{q}{\alpha} \sum_{j=1}^{i-1} t_j \right)^\beta - \left(\frac{t_i + q \sum_{j=1}^{i-1} t_j}{\alpha} \right)^\beta \right]} \quad \text{Confiabilidad}$$

A partir de estas ecuaciones básicas y de la data de fallas $[(t_i)=\text{tiempos de operación entre fallas sucesivas}]$ se calculan los parámetros “ α ”, “ β ” y “ q ”, cuyo significado es:

α : “parámetro de escala”

β : “parámetro de forma”

q : “parámetro de efectividad de la reparación”. Este parámetro puede interpretarse, según su valor, de la siguiente forma:

$q = 0$ tan bueno como nuevo

$0 < q < 1$ mejor que como estaba , pero peor que cuando era nuevo

$q = 1$ tan malo como estaba

$q < 0$ mejor que nuevo

$q > 1$ peor que como estaba

Para obtener los parámetros con este método existen dos alternativas^[3] dependiendo del momento de ejecución del análisis.

- Método de estimación de la Máxima Probabilidad de Ocurrencia (MPO), para aquellos casos en los cuales hay suficiente data disponible para el ciclo en análisis.
- Teorema de Bayes para aquellos casos en los que no hay suficiente data disponible del ciclo en análisis.

Una vez estimados los parámetros de PGR es posible predecir el **número esperado de fallas** $\Lambda(t)$, usando un proceso iterativo basado en simulación de Montecarlo [3],[6]. El diagrama de flujo para este proceso iterativo se muestra en la figura 7.

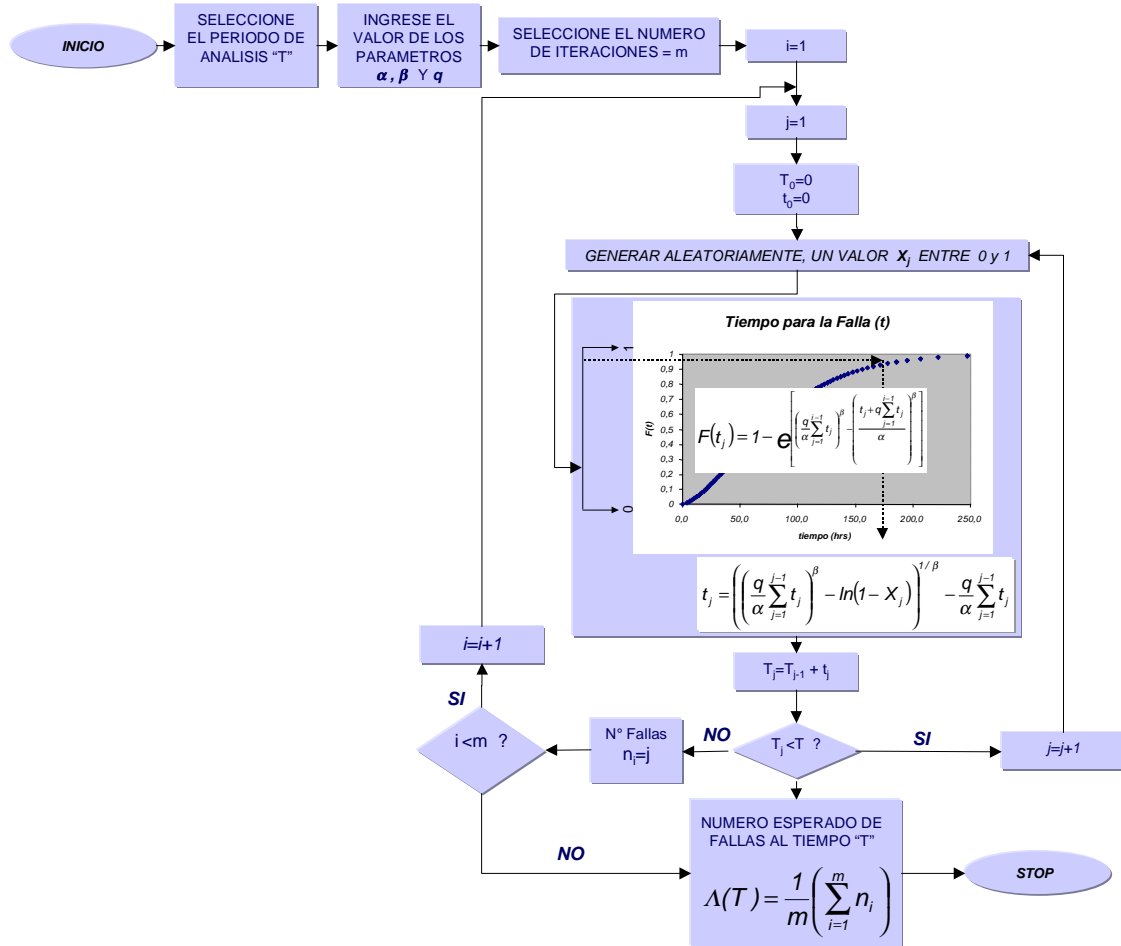


Figura 7: Diagrama de Flujo Proceso Iterativo PGR

Los resultados de las estimaciones hechas con el PGR son mucho más certeros que las predicciones tradicionales. Como puede observarse en la figura 7.1, se generaron tres líneas de predicción basados en el 25% de los datos de fallas (puntos de falla encerrados con un cuadro) usando las tres teorías de predicción del número de fallas:

- (Proceso de Renovación Ordinario, basada en la asunción de un estado “tan bueno como nuevo” después de la reparación.
- Proceso No Homogéneo de Poisson, basada en la asunción de un estado “tan malo como estaba” después de la reparación

- *Proceso Generalizado de Restauración (PGR) que considera estados intermedios.*

De las tres, solo la correspondiente al PGR coincide con gran precisión con las fallas que ocurrieron subsecuentemente.

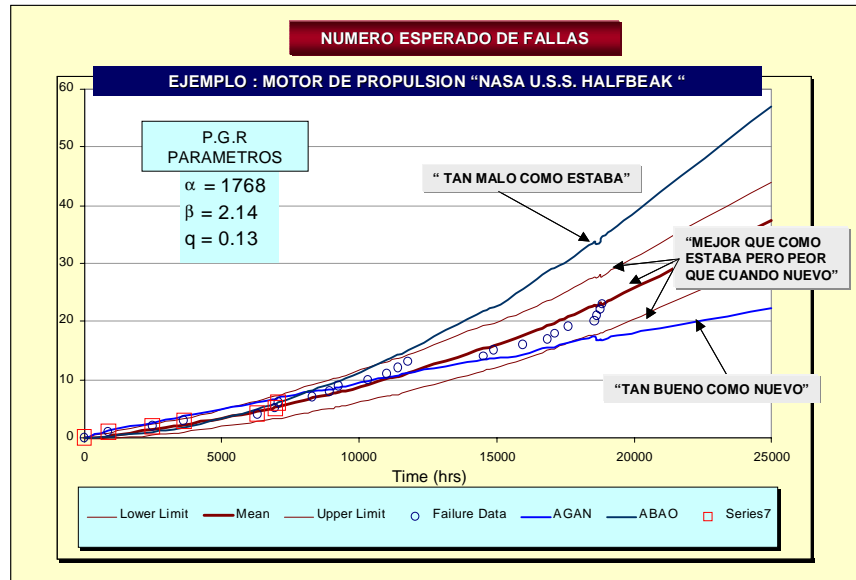


Figura 7.1: Estimación hecha usando Proceso Generalizado de Restauración

4.- Estimación de Consecuencias.

En esta sección se presenta una metodología para estimar las consecuencias totales que resultan de la falla de un equipo y/o sistema. El modelo básico que soporta el trabajo aquí propuesto es el de "Impacto Total en el Negocio" desarrollado por John Woodhouse ^[2].

Modelo Propuesto:

El modelo divide las consecuencias asociadas con una falla particular en cuatro grandes categorías: Pérdidas de producción, costos de reparación, impacto ambiental e impacto en seguridad.

a. Pérdida de Producción:

En este paso, las pérdidas de producción debido a tiempo fuera de servicio son estimadas usando la siguiente ecuación: $PERDIDA\ DE\ PRODUCCIÓN = PP * RF * TTR$

Donde PP es el precio del producto ($\$/Unid$), RF es la reducción de flujo ($Unid/Hr$) y TTR , el tiempo para reparar (Hrs). La variabilidad del costo del producto se incluye con la asunción de una distribución normal.

Reducción de flujo: La reducción puede ser total o parcial, dependiendo de otros factores tales como diseño, redundancias, cargas compartidas o stand by y/o severidad de la falla (crítica o degradación). Para representar todos los posibles valores de esta reducción se definió una distribución normal.

Tiempo de reparación: En lo que respecta al tiempo de reparación, es su valor promedio ($MTTR$) el considerado para representar la distribución de esta variable.

b. Costos de reparación: La distribución de los costos de reparación debe incluir el espectro de todos los posibles costos, los cuales varían dependiendo de la severidad de la falla. Durante los ciclos de vida (tiempo entre overhauls), estos costos tienden hacia una distribución normal.

c. Impacto Ambiental e Impacto en Seguridad: Las distribuciones de estos impactos, en la mayoría de los casos, son difíciles de construir, pues no es fácil encontrar datos y fundamentalmente requieren ser construidas en base a la opinión de expertos.

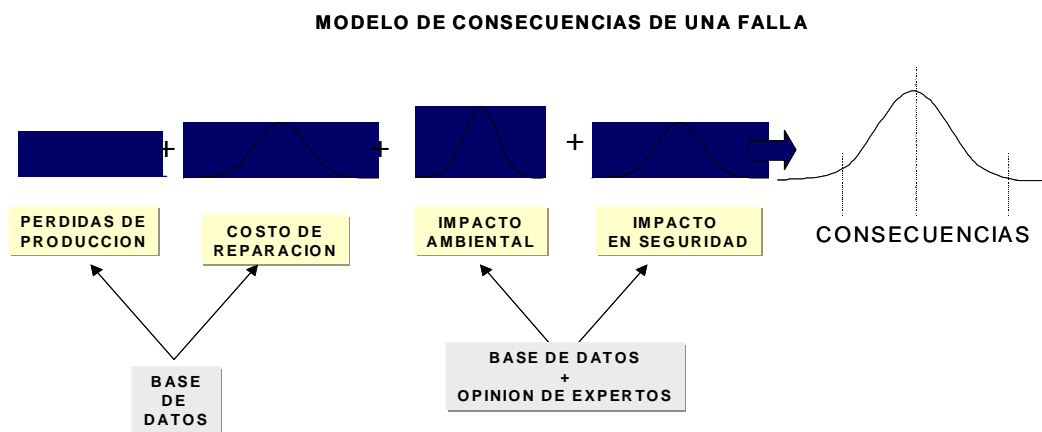


Figura 8: Modelo de consecuencias

5.- El Diagnóstico Integral en el Proceso de Confiabilidad

Como se ha estado describiendo en este trabajo, el diagnóstico integral es un proceso que implica el uso de avanzadas técnicas de cálculo para predecir fallas y eventos no deseados e inferir sus

consecuencias; es decir permite estimar el riesgo siguiendo el esquema de la figura 4 y también permite el uso de modelos de decisión como el Modelo Costo Riesgo explicado en el punto 1.

Hasta este punto, se han descrito brevemente las técnicas de la Ingeniería de Confiabilidad que permiten hacer estos cálculos.

El proceso conocido como “Confiabilidad Operacional”; es un enfoque metodológico donde el diagnóstico integrado se combina con otras metodologías tradicionales del área de confiabilidad, tales como: Análisis de Modos y Efectos de Fallas, Análisis Causa Raíz e Inspección Basada en Riesgo, entre otras; con la finalidad de:

- Inferir probabilísticamente todos los escenarios de producción factibles, a través de la predicción de los periodos de operación normal y de ocurrencia de eventos o escenarios no deseados, basados la configuración de los sistemas, la confiabilidad de sus componentes y la filosofía de mantenimiento
- Identificar acciones concretas para minimizar y/o mitigar la ocurrencia de estas fallas o eventos no deseados y llevar el riesgo a niveles tolerables
- Explorar las implicaciones económicas de cada escenario de riesgo posible y diseñar planes y estrategias óptimas para el manejo del negocio.

La figura 9, muestra el esquema de integración del Diagnostico Integrado con otras metodologías en el enfoque de Confiabilidad Operacional.

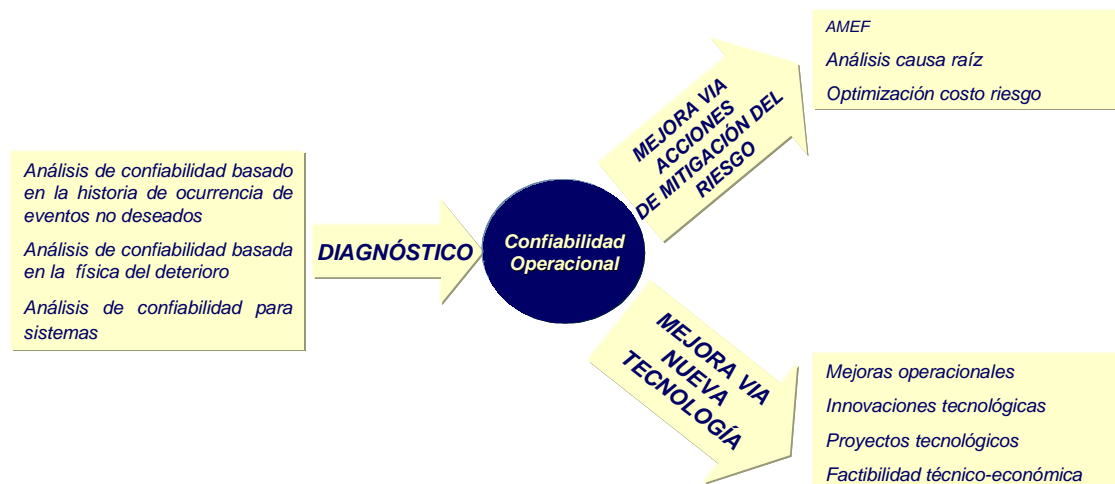


Figura 9: Confiabilidad Operacional “Sinergia de Metodologías”

Conclusiones

1. *La metodología de diagnóstico propuesta, basada en la estimación del riesgo, integra herramientas reconocidas de la Ingeniería de Confiabilidad, en una sola plataforma que permite:*
 - *Realizar diagnósticos integrales sustentados en toda la información disponible de un equipo (data histórica, data de condición y data técnica).*
 - *Hacer seguimiento al estatus de confiabilidad y riesgo de los equipos, subsistemas y sistemas con la finalidad de tomar las decisiones correctas en el momento adecuado.*
 - *Comparar el costo asociado a una acción de mantenimiento contra el nivel de reducción de riesgo o mejora en el desempeño alcanzado debido a dicha acción.*
2. *El Proceso Generalizado de Restauración (PGR) usando simulación de Montecarlo para obtener el número esperado de fallas, representa una excelente herramienta para hacer predicciones de fallas en sistemas reparables. Los resultados obtenidos con esta herramienta son más reales que aquellos obtenidos con los métodos tradicionales basados en la asunciones “tan bueno como nuevo” y “tan malo como antes de fallar”. Este punto tiene gran potencial de aplicación en el área presupuestaria.*
3. *El método propuesto para el cálculo de confiabilidad basado en datos de monitoreo del deterioro o “datos de condición”, ofrece un método alternativo al tradicional método basado en la “historia de fallas”; que resulta particularmente útil para equipos y sistemas con tasas de falla muy bajas; tales como los equipos estáticos y provee además, una vía para incluir estas confiabilidades en los modelos generales de plantas y sistemas; fortaleciendo los criterios para el diseño de políticas y estrategias de mantenimiento a las instalaciones.*

Lecciones aprendidas

1. *“Generalmente, no existen problemas complejos con soluciones sencillas”. El análisis de confiabilidad y riesgo en las instalaciones de procesos no es un problema sencillo, por ende, requiere de herramientas y metodologías de cálculo con complejidad acorde a la complejidad del problema. El uso de indicadores de confiabilidad sustentados en simplificaciones para dar mayor practicidad a su uso, con mucha frecuencia conduce a estimaciones y predicciones alejadas de la realidad, con el respectivo impacto en el negocio.*

2. *El proceso de diagnóstico de equipos, sistemas y/o procesos es una etapa de vital importancia en la mejora de la confiabilidad operacional, debido a que permite identificar las acciones proactivas que puedan efectivamente optimizar los costos y minimizar el impacto de los mismos en el negocio medular.*
3. *La ingeniería de Confiabilidad es una herramienta poderosísima para agregar valor a una empresa o proceso productivo; ya que una de las formas mas importantes de agregar valor, es evitar que se destruya.*

REFERENCIAS

1. Yañez, Medardo – Gómez de la Vega, Hernando, Valbuena Genebelin, *Ingeniería de Confiabilidad y Análisis Probabilístico de Riesgo* – ISBN 980-12-0116-9 - Junio 2003
2. Woodhouse, John, *“Managing Industrial Risk”*, Chapman and Hall, Oxford, UK, 1993.
3. Yañez, Medardo - Joglar, Fancisco - Modarres Mohammad, *Generalized Renewal Process for analysis of Repairable Systems with limited failure experience* – *Reliability Engineering and System Safety Analysis Journal* – ELSVIER – USA 2002
4. Yanez, Medardo – Gómez de la Vega, Hernando, Valbuena Genebelin, *Gerencia de la Incertidumbre* – ISBN 980-12-0115-0 - Marzo 2003
5. Roush M.; Webb W., *“Applied Reliability Engineering”*, vol I, The Center for Reliability Engineering, University of Maryland. College Park. 1999.
6. Kritsov, Vasily. *“A Monte Carlo Approach to Modeling and Estimation of the Generalized Renewal Process in Repairable System Reliability Analysis”*. Dissertation For The Degree of Doctor of Philosophy, University of Maryland, 2000.
7. Meeker, William Q.; Escobar Luis A., *“Statistical Methods For Reliability Data”*. Jhon Wiley & Sons, New York, 1998. Ahsmmed, M. *“Probabilistic Estimation of Remaining Life of a Pipeline in the Presence of Active Corrosion Defects”* *“International Journal of Pressure Vessels and Piping.”* Vol. 75, 1998: 321-329.
8. Ascher, H.; Feingold, H., *“Repairable Systems Reliability: Modeling and Inference, Misconception and Their Causes”*, Marcel Dekker, NY, 1984. ASM Metals Handbook, 13, 624, ASM Metals Park, Ohio, 1981.
9. Ebeling, Charles E. *“An Introduction To Reliability And Maintainability Engineering”*. McGraw Hill. New York, 1997.
10. Modarres, Mohammad; Kaminsky, Mark; Kritsov, Vasily. *“Reliability Engineering And Risk Analysis”*. Marcel Dekker, New York, 1999.

Los Autores:

MSc. Medardo Yañez

Formación Académica

1. Ingeniero Mecánico. Universidad del Táchira

Diciembre 1990

2. Post-Grado en Ingeniería de Confiabilidad

University of Maryland - USA

Cohorte Julio 2000

Título: MSc Ingeniería Confiabilidad

3. PhD TP- Ingeniería de Confiabilidad y Análisis Probabilístico del Riesgo (actualmente preparando disertación para Diciembre 2003. University of Maryland - USA

Durante una brillante trayectoria de 12 años de servicios en la Industria Petrolera Venezolana, ha pasado por una variedad de actividades operacionales, de servicios, de mantenimiento y planificación que le han permitido conformar una amplia visión sobre el negocio, aunado a la formación de un perfil como asesor en mejoramiento de los aspectos medulares de las actividades de producción . Es autor de numerosas publicaciones técnicas en el área de Ingeniería de Confiabilidad y Gerencia del Riesgo, publicadas por la Universidad de Maryland (University of Maryland), NACE, SPE y por el Journal "Reliability Engineering and System Safety". Es autor, junto al Profesor Mohammed Modarres de la Universidad de Maryland, de la teoría para equipos reparables conocida como "Proceso Generalizado de Restauración". En el año 2002 publicó junto a H. Gomez de la Vega y Genebelín Valbuena, los libros "Gerencia de la Incertidumbre", y "Ingeniería de Confiabilidad ya Análisis Probabilístico de Riesgo" que se han convertido en los textos referencia y guía de este tipo de análisis en le industria del gas y del petróleo en Venezuela.

Posee vasta experiencia como asesor de proyectos en áreas como Análisis RAM, Análisis de Sistemas (Modelaje de Plantas y Procesos), Gerencia de la Confiabilidad de redes de Tuberías (Oleoductos y Gasductos) y es instructor en las áreas de reingeniería de procesos, mantenimiento centrado en confiabilidad, ingeniería de confiabilidad, análisis probabilístico del riesgo y gerencia de la incertidumbre. Se desempeña como Profesor de Postgrado de Ingeniería de Confiabilidad en la Universidad Simón Bolívar y es miembro permanente del Centro para Estudios de Confiabilidad y Riesgo de la Universidad de Maryland – USA En el año 2002 fue galardonado con el "Premio a la Excelencia" que entrega el Centro Internacional de Educación y Desarrollo (CIED) de Petróleos de Venezuela.

MSc. Hernando Gómez de la Vega

Formación Académica

1. Ingeniero Mecánico. Universidad del Táchira

Diciembre 1990

2. Post-Grado en Ingeniería de Confiabilidad

University of Maryland – USA

Cohorte Julio 2000

Título: MSc Ingeniería Confiabilidad

3. Doctorado en Ingeniería de Confiabilidad y Análisis Probabilístico del Riesgo

(actualmente preparando disertación para Diciembre 2003. University of Maryland - USA)

Aspectos Resaltantes

Actualmente está desarrollando la tesis de doctorado para obtener el título de Doctor of Philosophy en la Universidad de Maryland. Cuenta con 12 años de experiencia en el área de planificación y ejecución de mantenimiento predictivo, preventivo y correctivo de equipos estáticos y dinámicos en refinerías de petróleo. También se ha desempeñado en posiciones supervisorias en trabajos de reparaciones generales de plantas de procesos, incluyendo trabajos de reparación de muelles y estructuras civiles en general. Adicionalmente, tiene conocimientos en el área de administración y mantenimiento de flotas de vehículos para transporte de carga.

Es autor de varias publicaciones técnicas en el área de confiabilidad, y actualmente se desempeña como profesor de postgrado en la Universidad Simón Bolívar en el área de confiabilidad en instalaciones industriales. Su experiencia le ha permitido desarrollar proyectos de mejora de los niveles de confiabilidad y optimización de procesos en base a técnicas como análisis costo-riesgo-beneficio y análisis Probabilístico de riesgo.

En el año 2002 publicó junto a M. Yañez y Genebelín Valbuena, los libros “Gerencia de la Incertidumbre”, y “Ingeniería de Confiabilidad ya Análisis Probabilístico de Riesgo” que se han convertido en los textos referencia y guía de este tipo de análisis en la industria del gas y del petróleo en Venezuela.

Ha desarrollado y dictado cursos en el área de ingeniería de confiabilidad, centrando su especialización en el área de análisis de sistemas. Adicionalmente ha participado en cursos y asesorías en el área de jerarquización de portafolios de inversiones en base a riesgo, análisis probabilístico de riesgo y gerencia de incertidumbre.

MAINTENANCE COST PREDITION MODEL FOR RAILWAY VEHICLE

Hyun-Kyu Jun¹, Jae-Hoon Kim², Jun-Seo Park³

¹Department of Vehicle Track Research, Korea Railroad Research Institute, 360-1 Woram-dong, Uiwang-city, Gyeonggi-do 437-757, KOREA, hkjun@krri.re.kr

²Department of Railway Environment Research, Korea Railroad Research Institute, 360-1 Woram-dong, Uiwang-city, Gyeonggi-do 437-757, KOREA, lapin95@krri.re.kr

³Department of Railway Environment Research, Korea Railroad Research Institute, 360-1 Woram-dong, Uiwang-city, Gyeonggi-do 437-757, KOREA, jspark@krri.re.kr

ABSTRACT

Estimation of maintenance and operation cost of a long-term life product through whole life cycle is one of the most important things to choose a solution among series of alternatives in railway operating company. In this paper, a life cycle cost, LCC, model for calculating maintenance cost for urban railway vehicle was developed. For this purpose, maintenance scenarios for simulating maintenance actions at a railway depot and workshop were defined and LCC models for each maintenance actions were developed. Database sheets for corrective and preventive maintenance tasks were developed to collect required data for LCC calculation. Maintenance cost of an auxiliary power supply system of urban railway vehicle was predicted as a case study by using the model. From the results, we knew that preventive maintenance, PM, cost is much higher than the corrective maintenance, CM, cost because the PM task consists of daily, monthly, and maintenance tasks which require lots of labor work. We expect that this model could help railway operating companies to make more effective maintenance strategies by considering the cost element in decision.

KEY WORDS:

Life cycle cost, preventive maintenance, corrective maintenance, urban railway vehicle

INTRODUCTION

Estimation of total life cycle cost of a long-term life product is essential to choose a solution among series of alternatives (Kjellsson, V., 1993). Maintenance and operation costs generally account for more than half of total LCC depends on system characteristics (Barringer, H.P., 1996). Therefore it is very important to estimate future maintenance cost when we try to find a more environment friendly maintenance strategy by incorporating various options. For this reason, railway operating companies have been focused on estimating the maintenance and operation cost rather than the acquisition cost (Stern, J., 1993, Endo, T., 2001).

Prediction of maintenance cost is very complicated works because it is closely connected with maintenance strategy (IEC, 2004). Maintenance strategy should be set to fulfill system performance requirements, represented by reliability, availability, maintainability and safety, before doing LCC estimation. The international standard for life cycle costing for electrical machines was developed by International Electrotechnical Commission (IEC, 2004). They guided to calculate LCC through each life cycle phases such as concept and definition, design and development, manufacturing, installation, operation and maintenance and disposal. More detailed model for calculating maintenance cost was proposed by the union of the European

railway industries, UNIFE (UNIFE, 1997). The model was developed for the railway operating company to calculate the acquisition cost, ownership cost and disposal cost of a total railway system. But the model did not consider the cost required during design, development, manufacturing and installation phase deeply, because the railway operating company did not interest in system development. Therefore, total costs for purchasing the system was simply considered as the acquisition cost. On the other hands, the model for calculating maintenance cost was well defined.

In this paper, a life cycle cost model for predicting maintenance cost for urban railway vehicle was developed. For this purpose, maintenance scenarios for simulating maintenance actions at a railway depot and workshop were defined and LCC models for each maintenance actions were developed. Database sheets for corrective and preventive actions were developed to collect required data consistently. The model was tested by predicting maintenance cost of an auxiliary power supply system of urban railway vehicle for whole life cycle.

LCC MODELING FOR MAINTENANCE ACTION

General process

The life cycle costing process begin with defining the problem to be modeled (Kawauchi, Y., 1999). Life cycle cost modeling is

highly dependent on the scope and objectives of a model. The definition of scope covers the system characteristics such as system availability, safety, and integrity level. And operational requirements and maintenance strategies should be developed before developing LCC model (Barringer, H.P., 1997).

Cost elements which represent the individual costs should be defined systematically to avoid ignoring significant cost element. Development of a cost breakdown structure of a model is a well known method to identify cost elements. It presents a breakdown of costs incurred over the major phases of the life cycle of a product. And the product or work breakdown structure is composed of a detailed breakdown of hardware, service and data identifying all major tasks and supporting work package. After defining the cost elements, we have to put relationships among them in system modeling stage. The relationships should be modeled from many viewpoints such as availability, maintainability, logistics, risk and human error etc.

Since the accuracy of input data is crucial to improve the certainty of LCC analysis. A great effort should be given to prepare a set of data. A set of data for LCC analysis can be collected through surveys or questionnaires, target research, statistics, cost reports, historical database, contracts and cost proposal et al. When actual data is not available, it may be estimated by applying stochastic, parametric or analogous techniques.

To make a long-term financial plan, a cost profile over the whole life cycle is the key information. A cost profile of each design case should be compared with a common basis or reference point, when we make financial judgments. A cost profile should be developed by considering the effect of inflation, interest rate, and exchange rates, taxation etc. In the evaluation stage, sensitivity analyses should be performed to identify high cost contributors. And uncertainties in input data should be considered.

Life cycle costing is an iterative work to find the most desirable alternatives. The iterative work means that a baseline system, which is an initial design concept, maybe improved throughout the iterative LCC analysis.

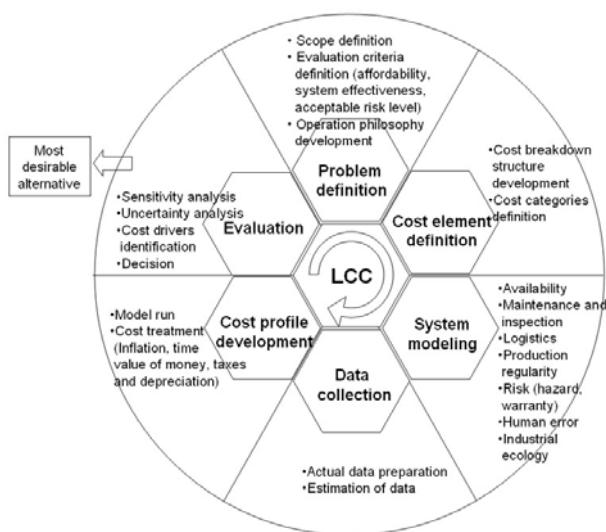


Fig. 1 A typical life cycle cost modeling process

Maintenance action scenario

Maintenance organizations are very project specific, it means that they can be very different according to their maintenance strategy. Therefore we need to make a model for general maintenance organization with proper maintenance action scenarios. Generally, maintenance actions can be classified into light maintenance action, heavy maintenance action and component repair. Light maintenance action is consisted of visual inspection, lubrication, oil change and clearance check up et al. and heavy maintenance action is consisted of mid-life overhaul, extensive modification. Component repair is for repairing work of a faulted component after replacing it with a spare part.

Fig. 2 shows the typical workshop organization in railway industry. The 1st maintenance action is performed on a line to repair faulted component. But physically it is hard to do repairing on a line, because the faulted train should be moved aside for next train running. Therefore the depot is the first place where maintenance action is performed in field. The 2nd line workshop is consisted of depot and heavy maintenance workshop. Usually light maintenance action is performed at a depot and heavy maintenance action is performed at a workshop.

Maintenance action can be classified into preventive and corrective action. The preventive action consists of periodic maintenance actions such as daily (ex. every day before a train departs from a depot), monthly (ex. every 3 months) and early (ex. every 2 and 4 years). The frequency of preventive maintenance action is easy to predict and its scenario can be easily drawn by assuming the maintenance tasks are occurred periodically following the maintenance schedule. The corrective maintenance action is performed after a failure of a component. The frequency of corrective maintenance action is hard to predict because it happens randomly. It is calculated based on the failure mode and failure rate. Generally, the failure rate is defined as the number of occurrence during 1Mh of train running.

Maintenance costs are heavily depends on the man hour cost. It needs to distinguish where the maintenance action is happened because the unit man hour cost is different. Generally maintenance actions at a depot and light workshop are performed by the railway operating company. But in contrary, maintenance actions at heavy workshop and component workshop are outsourced. But it depends on specific project organization. Therefore if the man hour costs are different each other, then we should apply them differently in calculating maintenance cost. The least unit of maintenance action was assumed to be performed on line replaceable unit, LRU and shop replaceable unit, SRU.

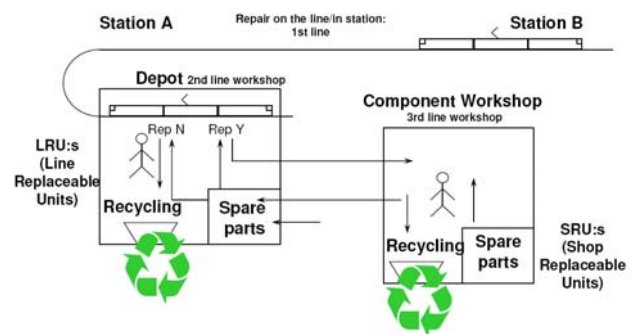


Fig. 2 Typical workshop organization for railway vehicle maintenance

If we consider that a train-set arrive at a depot or workshop and scheduled maintenance action is performed on a LRU and its maintenance action is consisted of cleaning, lubricating, overhauling and replacement, then we can calculate the labor cost and material cost as following; Since the cleaning and lubricating tasks require only manual labor work with a bit of consumable and the cost of consumable assumes negligible, we only consider the labor cost in calculating maintenance cost for cleaning and lubricating tasks. The overhauling task consists of replacement of the LRU with a spare part and disassembly, adjustment, reassembly and check-up et al. If there needs to exchange some parts during the overhauling, we should include the part costs with consumable cost in calculating material cost. Otherwise, we consider only the labor cost for replacement, overhaul, check up works et al. The replacement task consists of replacement and repair of the LRU according to the reparability. If the LRU is not repairable, both labor and material costs are considered in calculating maintenance cost. But if the LRU is repairable, only labor cost is considered. And the labor cost includes total man-hour for replacement and repair of the LRU. Now we can sum up all the costs to calculate the total maintenance cost of a LRU.

LCC modeling

Based on the maintenance action scenarios, LCC model for urban railway vehicle have been developing by the authors (Jun, H.K., 2007). Total maintenance cost can be estimated by summing the preventive and corrective maintenance costs. The PM cost includes labor and material cost. The labor cost for each PM action, $C_{(PM)labor}$ is calculated as following

$$C_{(PM)labor} = no_{tr} \cdot no_{part} \cdot no_{action} \cdot mmh_{PM} \cdot uc_{mh} \quad (1)$$

The no_{tr} is the number of train-sets in a fleet and the no_{part} is the number of PM parts in a train-set. The no_{action} is the number of PM actions on each part in a year. Since the PM is performed daily, monthly and yearly and their tasks are different by the type of PM tasks, their tasks and parts should be checked carefully to count the frequency of PM action correctly. The mmh_{PM} is required maintenance man-hour for each PM action including diagnosis, replacement, adjustment, and check-up et al. The uc_{mh} is the unit man-hour cost.

The material cost for PM action, $C_{(PM)material}$ of each item is calculated as following

$$C_{(PM)material} = no_{tr} \cdot no_{part} \cdot no_{action} \cdot c_{(PM)con} \quad (2)$$

The $c_{(PM)con}$ is the mean consumable cost for each PM action for each item. Sometimes the consumable costs calculation on every item is not possible, so the fraction of purchase price of the item to be maintained is simply calculated.

The CM cost includes labor and material cost. Also, it includes consequential cost due to the loss of production of capability including costs for compensation and loss of income, but it is highly dependent on the system characteristics, therefore we are not consider that in this model. The labor cost for each CM action, $C_{(CM)labor}$ is calculated as following

$$C_{(CM)labor} = no_{tr} \cdot no_{part} \cdot \lambda \cdot \{ (mmh_{CM} + mttr_{(CM)shop}) \cdot uc_{mh} \} \cdot t_{pow} \cdot t_{lc} \quad (3)$$

The λ is the failure rate(no/Mh) of a part and the mmh_{CM} is required man hour for each CM action. The $mttr_{(CM)shop}$ is the mean time for repair of the failure part at shop. The $mttr_{(CM)shop}$ includes fault localization time, repair and check-out time including tests and technical waiting time. The t_{pow} is the total yearly operated time and t_{lc} is the life cycle. Therefore if we multiply the λ , t_{pow} and t_{lc} , then we can get the frequency of failure during the whole life cycle. The λ is assumed to be constant during the whole life cycle, it means the failure occurs periodically with same interval.

The material cost for CM action, $C_{(CM)mat}$ of each item is calculated as following

$$C_{(CM)mat} = no_{tr} \cdot no_{part} \cdot \lambda \cdot r_{ex} \cdot (c_{(CM)con} + c_{(CM)spare}) \cdot t_{pow} \cdot t_{lc} \quad (4)$$

The r_{ex} is the fraction rate of repairing. If the value is calculated as 1, it means all failures are repaired by part exchange. If it is calculated as 0, it means that CM action is completed without the need of part exchange. The $c_{(CM)con}$ is the mean consumable cost for each CM action for each item and the $c_{(CM)spare}$ is the spare part cost. The spare part cost is calculated as the same price at purchase, in case that the item is not repairable. But if the item is repairable, the spare part cost should be recalculated by the fraction rate.

A cost profile over life cycle is the key information in considering a long term financial planning. A cost profile can be developed by running the cost model considering the effect of inflation, interest rate, exchange rate and taxation et al. Since the life cycle cost analysis considers the costs that will be incurred some time in future, it is necessary to discount or escalate all revenues to a specific decision point.

$$NPV = \sum_{n=0}^t C_m (1+x)^{-n} \quad (5)$$

The NPV is the net present value on future cash flow and C_m is the total maintenance cost including PM and CM costs in the n -th year. The n is the specific year in the life cycle costing period and the x is the discount or escalation rate. The t is the length of the time period under consideration.

Database sheet

Collecting reliable data is the basic step of calculating life cycle cost of a system. The data consists of RAM and cost information. The RAM data such as failure rate, mean time to restore can be hardly defined, it can only be estimated from physical measurement, long term experience, engineering sense et al. Therefore it is very important to collect reliable data by giving consistent data format to the manufacturing and operating company.

Table 1 shows the database sheet for collect RAM and cost data. The sheet was designed to have compatibility with the scheme from IEC and UNIFE. The database sheet form UNIFE was modified by applying the scenario defined in this paper.

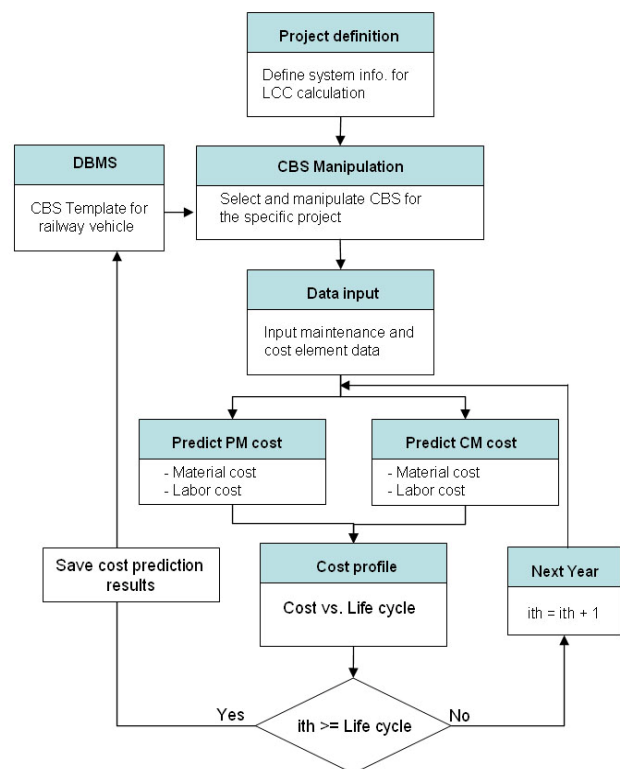
The PM database sheet consists of ID No, Item description, Quantity, Step No, Maintenance action code, Maintenance task, Spare parts and cost, Interval and unit, Material cost, 1st and 2nd line personnel and man hour, 3rd line personnel and man hour, Skill level, Notes. The ID No identifies a component by giving 6

[illegible]

The CM database sheet also consists of ID No, Item description, Quantity, Failure modes, Maintenance task, Spare parts and cost, Failure rate, Repairable, 1st and 2nd line material cost, 3rd line material cost, 1st and 2nd personnel and man hour, 3rd personnel and man hour, Skill level, Notes.

The calculation of LCC on a whole railway vehicle is a tedious work because it needs repeated calculation on whole components and whole life cycle. For this reason, many LCC calculation software were developed elsewhere. But most of them are based on MS Excel, therefore it is hard to manipulate if there are a lot of data to handle such as a total railway system.

product breakdown structure of the auxiliary power supply system.



To predict the maintenance cost of an auxiliary power supply system of urban railway vehicle, general cost elements are defined as Table 2. The man hour cost is calculated by dividing the average salary of engineer by their work hours (20 days per month \times 8 hours per day). One train-set is assumed to be consisted of 10 cars. It means that we should count 10 times to count the number of component in a train-set. But it depends on where the component is used. Yearly operation distance is assumed as 130,000 *km/year* based on the record from the train operation company. Life cycle of a train-set is defined as 25 years following the urban railway safety law. Fig. 4 shows the

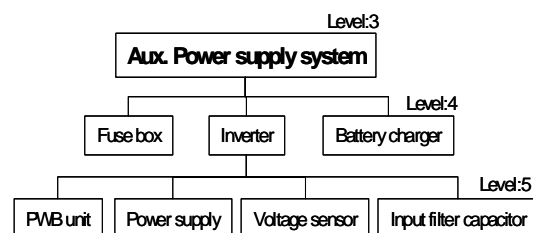


Fig. 4 Product breakdown structure of the auxiliary power supply system

All the data required to calculate maintenance cost was collected from reference research, field experience and railway vehicle manufacturing and operating company. Table 3 and 4 are typical example of maintenance and cost information for calculating preventive and corrective maintenance cost. 21 sets of maintenance and cost information were defined to calculate PM costs and 67 sets were defined to calculate CM costs.

LCC prediction was performed with the model defined in Section 2. Table 5 shows the predicted life cycle cost of the auxiliary power supply system for 25 years of ownership. We know that PM cost is much higher than the CM cost. And the labor cost is much higher than the material cost in PM, because the PM tasks are consisted of light maintenance works such as visual inspection, lubrication, cleaning, fitting et al which require only labor work. In contrary, the material cost is much higher than labor cost in CM, because the CM tasks are consisted of repairing works which require lots of spare part and consumable.

Therefore if a railway company tries to reduce the total LCC then they need to try on reducing the labor cost in PM and the material cost in CM

Table 2 General cost element for urban railway

Man hour cost	9,375 Won
Number of train-set	1
Operation distance	130,000 km/year
Life cycle	25 years
Powered time per year	5,200 hours

Table 3 Typical example of cost information for preventive maintenance action

ID No	171241
Item description	Auxiliary power supply(DDPU-106)
Quantity	3
Step No.	3C 171241 01
Maintenance action code	1N
Maintenance task	Overhaul
Spare part	Power supply(DDPU-106)
Interval	3 years
Spare part cost	52,500 won
1 st , 2 nd line mat. cost	52,500 won
1 st , 2 nd line personnel and man hour	1 personnel × 0.8 man hour
Skill level	Skilled electrical engineer

Table 4 Typical example of cost information for corrective maintenance action

ID No	171241
Item description	Auxiliary power supply(DDPU-106)
Quantity	3
Failure mode	Fail to supply power
Maintenance task	Multiple SIV unit fitted Battery change over circuit fitted
Spare part	Power supply(DDPU-106)
Failure rate	4.02 failure/Mh
Repairable(Y/N)	N
Spare part cost	52,500 won
1 st , 2 nd line mat. cost	52,500 won

1 st , 2 nd line personnel and man hour	1 personnel × 0.8 man hour
Skill level	Skilled electrical engineer

Table 5 Predicted life cycle cost for auxiliary power supply system for 25 years of ownership

Category	PM cost (won)	CM cost (won)
Labor cost	60,953,063	96,327
Material cost	1,323,000	2,198,280
Total cost	62,276,063	2,294,608

CONCLUSION

In this paper, a life cycle cost model for predicting maintenance cost for urban railway was developed. For this purpose, maintenance scenarios for simulating maintenance actions at railway depot and workshop were defined and LCC models for each maintenance actions were developed. Database sheets for corrective and preventive actions were developed to collect required field data for LCC calculation. Maintenance cost of the auxiliary power supply system of urban railway vehicle was predicted by using the model. The PM cost is much higher than the CM cost because of repeated daily and monthly maintenance task which require mainly labor work. We expect that this model could help railway operating company to make more effective maintenance strategies by considering the cost element in decision.

REFERENCES

- Barringer, H.P., and Weber, D. P., 1996, "Life cycle cost tutorial", in Fifth International Conf. on Process Plant Reliability, pp. 3-1 - 3-58.
- Barringer, H.P., 1997, "Life cycle cost & reliability for process equipment", 8th Annual Energy Week Conf. & Exhibition, pp. 1-22.
- Endo, T., 2001, "Life cycle engineering of rolling stock", ECP Newsletter, pp. CA-1-CA-7.
- International Electrotechnical Commission, 2004, "Life cycle costing," International standard 60300-3-3.
- Jun, H.K., and Kim, J.H., 2007, "Life cycle cost modeling for railway vehicle", in 2007 International Conf. on Electrical Machines and Systems, pp. 1989-1994.
- Kjellson, V., 1993, "From X2000 to Crusaris Regina : Development of LCC technology", World Congress on Railroad Research, pp. 1-7.
- Kawauchi, Y., and Rausand, M., 1999, "Life cycle cost analysis in oil and chemical process industries", <http://www.ntnu.no/ross/reports/lcc.pdf>.
- Stern, J., 1993, "Life cycle cost : A method for reducing costs and improving railway vehicles", in World Congress on Railroad Research.
- UNIFE LCC group, 1997, "Guidelines for life cycle cost", Union of European Railway Industry.

New Approaches to the Life Cycle Costs Philosophy of the Railway Vehicles

A. Danek^{a,1} and M. Richtar^{a,2}

^a Institute of Transport, VSB – Technical University of Ostrava
17. listopadu 15, Ostrava – Poruba, 708 33, Czech republic

Abstract: This paper deals with the topical problems of the Life Cycle Costs in connection with the railways vehicles. The Life Cycle Costs (LCC) philosophy has already entered the third decade. This philosophy contributed towards the new relationship's comprehension between railway vehicle producers' and railway vehicle users' sphere. This leads together to the technical-economical solution convenient for the both sides.

Low operational costs could be reached using a well-designed and structured maintenance program. This is due to the proper technical analysis of critical components that leads to low costs of maintenance and a superior reliability without increasing the capital investment.

UNIFE (Union of Railway Industry) contributed towards the practical usage of the LCC philosophy in the railway vehicles manufacturers and user sphere.

This paper presents both topical experiences with the LCC models for the railways vehicles and also procedures during Life Cycle Costs calculations.

In conclusion the authors present their own experiences with the UNIFE LCC modules in the terms of railway operation in the Czech Republic and also a date structure essential for the module work.

Key Words: Life Cycle costs; Fail-safe; Railway vehicles; Reliability; Maintenance; Failure rate

¹E-mail: alouis.danek@vsb.cz, URL: www.id.vsb.cz

²E-mail: michal.richtar@vsb.cz, URL: www.id.vsb.cz

1 Introduction

The Life Cycle Costs (LCC) philosophy has already entered the third decade. This philosophy contributed towards the new relationship's comprehension between railway vehicle producers' and railway vehicle users' sphere. This leads together to the technical-economical solution convenient for the both sides.

Low operational costs could be reached using a well-designed and structured maintenance program. This is due to the proper technical analysis of critical components that leads to low costs of maintenance and a superior reliability without increasing the capital investment.

2 Calculation of Life Cycle Costs - LCC

All costs entries for final life cycle costs calculation must be identified and defined. Typical LCC model works with purchase costs, generating costs, maintenance costs and with other important customer costs e.g. documentation, education and so on.

Typical costs are:

- purchase costs
- investment in workroom equipment
- investment in spare parts investment in documentation
- investment in education
- investment in documentation

3 Optimization of contributions and costs in fail-safe specification

With high requirements to fail-safe of object we must increase costs for development and production. High fail-safe of object faces to low operating and maintenance costs. Consequently, beneficial optimization of requirements to fail-safe for minimization of whole vehicle life cycle is made.

3.1 Object Life Cycle Costs optimization

In connection with modern opinion for vehicle (RCM) is evident [2], that important parts of railway vehicles has exponential probability distribution of failures. Every distribution is described by one parameter – failure rate λ . One parameter λ_C for whole vehicle is important for description of above mentioned optimization.

Along observation dependence of production costs to fail-safe, enclosures are written below:

- even object designed without fail-safe need some costs and has some undefined fail-safe

- with requirements to fail-safe development and generating costs increased
- development and production of object with extreme high fail-safe needs extreme high costs

Total costs C_S for development, purchase and maintenance of object are expressed:

$$C_S = C_P + C_{PM} + C_{RM} \quad (1)$$

C_P – development costs,
 C_{RM} – repair maintenance costs,
 C_{PM} – preventive maintenance costs

3.2 Development and purchase costs C_P

Development and purchase costs depend on failure rate are:

$$C_P = f(\lambda) \quad (2)$$

Function $f(\lambda)$ is determined by used technologies and a number of produced vehicles, and other specific factors. For example, when the vehicle is designed with low fail-safe, it has failure rate λ_0 and costs H_0 as well. For half failure rate the development costs must be minimal doubly.

Therefore the following development and purchasing costs are assumed:

$$C_P = \frac{H_0}{\lambda} \quad (3)$$

For vehicle with zero failure rate development costs tend to infinity.

3.3 Preventive maintenance costs C_{PM}

Vehicle with zero failure rate has zero preventive maintenance costs, otherwise for $\lambda = \lambda_0$ costs will be $k \cdot \lambda_0$ (maximal). In half failure rate we have also half costs, and C_{PM} will be:

$$C_{PM} = k \cdot \lambda_0 \cdot \frac{\lambda}{\lambda_0} = k \cdot \lambda \quad (4)$$

Therefore, total summary life cycle costs (described as a function of failure rate) are:

$$C_S(\lambda) = \frac{H_0}{\lambda} + k \cdot \lambda + A + A \cdot \beta \lambda \quad (5)$$

Solving the extremal problem, we get optimal failure rate (λ_{opt}). It follows from the formula above:

$$\begin{aligned} \frac{dC_s(\lambda)}{d\lambda} &= -\frac{H_0}{\lambda^2} + k + A\beta & \frac{H_0}{\lambda^2} &= k + A\beta \\ \lambda_{\text{opt}} &= \sqrt{\frac{H_0}{k + A\beta}} \end{aligned} \quad (6)$$

This is optimal failure rate (λ_{opt}) for whole life cycle of vehicle (figure 1.).

3.4 Repair maintenance costs C_{RM}

Repair maintenance costs C_{RM} following formula expectably described:

$$C_{\text{RM}} = A \cdot e^{\beta\lambda} \quad (7)$$

This costs can be detected only in operate vehicle, but according to contemporary knowledge formula (4) can be used.

Exponent β is small ($\beta \ll 1$), thus Maclaurin's serie may be calculated to $e^{\beta\lambda}$:

$$C_{\text{RM}} = A \cdot \left(1 + \frac{\beta\lambda}{1!} + \frac{\beta\lambda^2}{2!} + \dots\right) \quad (8)$$

As a consequence of equality, we state the following result:

$$C_{\text{RM}} = A + A\beta\lambda \quad (9)$$

4. Calculation for new vehicles

Now we try to do the general calculation with specifications for tenders to new vehicles.

Failure rate is ranged from 6 to 10 failures on 1000000 km (stopping fault; $t_{\text{stop}} > 15$ min).

For 1000000 km: $\lambda_{\text{opt}} \in (6; 10)$.

Repair maintenace costs and preventive maintenance costs are usually presented together. Therefore, summation $k + A\beta$ is $0,3 \cdot 10^6$ € to 1000000 km (thi is 300 € to 1000 km – ordinary required value). For $\lambda_{\text{opt}} = 10$ we can calculate value H_0 [€/1000000 km].

$$10 = \frac{H_0}{3 \cdot 10^5} \Rightarrow H_0 = 30 \cdot 10^6 \text{ €} / 1000000 \text{ km}$$

Costs at 30000000 € are very high, but this calculation corresponded with designed covered dist during life 1000000 km.

Fundamental part of this costs is the generating costs. Therefore, producer must decide, which part must be used for design and development, and which part of costs must be used for production. Important aspects of decision process are ranged of production set and potential production for other customers.

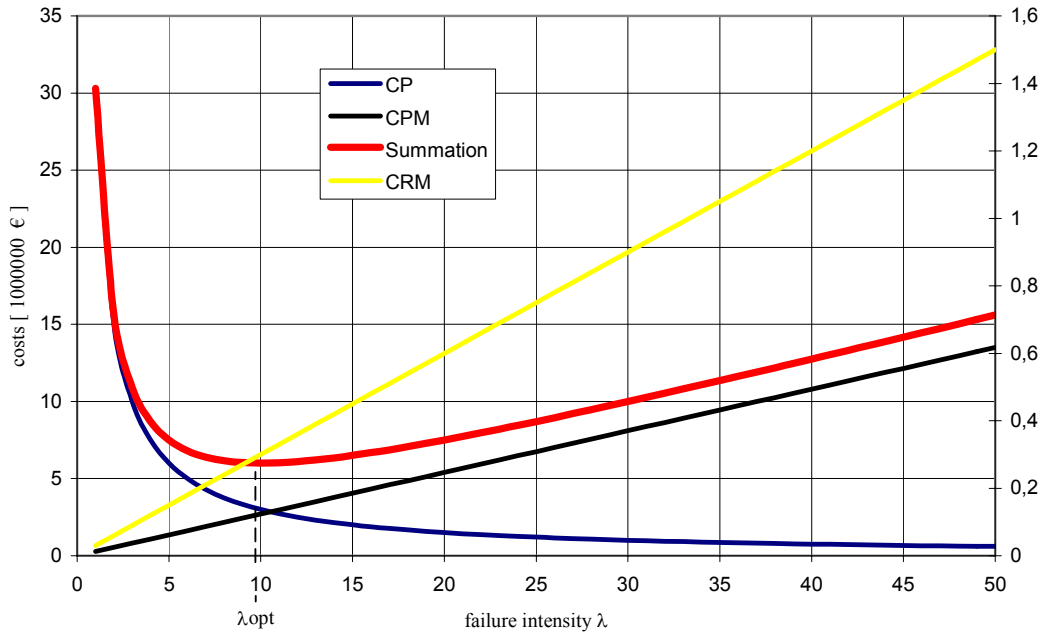


Figure 1: Total life cycle costs and λ_{opt}

5. UNIFE Initiative

UNIFE (Union of Railway Industry) contributed towards the practical usage of the LCC philosophy in the railway vehicles manufacturers and user sphere. UNIFE in CITM commission create working group for RAMS.

Basic structure of software LCC model from UNIFE is described at figure 2.

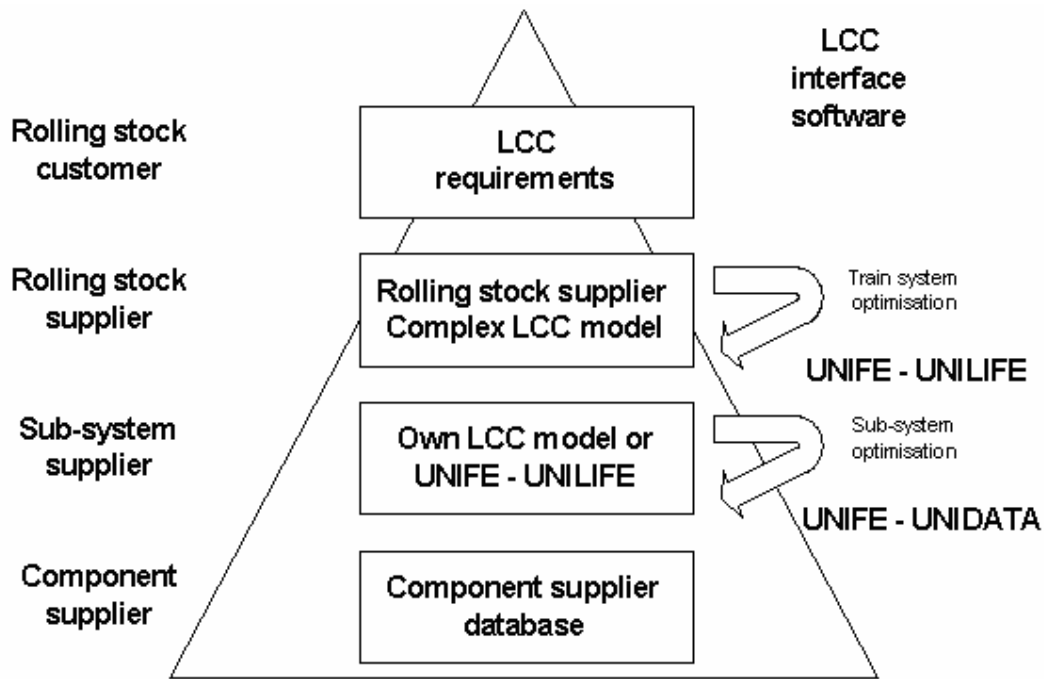


Figure 2: UNIFE – UNIDATA LCC model

6. Module UNIFE LCC

Basic components are two modules, module *Unidata.xls* and *Unilife.xls*. In *Unidata.xls* module are collected data for life cycle costs calculations.

Really life cycle costs are calculated in module *Unilife.xls* (figure 3).

Necessary conditions and expectations for justification:

- for using intervals and costs are needed system of preventive maintenance
- data of inherent reliability from suppliers and from own databases are needed

Next important part is economical shell to maintenance processes.

UNIFE-UNILIFE

Revision 0
LCC Calculation Result

Revision Date 10.12.2000

Project: UNIFE test proj
Sub-syst. Supplier: Example: Electric co.
Equipment: UNIFE test system

Global data	Value	Unit
Original manhour cost	35	DEM/h
Number of trains/plants/lines	15	No
Mean production	320 000	km/y
Discount rate	4%	Percentage
Life cycle	25	years
Revenue operating time (info)	0	h
Operating time this system	4 000	h
Covered dist during life	8 000 000	km
PM Type	Source data PM	

Investments	Value	Unit
Aquisition Cost	5 000 000	DEM
Maintenance equipment	0	DEM
Spare parts	50 000	DEM
Training	2 000	DEM
Documentation	2 000	DEM
Misc. Inv 1	0	DEM
Misc Inv 2.	0	DEM
Sum Investments	5 054 000	DEM

Yearly costs	Total cost	Discounted cost	Unit
Spec on Misc worksh	62 500	39 055	DEM
Sum yearly costs	62 500	39 055	DEM

LSC (all trains)	Total cost	Discounted cost	Unit
Energy cost	100 000	62 488	DEM
PM	37 973	23 728	DEM
CM	30 120	18 821	DEM
Failure penalty	12 000	7 499	DEM
Sum LSC	180 093	112 537	DEM

Sum LCC (all trains)	5 296 593	5 205 592	DEM
----------------------	-----------	-----------	-----

Reliability Analysis (per train)	Failure rate	Description	F/R Unit (FPMKM, H, FPMH, FIT)
Fault cat 1	0,01	Example: Stopping fault >10 min	FPMKM
Fault cat 2	0	Example: Unpl Workshop visit	FPMKM
Fault cat 3	0,195	Example: The rest	FPMKM
Fault cat 4	0		0 FPMKM
Fault cat 5	0		0 FPMKM
Fault cat 6	0		0 FPMKM
Fault cat 7	0		0 FPMKM
Fault cat 8	0		0 FPMKM
Fault cat 9	0		0 FPMKM
Fault cat 10	0		0 FPMKM
Sum Failure Rate (per train)	0,2		FPMKM

Figure 3: LCC calculations in unilife.xls module

The most of this procedures are successfully using in Institute of Transport, VSB – Technical University of Ostrava, and our experiences are offered by authors to specialists community .

7 References

- [1] Batisse, F.: Les marchés de réhabilitation du matériel ferroviaire. Le Rail, No.67, Février/Mars 1998
- [2] Moubray J. : RCM – Reliability Centered Maintenance, ISBN 07506 33581
- [3] Stern, J.: Life cycle costing of railway vehicles. European Railway Review, June, 1996
- [4] Strauss, P.: Das modulare 4-Phasen-Modell für Life-Cycle Cost der Deutschen Bahn. Eisenbahningenieur 11/99
- [5] Voegeli, H.: Lebenszykluskosten von Schienenfahrzeugen. Eisenbahn-Revue,3/1997
- [6] www.unife.org

PROPUESTA DE UN MODELO MATEMÁTICO DE OPTIMIZACIÓN DE COSTOS EN MANTENIMIENTO PREVENTIVO

Adolfo Alcalá
CULTCA

RESUMEN

Este trabajo de investigación, de carácter básico y aplicado, se sustenta en una amplia indagación a nivel universitario, pesquisas previas y vivencias gerenciales en varias instituciones, se plantea como objetivo elaborar una Propuesta de un Modelo Matemático de Optimización de Costos en Mantenimiento Preventivo. El desarrollo de la deducción matemática de un modelo de esta categoría es bastante complicado, entre otros factores, por sus implicaciones probabilísticas; para hacer este proceso más comprensible al lector, en esta indagación se consideraron, fundamentalmente, los niveles óptimos de los costos de mantenimiento, con lo cual se logró obtener una fórmula, ecuación o modelo matemático sencillo, que fue utilizado en la resolución de un problema de optimización. Una relación matemática, como la que se presenta, pudiera ser de utilidad para ingenieros y técnicos, involucrados en las funciones de planificación, programación y puesta en práctica del mantenimiento industrial; así como también para economistas, administradores y planificadores interesados en investigar aspectos relacionados con la reducción de los costos del mantenimiento preventivo.

Palabras Claves: Modelos; mantenimiento; costos de mantenimiento.

ABSTRACT

PROPOSAL OF A MATHEMATICAL MODEL TO REDUCE COSTS OF PREVENTIVE MAINTENANCE

This research of a basic and applied character, is supported by a deep investigation at universities, previous inquiries and managerial experiences at several institutions; the objective is to design a Proposal of a Mathematical Model to reduce costs of Preventive Maintenance. Such mathematical model deduction is enough complex, among other factors, due to its probabilistic implications; with the purpose to make this process more comprehensible to readers, in this research were considered optimum levels of maintenance costs, this make possible to get a formula, equation or a simple mathematical model. A mathematical relationship like this one, may be useful to planning, programming and industrial maintenance, also to economists, managers and planners interested to research aspects related to reduce costs of preventive maintenance.

Key Words: models – preventive maintenance – maintenance costs

INTRODUCCIÓN

La actual situación inflacionaria por la que atraviesa Venezuela y los problemas que dicho fenómeno económico ha ocasionado en buena parte de los asuntos nacionales, han servido como factores de cambio en lo que se refiere a nuestra tradicional manera de pensar y actuar con respecto a la utilización de un conjunto de bienes que, de una u otra forma, nos prestan algún servicio. Ahora somos más ahorrativos, conservamos durante un tiempo mayor los objetos que nos pertenecen y hemos empezado a comprender, aunque con mucha lentitud, *la importancia del mantenimiento de edificios, instalaciones, equipos y sistemas*.

Los conocimientos básicos relacionados con la calidad y costos y sus aplicaciones en el diseño, construcción y puesta en funcionamiento de edificios, instalaciones y máquinas, han dejado de ser materia tratada por científicos e investigadores y se han convertido en herramientas de trabajo rutinario de ingenieros, economistas, administradores, gerentes y técnicos, cuyas funciones están comprendidas en el área de la ciencia del mantenimiento. De igual manera, *muchos usuarios ya están familiarizados con los conceptos y definiciones de calidad, disponibilidad, confiabilidad, efectividad y costos de mantenimiento*.

El presente escrito tiene como finalidad diseñar la propuesta de un modelo matemático para determinar el nivel óptimo de costos de mantenimiento preventivo en cualquier sistema, instalación o equipo, y que, además, sirva como instrumento eficaz para ingenieros, gerentes y técnicos, entre otros

especialistas, en sus actividades de planificación y praxis del mantenimiento industrial.

Este trabajo de indagación, que concluyó con la elaboración del modelo en referencia, puede enmarcarse en lo que se conoce como *investigación pura, básica o fundamental*; que, aunque se realizó en un contexto teórico, *el interés del investigador se centró en el diseño de una herramienta de trabajo, fundamentada, entre otros aspectos, en su experiencia como facilitador del aprendizaje y como gerente; teniendo siempre presente que dicho instrumento pueda, a su vez, ser utilizado por el ingeniero para resolver de inmediato situaciones y problemas concretos de la realidad del quehacer rutinario de la praxis del mantenimiento preventivo*. A tal efecto, y a manera de ejemplo, se resolvió un problema de aplicación con lo cual se determinó el número de veces al año que habrá de prestarle servicio de mantenimiento a un equipo para que el costo total de los servicios correspondientes sea mínimo (óptimo). *Es oportuno y pertinente aclarar que con el modelo en referencia no se pretende afirmar que el mismo sea el único ya que es una propuesta matemática aproximada susceptible de mejorar o de reemplazar por otro modelo de mayor exactitud.*

La metodología utilizada se fundamentó en la realización de las siguientes actividades: (1) Concepción de la situación problema a investigar. (2) Elaboración del plan de trabajo. (3) Búsqueda de información pertinente, (teórica y práctica), esencialmente en lo que respecta a los siguientes tópicos: (a) Modelos (b) Mantenimiento (c) Costos de Mantenimiento y (d) Optimización (4) Manejo y selección de la información (5) Proceso de elaboración del modelo matemático (6) Revisión exhaustiva del modelo (7) Problema de aplicación (8) Formulación de conclusiones (9) Elaboración del informe final de la investigación.

ASPECTOS TEÓRICOS, CONCEPTUALES Y DEFINITORIOS

Definición General de Mantenimiento

Conjunto de acciones oportunas, continuas y permanentes dirigidas a prever y asegurar el funcionamiento normal, la eficiencia y la buena apariencia de sistemas, edificios, equipos y accesorios (Alcalá, 1998).

Clasificación del Mantenimiento

(a) *Mantenimiento Correctivo*: Es el mantenimiento realizado en forma planificada y programada para restablecer un bien a sus condiciones normales de servicio u operación en la oportunidad inmediata posterior a la ocurrencia de la falla (Fiscalía General de Mantenimiento, 1980).

(b) *Mantenimiento Preventivo*: Es un conjunto de actividades, planificadas y programadas, aplicadas a los equipos, con la finalidad de reducir al mínimo la ocurrencia de fallas (Alcalá, ob.cit).

ACTIVIDADES MÁS IMPORTANTES DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO

- Planificación
- Programación
- Inspección
- Coordinación

- Reparación
- Limpieza
- Ajuste
- Lubricación
- Reemplazo
- Calibración
- Control.

OBJETIVO DE LA PROGRAMACIÓN

Asegurar con anticipación los servicios de personas, materiales y equipos de mantenimiento para apoyar, en forma efectiva, las actividades productivas de la empresa.

*CLASIFICACIÓN DE LOS PROGRAMAS DE
MANTENIMIENTO*

- De visitas
- De inspecciones
- De pruebas y rutinas
- De reparación.

EQUIPOS

- Conjunto de herramientas, instrumentos, accesorios y aparatos especiales con los que se pueden realizar trabajos.

- Grupo de personas, científicos, ingenieros, técnicos u obreros especializados organizados para realizar una investigación, trabajo o servicio determinado.

(c) *Mantenimiento Predictivo*: Es el mantenimiento que, de una manera planificada y programada, se aplica a los bienes por lo general sin desarmarlos, en función de sus condiciones reales de operación. (Fiscalía General de Mantenimiento. Ob.cit).

Rutina

(a) Costumbre inveterada, hábito adquirido en hacer las cosas guiándose por la experiencia y sin previo razonamiento. (Visor, 1999).

(b) Con relación al mantenimiento, podemos decir que: las rutinas son actividades normales típicas de cualquier clase de mantenimiento (preventivo, correctivo, predictivo) en las que hay que realizar ciertos trabajos o tareas, dentro de los intervalos de tiempo establecidos. (Alcalá, 2000).

(c) Las rutinas de mantenimiento se inician con una orden de trabajo y la ejecución de las mismas, no deben afectar los procesos de producción de servicios de las empresas. (Ídem).

(d) *Servicios Rutinarios*: Se llaman servicios rutinarios, aplicados a un equipo, aquellos trabajos que son necesarios realizar en él para garantizar su buen funcionamiento. Ejemplos: lubricación, limpieza, ajustes, pintura, desinfección, chequeo, etc.

(e) *Nivel de Servicios Rutinarios*: Número de veces que al equipo se le proporcionan los servicios rutinarios.

Nivel Óptimo de Servicios

Es la frecuencia de los servicios de mantenimiento prestados a un equipo de manera tal que su costo total sea mínimo.

Cuando hablamos de *Frecuencia* nos referimos al número de veces que se repite una actividad de mantenimiento, aplicada a un equipo, por unidad de tiempo.

Al referirnos a *Servicios de Mantenimiento* queremos expresar un conjunto de actividades realizadas por la gerencia de mantenimiento de una empresa (Planta Industrial, Hospital, Universidad) encaminadas a garantizar el buen funcionamiento de sistemas, equipos, instalaciones y edificios.

Óptimo: significa sumamente bueno; que no puede ser mejor (Visor, 1999).

Nivel: Grado alcanzado en un parámetro con respecto al punto de referencia. (Visor, ob.cit.).

Costo:

- Gasto (valorado a precio actual) en bienes y servicios, previsto u originado en la producción de un bien económico (Ídem).
- Cantidad que se da o se paga por algo. (Diccionario de la Real Academia Española de la Lengua 2001).

Costo de Mantenimiento Preventivo: Es el costo de cada uno de los trabajos ejecutados en el equipo, por concepto de mantenimiento preventivo.

Costo por Paro de Servicios: Costo ocasionado por la pérdida de producción de bienes o de servicios, debido a una falla inesperada del equipo.

Costo Total: Es la suma de los costos de mantenimiento preventivo y los ocasionados por las interrupciones de los servicios que presta un equipo, el cual incluye los costos por concepto de su mantenimiento correctivo.

A continuación presentamos un gráfico en el que se muestra el costo total del mantenimiento de un equipo.

Según muestra la Figura Nº 1, la curva del costo por fallas nos da a entender que: a menor número de trabajos los costos son mayores, porque esto supone, fallas de mayor complejidad. El costo de realizar mantenimiento preventivo, se representa por una recta que nos indica que: a mayor número de trabajos, los costos son más altos, lo cual se puede explicar, por la complejidad de las reparaciones; debido esto, entre otros factores, a la vejez del equipo.

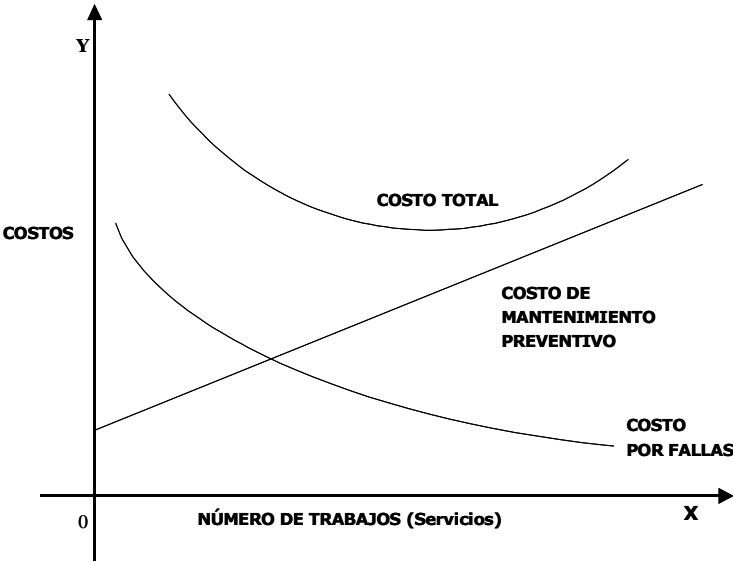


Figura Nº 1. Costo Total del Mantenimiento de un Equipo.
Nota: Autor (2004).

El costo total, está representado por una curva que nos enseña que los costos por trabajos de reparaciones, (mano de obra), son altos cuando la periodicidad de los servicios correspondientes es menor; a medida que aumenta, existe un costo mínimo y luego, cuando continúa aumentando la frecuencia de dichos trabajos, aumentan los costos. En lo posible, el gerente de mantenimiento debe cambiar el equipo cuando, a partir del costo mínimo, comienza el aumento de los costos de operación del mismo; pero es necesario analizar previamente, los costos totales que van a originarse por garantizar el servicio, el desmontaje y la instalación del nuevo equipo.

En la siguiente página presentamos un gráfico en el que puede apreciarse el nivel de mantenimiento que minimiza el costo total.

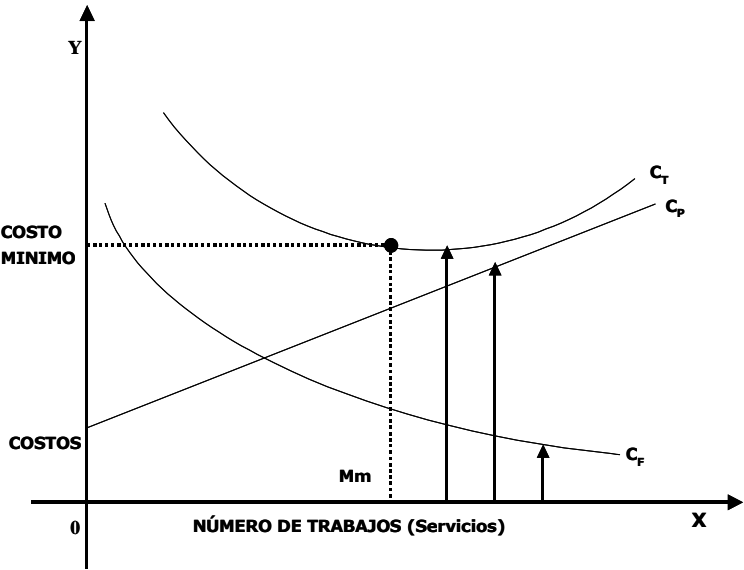


Figura Nº 2. Nivel de Mantenimiento que Minimiza el Costo Total
Nota: Autor (2004).

Modelos

a) Generalidades

Uno de los objetivos de mayor relevancia que intentan lograr los científicos, consiste en explicar en forma clara y satisfactoria los fenómenos que han decidido indagar. Como el trabajo del hombre de ciencia suele ser muy difícil ya que con mucha frecuencia se debe enfrentar a problemas por lo general bastantes complejos, eso determina, entre otras cosas, que para poder darle respuesta a hechos no previstos y algunas veces no observables se ve en la urgente necesidad de utilizar hipótesis, conceptos, definiciones y principios teóricos.

Es necesario que los modelos formales se representen de manera tal que con ellos sea posible dar a conocer tanto la teoría que intenta representar como el

referirla a hechos concretos. Todo modelo formal se formula como un modelo matemático, por medio de ecuaciones que expresen las correspondientes relaciones cuantitativas.

b) Modelo Científico:

Puede definirse expresando que es un instrumento ideal utilizado para demostrar, de manera lógica y simplificada, la solidez y veracidad de cualquier teoría. Lo anterior induce a dar por cierto que: una teoría científica es consistente si está fundamentada en un modelo.

c) Modelos Matemático:

Para efectos de la presente investigación se consideran sólo modelos matemáticos, los cuales están incluidos en los llamados modelos formales, entendiéndose por éstos, las representaciones de estructuras idealizadas (sistemas o teorías) que se suponen semejantes a los que se conocen como sistemas reales.

Los modelos formales permiten abstraer la forma lógica de los modelos concretos (físicos), lográndose de esta manera, suficiente generalidad. Así, actúa el científico: combinando conocimientos y criterios y dándole configuración lógica a un conjunto de fenómenos, sucesos, leyes y postulados mediante construcciones apropiadas, establece teorías, las cuales por lo general, sirven para dar explicaciones razonables, complejas, rigurosas y extensas a los problemas objeto de estudio. Quien hace ciencia, relaciona hipótesis, leyes y teorías a través de los modelos científicos; éstos, pueden conceptualizarse admitiendo que con ellos es posible: (a) Representar a la teoría (b) Indicar las condiciones más adecuadas en las que pueden comprobarse hipótesis, leyes o teorías y (c) Considerar un caso particular de la teoría general correspondiente.

DEDUCCIÓN TEÓRICA DEL MODELO

El problema a resolver consiste en determinar el punto donde el costo total (C_T), sea igual a la suma de los costos por fallas, (C_F), y de los costos por mantenimiento preventivo, (C_P), y que a su vez el costo total resulte ser mínimo;

a este punto, o nivel de mantenimiento, se llama *Nivel Óptimo*, es decir, el punto de la curva del costo total, donde se verifique la relación:

$$C_T = C_F + C_P$$

(1)

En la Figura Nº 2, se muestra el nivel de mantenimiento que minimiza el costo total. Como deseamos deducir un modelo de fácil manejo, obtener el nivel óptimo derivándolo de la función (C_T), resulta ser muy complicado ya que el correspondiente proceso matemático incluye funciones de probabilidad que son aún más difíciles de lograr y aplicar, procuraremos conseguir el nivel óptimo considerando los niveles óptimos de cada uno de los componentes que conforman el sistema de mantenimiento, entre los que podemos citar: el mantenimiento preventivo, mantenimiento correctivo, talleres de reparaciones, etc.

El análisis de los costos del mantenimiento preventivo, tiene como objetivo *reducir la frecuencia y gravedad de las fallas y paros del equipo a través de acciones preventivas*; de ellas se destacan: (a) Programas de mantenimiento preventivo. (b) Trabajos rutinarios con propósitos de inferencia. (c) Mantenimiento predictivo que nos proporcione información oportuna de posibles fallas futuras del equipo.

Se pueden identificar dos elementos básicos del costo ocasionados por fallas (paro) del equipo:

- (1) Costo promedio por paro (\bar{C}_P)
- (2) Número de paros esperados en el período de planificación (N_P)

El costo ocasionado por las fallas del equipo, se calcula mediante el producto de los dos elementos anteriores, esto es:

$$C_F = \bar{C}_P \cdot N_P$$

(2)

En el costo del mantenimiento preventivo también influyen dos componentes:

- (1) Costo promedio por cada trabajo (servicio) de mantenimiento que se realice en el equipo (\bar{C}_S)

- (2) Número de veces que se efectúan acciones de mantenimiento en el período de planificación (M)

El producto de estos dos componentes, nos permite determinar el costo del mantenimiento preventivo; es decir:

$$C_P = \bar{C}_S \cdot M$$

(3)

Reemplazando (2) y (3) en (1), resulta:

$$C_T = \bar{C}_P \cdot N_P + \bar{C}_S \cdot M$$

(4)

La ecuación (4) representa la función costo total de mantenimiento preventivo que nos proponemos minimizar.

Entre N_P y M existe una relación tal que al aumentar M , N_P disminuye; es decir, los costos componentes de C_T , varían en sentido opuesto. Establecida la ley de variación de N_P en términos de M , podemos escribir N_P en función de M , de la forma siguiente:

$$N_P = F_{(M)}$$

(5)

Reemplazando (5) en (4) se obtiene

$$C_T = \bar{C}_P \cdot F_{(M)} + \bar{C}_S \cdot M$$

(6)

La función de costo (6) será mínima para un cierto valor de $M = M_m$ (7) (véase la Figura Nº 2)

El período óptimo de mantenimiento preventivo es:

$$T = \frac{1}{M_m}$$

(8)

T se utilizará para programar el mantenimiento preventivo, a un costo mínimo

La función (6) adquiere la forma:

$$C_T = \overline{C}_P \cdot F_{(M_n)} + \overline{C}_S \cdot M_m$$

(9)

El período T varía en sentido contrario a la forma como varía la relación $\overline{C}_P / \overline{C}_S$. A mayor valor de la diferencia $\overline{C}_P - \overline{C}_S$, mayor será la frecuencia del mantenimiento preventivo para obtener un costo mínimo.

Cuando se trata de equipos de operación continua, (aire acondicionado, calderas, computadoras), de empresas como Petróleos de Venezuela y Siderúrgica del Orinoco, entre otras, el costo de mantenimiento preventivo siempre deberá incluir los costos ocasionados por paros de aquellos equipos a los cuales se les debe ejecutar mantenimiento correctivo.

Deducir M_m no plantea mayores dificultades, pero es necesario definir previamente la función N_p para diferentes frecuencias de mantenimiento; se puede establecer $F(M)$ a través de ajustes de curvas.

Supongamos que se desea determinar el nivel óptimo de mantenimiento para un equipo o máquina; es decir, *deseamos conocer cuál es la cantidad de trabajos de mantenimiento preventivo que se deben realizar durante un (1) año, de tal manera que el costo total por concepto de mantenimiento, incluyendo el costo ocasionado por la suspensión del servicio que presta la máquina, sea mínimo.*

Para resolver este problema, se procede de la siguiente manera:

(a) Definición de la Función $F(M)$

Esto se logra mediante una serie de análisis, ensayos y verificaciones en los cuales se hace variar M de manera tal como se muestra en la figura (3), observándose que $F(M)$ varía según los datos de la tabla que se muestra a continuación:

TABLA 1

M	F (M)
0	24
1	12
2	8
3	6

Fuente: Diseño del Autor 2004

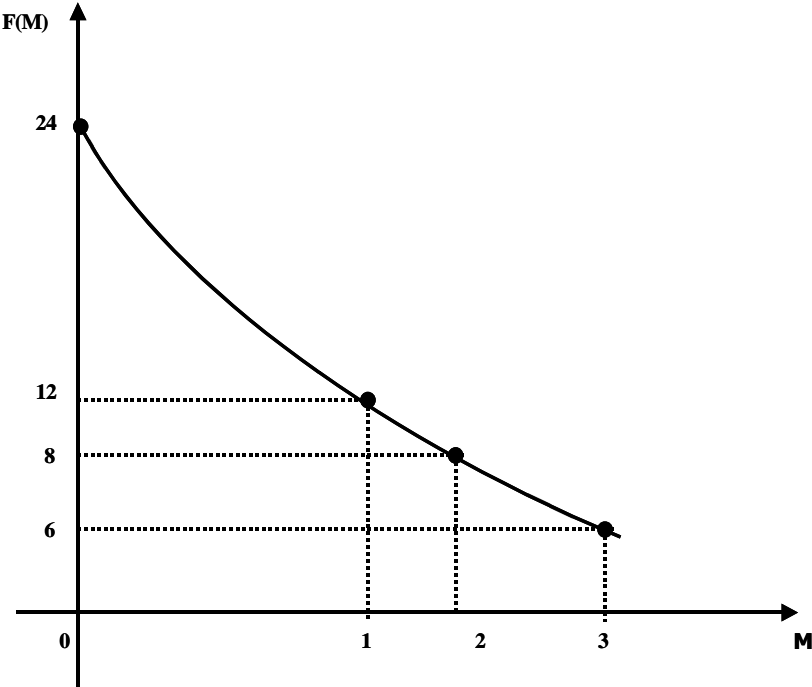


Figura Nº 3 Gráfico que Muestra las Variaciones $F(M)$ y M
Fuente: Autor (2004)

La función que estamos analizando se puede representar por la relación:

$$F(M) = \frac{24}{1+M}$$

(10)

(b) *Expresión Algebraica de Mm*

Consideremos la relación (6):

$$C_T = \bar{C}_P \cdot F(M) + \bar{C}_S \cdot M$$

Reemplazando $F(M)$ por su igual encintrado en (10) resulta:

$$C_T = \bar{C}_P \cdot \left(\frac{24}{1+M} \right) + \bar{C}_S \cdot M \quad (11)$$

Derivando (11) con respecto a M , se obtiene:

$$C_T = -\frac{24}{(1+M)^2} \bar{C}_P + \bar{C}_S \quad (12)$$

Haciendo $C_T = 0$, efectuando operaciones y simplificando, obtenemos,

$$\bar{C}_S M^2 + 2M\bar{C}_S + \bar{C}_S - 24\bar{C}_P = 0 \quad (13)$$

Resolviendo la ecuación de segundo grado (13), en la que la incógnita es M , resulta:

$$a = \bar{C}_S; \quad b = 2\bar{C}_S \quad y$$

$$c = \bar{C}_S - 24 \cdot \bar{C}_P, \text{ se tiene:}$$

$$M = \frac{-2\bar{C}_S + \sqrt{(2\bar{C}_S)^2 - 4\bar{C}_S(\bar{C}_S - 24\bar{C}_P)}}{2\bar{C}_S}$$

$$M = \frac{-2\bar{C}_S + \sqrt{96\bar{C}_S \cdot \bar{C}_P}}{2\bar{C}_S}$$

$$M = \frac{-2\bar{C}_S + 2\sqrt{24\bar{C}_S \cdot \bar{C}_P}}{2\bar{C}_S}$$

$$M = \frac{-\bar{C}_S + \sqrt{24\bar{C}_S \cdot \bar{C}_P}}{\bar{C}_S}$$

$$M = \frac{-\bar{C}_S + \sqrt{\frac{24\bar{C}_S \cdot \bar{C}_P}{\bar{C}_S^2}}}{\bar{C}_S}$$

$$M = \frac{-\bar{C}_S + \sqrt{\frac{24\bar{C}_S \cdot \bar{C}_P}{\bar{C}_S^2}}}{\bar{C}_S} \quad (14)$$

Si en la relación (14) hacemos $M = Mm$, resultará finalmente que:

$$Mm = -1 + \frac{\sqrt{24\bar{C}_P}}{\bar{C}_S} \quad (15)$$

La relación (15) constituye el Modelo Matemático que permite al ingeniero optimizar los costos de mantenimiento preventivo, si se conocen el Costo Promedio por paro (\overline{C}_p) y el Costo Promedio por Cada Trabajo de Mantenimiento (\overline{C}_s).

Problema de Aplicación

Determinar el número de veces al año, que deben realizarse trabajos de mantenimiento a una bomba de lubricación, sabiendo que el costo promedio por cada trabajo de mantenimiento es de Bs. 12.000.

De acuerdo al enunciado del problema:

\overline{C}_p = Bs. 5.000 (16)

\overline{C}_s = Bs. 12.000 (17)

Reemplazando los valores (16) y (17) en la relación (15) resulta:

$Mm = -1 + \sqrt{\frac{24 \cdot \text{Bs. } 5.000}{\text{Bs. } 12.000}}$

$Mm = -1 + \sqrt{10}$

$Mm = -1 + 3,162$

Mm = 2,162

 (18)

Con respecto al valor de Mm encontrando en (18), a una bomba de lubricación habrá que prestarle servicio de mantenimiento preventivo 2,162 veces al año, para que el costo sea mínimo. Esto equivale a darle servicio cada

$\frac{365\text{días}}{2,162} = 168,825 \approx 169 \text{ días}$

CONCLUSIONES

El Mantenimiento de equipos ha adquirido importancia trascendente, fundamentalmente por la incidencia económica saludable, cada vez mayor, lo cual es uno de los resultados de la aplicación de una buena gerencia, en la conservación de los bienes de todas las empresas.

Las inversiones anuales en la adquisición de equipos industriales aumentan con gran celeridad; por ésta y otras razones, es necesario que la gerencia correspondiente se aboque además de proporcionar una gestión productiva de calidad, a diseñar modelos matemáticos perceptibles de optimización de costos en la praxis del mantenimiento preventivo.

El conjunto de personas que conforman el grupo de mantenimiento de una organización industrial debe estar asistido por planificadores, analistas de costos y economistas que los asesoren en el diseño, aplicación, actualización, reemplazo y mejoramiento de modelos matemáticos de optimización de costos de mantenimiento que garanticen la minimización sin detrimento de la calidad del servicio correspondiente.

Es conveniente diseñar modelos matemáticos de optimización de costos de mantenimiento, que sean de fácil manejo por las personas a quienes van dirigidos, sin que ello signifique larga permanencia de utilización, pues los resultados nos indicarán cuando revisarlos, descartarlos, actualizarlos, mejorarlos o complicarlos con la incorporación de otros elementos de mayor confiabilidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alcalá, A. (2000). **Introducción al Mantenimiento**. Caracas, Venezuela. Texto Ilustrado,

_____ (2000). **Proceso Evolutivo del Modelo de Boyle**. . [Ponencia Universidad Nacional Abierta] Caracas, Venezuela.

_____. (1998). **Mantenimiento Productivo Total**. [Ponencia] Caracas, Venezuela.

Diccionario de la Real Academia Española de la Lengua **DRAE**. (2001). España.

Fiscalía General de Mantenimiento. (1980). **Sistema de Mantenimiento Correctivo**. Caracas, Venezuela.

_____ (1980). **Sistema de Mantenimiento Preventivo**. Caracas, Venezuela.

Visor. (1999). **Enciclopedias Audiovisuales**. Visor E.A.S.A. Argentina .Edición Especial para Latinoamérica.

RTD2004-66033

**WHEEL WEAR MANAGEMENT ON HIGH-SPEED PASSENGER RAIL: A COMMON
PLAYGROUND FOR DESIGN AND MAINTENANCE ENGINEERING IN THE TALGO
ENGINEERING CYCLE.**

Fernando Pascual
Talگو Inc
Seattle, WA

Jose-Antonio Marcos
Patentes Talگو Sociedad Anónima (PTSA)
Madrid, Spain

ABSTRACT

Talگو's focus on engineering excellence has helped the group to deliver innovative rail products to the market since 1942. Patentes Talگو S.A. (PTSA) provides passenger rail administrations around the world with high speed cars and locomotives, car maintenance equipment and maintenance services. The paper outlines the US experience of Talگو's Total Logistics Care (TLC) maintenance program, summarizing Talگو's maintenance approach, practice and overall results. The preventive and corrective maintenance program, the continuous trainset monitoring and the maintenance & design engineering cycle will be covered among other topics.

Rolling assembly maintenance and wheel wear management are the two focal points of this paper. Talگو's rolling assembly design has evolved over 60 years taking full advantage of the design-maintenance engineering cycle. Maintenance engineers and technicians, wheel assembly design engineers and maintenance equipment design engineers work together on a daily basis to improve the design of the rolling assembly and reduce maintenance costs and wheel wear. Enhanced guidance systems and other design improvements help to reduce flange wear on independent axle wheelsets. Also, five decades of in-house maintenance and wheel turning experience using Talگو pit lathes revealed the cutting parameters and frequencies to maximize wheel life. Both wheel wear management design and maintenance practices will be reviewed in the paper.

INTRODUCTION

Talگو rolling stock is well known worldwide for its unique design and outstanding reliability and availability over the life of the train. This performance must be credited to both the design and a maintenance program that has been refined over the last sixty years.

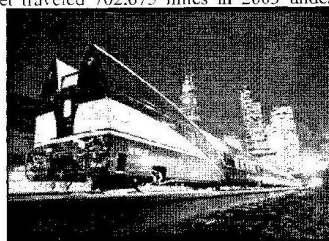
The paper starts outlining the Talگو maintenance experience in the US and then focuses on describing how Talگو manages wheel wear through both design and maintenance. Since the cost in wheels one of the main cost drivers in a maintenance operation, wheel wear management becomes a priority in any rail maintenance operation. First, the special features of the design aimed to reduce wheel wear are summarized. Next, the maintenance practices that minimize overall truck maintenance costs are exposed. Wheel wear mechanisms, turning frequencies, flange thickness/wear dependency and other topics are considered in order to obtain the maintenance parameters that lead to the minimum overall cost.

1. TALGO'S MAINTENANCE APPROACH IN THE US

1.1 THE CASCADES EXPERIENCE IN THE NORTHWEST.

Operation: PTSA currently maintains 67 cars in the Northwest corridor through its wholly owned subsidiary Talگو Inc. These Talگو TPU-200 cars forming the fleet incorporate all the traditional features of the articulated Talگو cars: independent wheels, light body, guided axles, natural tilting, and a low center of gravity. The 67 cars are arranged in five trainsets covering the Portland-Seattle-Vancouver corridor. The five trainset fleet traveled 702,675 miles in 2003 under Amtrak's operation. Ridership has increased gradually from 94,061 passengers in 1993 to almost 600,000 in 2003.

Figure 1. Mt. Hood trainset at King St. station, Seattle.



1.2. MAINTENANCE GOALS & APPROACH

Engineering cycle. Talgo was the first train manufacturer to offer comprehensive maintenance services to railroad administrations. By closing the design-manufacturing-maintenance engineering cycle, Talgo can provide the highest levels of technical expertise. The continuous exchange of technical information among design, manufacturing and maintenance personnel has naturally led to an optimized design of products (vehicles) and processes (maintenance).

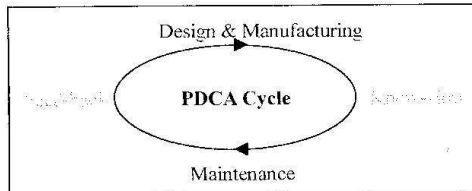


Figure 2. Talgo's engineering approach to the Plan-Do-Check-Act (PDCA) cycle.

Talgo Maintenance Philosophy: Talgo has provided maintenance services over the last 50 years, developing a practice that led to the program currently implemented in the Northwest Corridor. Talgo's Total Logistic Care™, or TLC™, is a maintenance program which has resulted in the availability of the trains in excess of 99% over 10 years of operation in the United States. TLC™ goals are to provide safe, reliable and clean equipment. Its philosophy can be summarized in four major guidelines:

1. Frequent preventive maintenance and immediate corrective maintenance. The all-inclusive service includes: Comprehensive preventive maintenance (staggered), real-time corrective maintenance, continuous on-board technical assistance, cleaning solutions, overhauls, modifications & wreck repair, FRA compliance activities, efficient record keeping with automated work management tracking and trend analysis capabilities.
2. Maximize utilization rates; minimize spare rolling stock investments. (Only 3 spare cars are used for the 67 car operation in the Pacific Northwest.)
3. Availability and Reliability Guaranteed by Contract.

Talgo's maintenance program is assessed in five major areas: Quality, Cost, Delivery, Safety and Morale (QCDSM). The QCDSM Operations Metrics compile the operation results month to month, helping management to find the direction for continuous improvement.

- Quality: contract failures, mission completion and comfort, reliability failure index, mission termination, mission completion & success.
- Cost: Inventory turnover, usage and accuracy, wheel wear, maintenance, cleaners and OBT hours.
- Delivery: Availability; PM earned value.
- Safety: Incident frequency and severity indexes.
- Morale: Attendance, etc...

1.3. THE MAINTENANCE PLAN

The maintenance plan combines preventive (staggered) and corrective maintenance. The preventive maintenance (PM) program is structured by systems, subsystems and assemblies, not by cars. Preventive maintenance tasks include:

- Periodic Tasks: For replacing elements that have reached their end of life (consumables, etc...) and overhauling elements that require it (brake valves, ...)
- Conditional tasks: Periodic inspections allow detecting potential flaws that may trigger a corrective action.
- Failure tracking tasks: checking of features that are not being used; i.e. manual removal of the emergency windows.

Preventive maintenance work orders are triggered by a work management system, and work orders requiring instructions have a maintenance procedure code attached to them. These work orders are staggered across the fleet to minimize extended processes and reduced service time.

Since the trainsets visit the maintenance facility only once every four days, the On-Board-Technician (OBT) is in charge of minor corrective repairs. All the Talgo trainsets worldwide

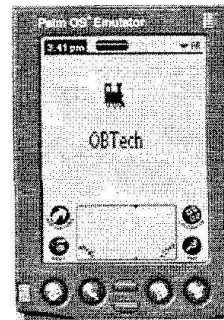


Figure 3. The Palm Emulator for PC replicates the OBT's PDA system for training purposes

have an OBT while the trainset is in service. The OBT has responsibilities in both the corrective and preventive maintenance of the vehicle. They are responsible for repairing in-service failures, daily OEM inspections, station turnaround tasks, and system monitoring and fault detection. The on-board diagnostic computer continuously monitors all the systems (HVAC, air system, bearings, etc...) and

informs the OBT about anomalies and malfunctions. In case of severe emergencies and if the OBT cannot solve the problem, a response team is responsible for the repair at any time. The OBT uses a Personal Data Assistant (PDA) to store all this information while the trainset is traveling. When the train gets to the station, the OBT downloads the data to the work management system in the maintenance facility. The system automatically creates the corrective maintenance work orders for the service and the inspection team.

This work management system is also programmed to schedule the staggered maintenance plan. An organized work management system is also critical to control inventory, purchasing and equipment. This system therefore assures the recordkeeping, which is contractual obligation for the operation.

2.3. RESULTS

Talgo is responsible of providing maintenance management services using Amtrak facilities and staff. The table shown in the Figure 4 shows a sample of the results of this alliance.

	2002	2003
Availability	100%	100%
Reliability	48.000m	56.000 m
Wheel wear	0.59mm	0.45

Figure 4

During the last two years, the trains were every morning available at the station and ready to go. Reliability is calculated as fleet miles divided by two times the mission termination failures plus the mission completion failures. Average wheel wear is expressed as millimeters of flange thickness worn out per 12.500 miles per wheel.

2. TALGO WHEEL WEAR MANAGEMENT CYCLE: FROM DESIGN TO MAINTENANCE

2.1 WHEEL WEAR, WHEEL COST AND LIFE

Tread, Angle & Flange Wear: Economic reasons call for a hard rail/soft wheel compromise that extends the life of the rail and increases the wheel replacement frequency.

Wheel wear can be classified in flange, tread and flange angle wear. Flange wear is mainly due to rail-wheel flange friction in curves. This type of wear is usually the most severe in sinuous routes and therefore determines the life of the wheel. On the tread, wear is due to the permanent contact between the rail and the same rolling point on the wheel. This type of wear corresponds to correctly guided wheel assemblies circulating in track short on "sharp" curves or tangent track. Wheel flats and material defects can also appear in the tread. Although these phenomena cannot be considered wheel wear per se, they require turning and therefore affect the life of the wheel. Wear can also affect the flange angle: wheels presenting this type of wear are turned being the loss on diameter negligible.

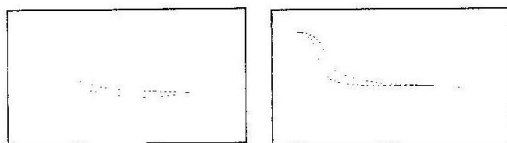


Figure 5. Tread wear (left) and Flange wear (right)

Wheel cost and life: The life of the wheel is the total amount of miles traveled until it is out of specification. Flange thickness decreases due to in-route flange wear; then the wheel is turned to a certain flange thickness with the consequent lost in diameter. This cycle continues until the diameter is such that there is no more material to cut. The life of the wheel is therefore given by the in-route flange wear and the turning practices.

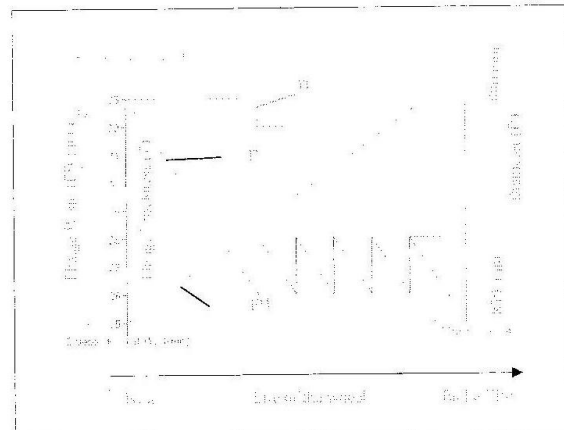


Figure 6. Flange thickness and diameter evolution along the life of a wheel

Variables affecting wheel wear: Some of the variables affecting wheel wear such as the condition of the track, weather factors and speed, cannot be controlled either by design or by maintenance practices. Also, wheel and steering system design are set for the wheel assembly design given. Flange lubrication does also affect flange wear but the Talgo steering system in place reduces wheel wear to such an extent that the use of flange lubricants would require serious return-on-investment justification. However, there is a number of variables that can be controlled through adequate maintenance:

- Truck relative position (angular) to the rails: parallelism of the wheels to the rail.
- Guidance system operation: looseness in joints and guidance bars, etc...
- Wheel parameters: flange angle, flange thickness, diameter variation among coaxial wheels, face to face distance in coaxial wheels and tread taper.
- Wheel truing parameters: optimum flange angle after machining, optimum increase of flange thickness, surface finish.
- The condition of the suspension may also alter the position of the center of gravity, redistributing stresses and thus affecting flange wear.

Guidance system adjustment and operation, wheel parameters control and wheel truing are the four variables that can be controlled through appropriate maintenance. These topics will be covered after describing the peculiarities of the Talgo wheel assembly design and illustrating how it is aimed to minimize wheel wear.

2.2. REDUCING WHEEL WEAR THROUGH DESIGN

2.2.1. TALGO WHEEL ASSEMBLY OVERVIEW

Some of the main Talgo truck features must be introduced in order to better understand how this design is aimed to reduce wheel wear.

Each car has one single truck with two independent wheels located in one end of the car. Having only two wheels per car, each car is hanging from the adjacent car. The only car in the composition having four wheels (two trucks) is one of the end cars. A car can be compared with a two-wheel trailer that is hanging from the adjacent car by its single holding point. Since the wheels can spin independently from each other, the hunting movement is eliminated. This increases comfort and reduces wheel flange-rail friction.

Each rolling assembly consists of the following elements:

- A yoke-shaped wheel frame (see Figure 7. Reference number 1)
- Two wheel assemblies that include the wheel, axle, bearings and brake discs (see Figure 7. Reference number 2)
- The shunting mechanism that guarantees the electrical conductivity among the independent wheels
- Braking components including brake pads and hydraulic calipers

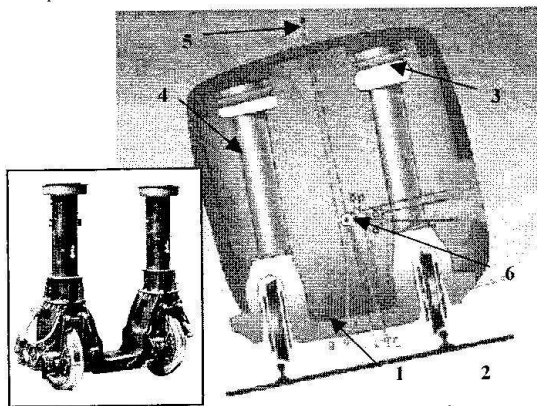


Figure 7. Talgo truck (left); Talgo car tilting in a curve (right)

- Suspension system. The two suspension towers (see Figure 7. Reference number 4) connect the yoke with the car body through two diaphragm-type air springs. These air springs (see Figure 7. Reference number 3) provide vertical, lateral, longitudinal and torsional elasticity. The suspension system allows the cars to naturally tilt in curves. The tilting of the bodyshell reduces the non-compensated centrifugal acceleration perceived by the passenger in a curve of a given radius for a given velocity. In other words, being the non-compensated acceleration the same, a tilting train can circulate in curves faster than a non-tilting train. Natural tilting means that no special mechanism is used to incline the carbody in a

curve. By design, the center of gravity (see Figure 7. Reference number 6) is located below the instantaneous center of rotation (see Figure 7. Reference number 5); when the car gets into a curve, the centrifugal acceleration exerts a lateral force on the center of gravity that makes the carbody to naturally tilt outwards. Therefore it is the centrifugal acceleration that controls the system without the intervention of any artificial system.

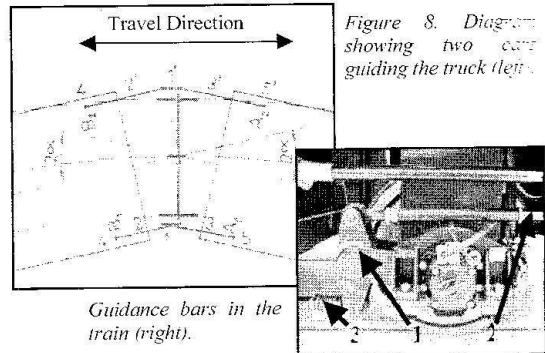


Figure 8. Diagram showing two cars guiding the truck fleet.

- Guidance system is a steering mechanism that drastically reduces wheel wear by keeping the wheels parallel to the rails at any time and in both traveling directions.

When the truck gets to a curve, linkages 4 and 5 (see Figure 8) in the interior of the curve approach each other pushing the guidance bars 2 and 3 together. Meanwhile, linkages 4' and 5' pull from guidance bars 2' and 3' in the outside of the curve. As a result, rocking connections 1 and 1' rotate the truck around its vertical axis keeping it in a radial position.

The guidance system reduces the friction between the rail and the flange thickness. This implies lower wheel wear and therefore fewer turnings operations are required.

2.2.2. FUTURE DESIGN IMPROVEMENTS

In order to reduce even more the maintenance costs associated to wheel wear, two systems are being developed that will improve the performance and reduce the maintenance of the guidance system.

GPS-aided guidance. In this case, a Programmable Logic Controller (PLC) gets from the Anti-Block System (ABS) sensor the number of revolutions for each wheel in a particular truck. During the outward trip, a GPS tells the PLC when to acquire the data, so the revolutions registered match a known length of tangent track. In the return trip, the GPS triggers again the process and the PLC registers the number of revolutions of the same section of track. Then the PLC compares the revolutions obtained in both ways for each wheel and calculates the angular position of the truck relative to the rails.

Finally, the system determines the magnitude of the adjustment required in each bogie so the maintenance team can correct the deviation.

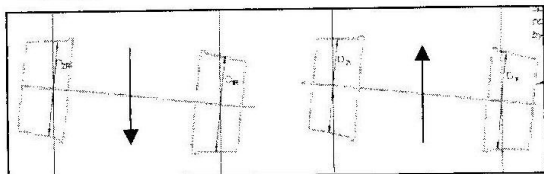


Figure 9. A non-centered truck in the outward and return trips.

- **Automated guidance adjustment.** In this case, an electric mechanism adjusts the guidance bars in real time, relieving the maintenance shop from the guidance adjustment tasks.

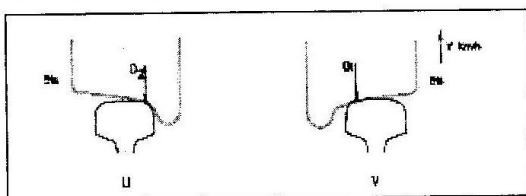


Figure 10. A non-centered truck leads to contact circumferences of different diameters

The ABS sensor informs the computer of the spinning speed for the two wheels of a truck. Then an algorithm translates the difference in rotating speeds into the difference in diameter between the contact circumferences of each wheel. Due to the conical shape of the wheel tread, the difference in diameters can be understood as a misalignment of the truck. The computer quantifies it and makes the electric motors to adjust the length of the guidance bars to center the truck again.

3.3. REDUCING WHEEL WEAR THROUGH MAINTENANCE.

3.3.1. GUIDANCE CONTROL

As exposed above, the wheel assembly-rails relative position depends on the adjustment of the guidance bars. Trucks centered in the track lead to minimum wheel wear whereas small deviations from the optimal geometry will produce higher wear. Due to the conicity of the wheel tread, when the wheels are not perfectly parallel to the rails the whole truck tends to position itself closer to one rail than to the other. Thus, the goal is to keep the truck always centered, keeping the wheels parallel to the rails.

To monitor the position of the truck, a Talgo device called T2 is used (see picture 11). This device is installed in the track and connected to a PC, so whenever the trainset comes to the shop, the distance from the rails to the wheels is registered, indicating the position of the truck relative to the track: Right, center or left. This data is automatically recorded for each truck. On-board Technicians and shop mechanics also measure

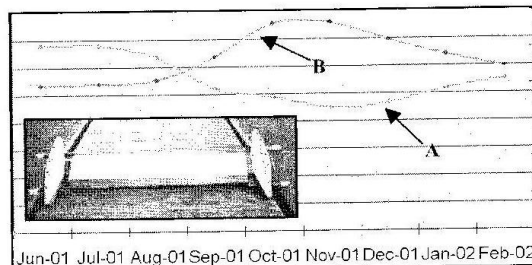


Figure 11. The plot shows the relationship between overall fleet wheel wear (A) and the number of guidance corrections conducted along a 9 months period (B). The T2 is also shown

this parameter for chosen trucks, using either a laser alignment instrument or a special caliper. The technician reports the position of the truck as centered, right (left)-centered or to the right (left)

Since the flange wear is also tracked, it is easy to match non-centered trucks with high wear. These are the trucks that need to be guided. The guidance mechanism is designed so this adjustment can be easily made. As it can be observed in the figure below, the centering basically requires regulating the length of the guidance rod. By shortening the rod in one side of the truck and lengthening the rod in the other, the whole wheel assembly rotates, recovering the ideal position to minimize wheel wear. The guidance bars have a simple rotating design that allows this change in length without the need of using any special tool.

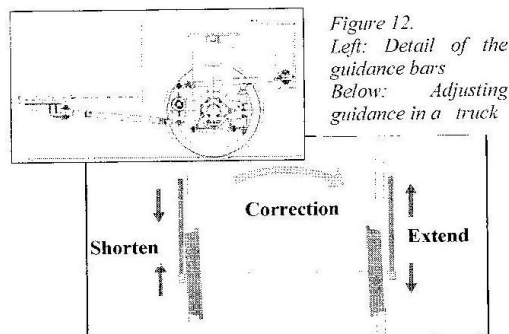


Figure 12. Left: Detail of the guidance bars. Below: Adjusting guidance in a truck

Recent Talgo developments go one step beyond in automating the guidance and wheel control process. Another Talgo wheel diagnostic device, the T8, automatically registers wheel diameter, flange thickness, angle and height at a train speed of up to 5 km/h. A sensor identifies the car number while the trainset is approaching the shop. All the data is sent to a PC where special software analyzes the data. The EVA (Artificial Vision Equipment) allows wheel inspection at a train speed of up to 15 km/h. This piece of equipment uses a laser beam to register the same set of parameters plus the distance between wheels. Then, the data can be even synchronized with the CNC lathe so it knows which wheel to turn and to what level.

3.3.2 GUIDANCE SYSTEM MAINTENANCE

Although the steering system requires very low maintenance, deviations from expected performance automatically affect wheel wear and therefore cost and comfort. A Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) was developed by PTSA Maintenance Engineering department to analyze the maintenance plan for the guidance system. The analysis starts developing a FMEA table that relates failures modes and their severity. An excerpt of the table can be seen below. *

Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) Table (excerpt)						
Element	Failure mode	Cause	Effects	G [*] = f (safety, reliability, availability, repair time, quality)	Frequency	Severity
Guidance bars rotating linkage	The rubber comes off	Rubber deterioration	High W/W	1+1+2+3+3=10	2	20
			Vibrations	1+1+1+3+3=9	2	18
Guidance bars	Bushing looseness	Vibration wear	High W/W	1+1+2+3+3=10	3	30
			Vibrations	1+1+1+3+3=9	3	27
	Incorrect length	Incorrect centering checking	High W/W	1+1+2+2+3=9	3	27
		Incorrect centering regulation	High W/W	1+1+2+2+3=9	2	18
		Truck replacement	High W/W	1+1+2+2+3=9	4	36
		Change in train composition	High W/W	1+1+2+2+3=9	4	36

Figure 13. Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) table (excerpt).

The table assigns a severity index to each potential type of failure of each element of the assembly. The table only shows the analysis for two elements. The severity value is calculated as failure frequency times a FMEA coefficient. This coefficient is calculated adding up the following five values ranging all from 1 to 4:

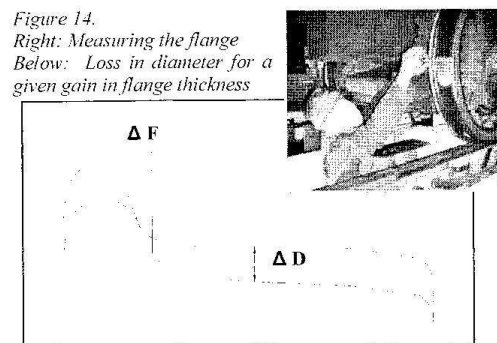
- Safety index: How does the failure affect safety
- Reliability index: 1 not significant, 2 significant, 3 critical, 4 catastrophic.
- Availability index: 1 for short discontinuities due to this failure, 4 for long stops
- Repair time: the higher the repair time the higher the index.
- Quality index: the higher the influence in quality the higher the index.

These severity indexes help to understand and assign priorities and frequencies in the preventive maintenance plan.

3.3.3 WHEEL PARAMETERS CONTROL AND TRUING APPROACH

TLCTTM wheel truing is characterized by keeping the wheel within its optimal range of operation; instead of waiting until a new wheel is out of FRA specs, more frequent truing operations keep the flange thickness within a range that maximizes wheel life minimizing turning costs. The maintenance program implies an exhaustive control of the flange thickness, angle and height, wheel diameter and distance between wheels. All these parameters are measured frequently and its analysis indicates which wheel to turn when and how much, so the cost of the operation is minimized.

Optimum flange thickness and Q_R to trigger the truing: As it can be seen in Figure 14, an increase of ΔF millimeters in flange thickness by turning results in a decrease of ΔD in



diameter.

The turning gain (T_{gain}) can be defined as the mm of diameter necessary to cut off to gain 1 mm of flange thickness.

$$T_{gain} = \frac{\Delta D(mm)}{\Delta F(mm)}$$

Being the life of the wheel limited by a minimum diameter, it is required to find the optimal turning gain to maximize wheel life. It is found that this parameter depends on both the initial flange thickness and flange angle (Q_R).

- The steeper the flange angle the more material will need to be removed to recover the initial profile and therefore the higher the reduction in diameter. It is been determined that the optimal Q_R value to trigger the truing process is in the 7-7.5 mm range. Q_R is measured in millimeters instead of degrees for accuracy reasons. (See International Union of Railways standard UIC 510-2-OR-98 for further details.)
- Both statistical and graphic analysis shown that there is an optimum flange thickness value that leads to the minimum wheel diameter drop. The minimum is in the 27-28 mm range. (See Figure 15)

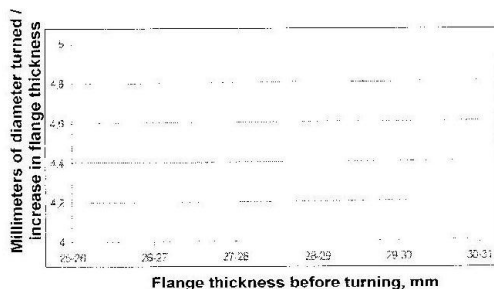


Figure 15. Optimum Turning Gain as a function of the flange thickness before turning.

So in order to optimize wheel life, the wheel should be turned when it reaches a flange thickness of 27-28 mm and a flange angle of 7-7.5 mm. But the next question is how much has to be turned? Is it necessary to bring it to its new condition (32mm)?

An internal statistical analysis conducted with a sample size of over 1,000 wheels in service put a figure on what intuition claims: that wheel wear is higher in wheels having a thicker flange. Therefore, superficial cuts (i.e. from 27.5 to 28.5) would reduce wheel wear but the wheel will need to be turned again shortly. The problem then is to find a compromise between the turning frequency and wheel life. In other words, maximize wheel life minimizing turning costs.

Then, the function to minimize is $Cost_{total}$. Total cost is the cost of the wheel plus the cost of the turning operations on that wheel over its life.

$$Cost_{total} = C_{wheel} + C_{turning}$$

The cost of the wheel increases as the after truing flange thickness increases. If the wheel leaves the lathe with a thick flange it will wear faster than if it leaves with a thin flange.

$$C_{wheel} = f(F_{afterturning});$$

On the other hand, the thinner the flange thickness after turning, the sooner the wheel will need to be turned again. Therefore, if wheels are machined to a very thin flange, the wheel will need to be turned more times along its life and the cost will be higher.

$$C_{turning} \cong f\left(\frac{1}{F_{afterturning}}\right)$$

As noted above, wheel wear has a linear dependency on flange thickness and the turning frequency follows a somehow inverse relationship with flange thickness. If the parameters for the Talgo operation are introduced in the model, the sum of both functions achieves a minimum around 30.5mm.

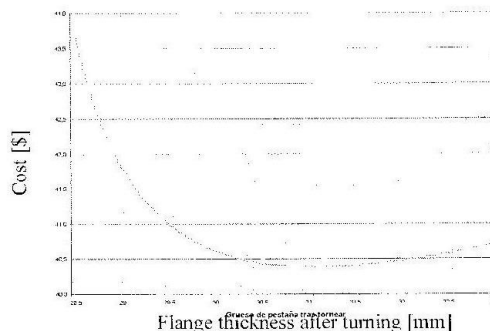


Figure 16. Total Cost

In conclusion, to minimize the total cost, (material and labor), wheels are brought up to 30.5 mm when the flange is worn down to 27.5mm.

ACKNOWLEDGMENTS

This article conveys concepts and ideas developed by Talgo engineers and technicians over the last 60 years. Special credit should be given to Jorge Maroto for grasping part of this know-how and formally embodying it in his Master Thesis.

REFERENCES

- Maroto, J., 2002, "Control de parámetros, desgaste y guiado de rodaduras Talgo" Master Thesis (Proyecto de fin de Carrera), Universidad Politécnica de Madrid.
- Beucker, K., 2002, "The Talgo Maintenance – a complete support package for Rail Vehicles demonstrated on the Talgo-hotel trains operating in Germany," ZEVrail Glasers Annalen 126 – 4 I
- Bent M., 2001, "Talgo – A Spanish Success Story Part 1," Today's Railways No.70