

Determinación del riesgo operacional en la línea aérea de contacto del ferrocarril

OPERATIONAL RISK DETERMINATION IN CONTACT LINES FOR ELECTRIC RAILWAYS

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7043> | Recibido: 28/11/2013 • Aceptado: 09/07/2014

Carlos Arbeloa-Antoñanzas¹, Óscar Duque-Pérez²,
Miguel Alejandro Fernández-Temprano²,
Luis Ángel García-Escudero², Ángel Luis Zorita-Lamadrid²
y Roberto López-de-la-Cruz¹

¹ AMAYUELAS SL. c/Orense, 27, 28020 Madrid.
Tfno. +34 915 551702. carlos@amayuelas.com

² Universidad de Valladolid. Paseo del Cauce s/n, 47011 Valladolid

ABSTRACT

- This paper proposes a methodology to determine the operational risk in a highly complex and geographically distributed system such as the overhead contact line of a railway network. This operational risk refers to the different issues that may lead to undesirable effects in the operation of the system and it is obtained by means of an index for each of the areas in which the system is divided taking into account data such as the number of faults in the area, unavailability of the area, age of the installation or differences among the actual installation and the ideal one. All these factors are processed with the appropriate statistical techniques and combined through a multivariate technique to build an index to be used for decision making in the allocation of investments in each of the areas in the network with the aim of increasing the availability of the network.
- **Keywords:** operational risk, contact line, electric railway, index combination, prioritization.

RESUMEN

Este artículo propone una metodología que permite determinar el riesgo operacional, entendido como el efecto negativo resultante de un inadecuado funcionamiento, de un sistema altamente distribuido como es la Línea Aérea de Contacto del ferrocarril. Este riesgo operacional podrá ser medido a través de un indicador obtenido para cada uno de los tramos en que se divide la red ferroviaria a partir de información relativa a su fiabilidad, estado, tipología, vida útil residual, uso, etc. Con estos datos y después de efectuar un adecuado tratamiento estadístico, se generará de la manera más objetiva posible dicho indicador, con el propósito de disponer de una herramienta que ayude al gestor a priorizar en las tomas de decisiones optimizando las inversiones a realizar con el objetivo de elevar los niveles de disponibilidad del sistema.

Palabras clave: riesgo operacional, catenaria, ferrocarril, combinación de índices, priorizar.

1. INTRODUCCIÓN

Adif, el Administrador de Infraestructuras Ferroviarias, ejerce un papel determinante como dinamizador del sector ferroviario en nuestro país, haciendo del ferrocarril el medio de transporte por excelencia y facilitando el acceso a dicha infraestructura en condiciones de igualdad.

Entre sus objetivos está potenciar el transporte ferroviario español mediante el desarrollo y la gestión de un sistema de infraestructuras seguro, eficiente, sostenible desde el punto de vista medioambiental, y con altos estándares de calidad y consiguiendo unos índices de disponibilidad lo más elevados posible, lo que evidentemente redundará directamente en sus beneficios. Para Adif es fundamental gestionar y operar con la máxima eficiencia, fomentando el aumento de cuota del transporte ferroviario frente a otros modos de transporte y posicionándose como referente entre los sistemas ferroviarios más seguros y de calidad de los de su entorno.

Por todo ello, desde las Unidades Técnicas de Adif, se viene trabajando desde hace años en la idea de alcanzar, entre otros aspectos, la máxima eficiencia operativa, tratando de detectar aquellos puntos con un mayor riesgo operacional, es decir, tratando de detectar el riesgo de pérdidas económicas como consecuencia de interrupciones en el servicio ferroviario ocasionadas por posibles incidencias en la red ferroviaria.

La determinación de este riesgo operacional constituye una herramienta altamente eficaz para determinar en qué puntos de la red ferroviaria será preciso efectuar inversiones con

el objeto de mejorar sus instalaciones y con ello disminuir el riesgo de incidencias en las mismas, elevando de esta forma sus índices de disponibilidad, algo que demandarán las distintas compañías de transporte ferroviario que operarán en un entorno liberalizado.

Este artículo muestra el trabajo desarrollado en esta línea por la Dirección de Energía e Instalaciones de Adif en colaboración con la Universidad de Valladolid y la empresa Amayuelas, con el propósito de establecer un procedimiento que permita calcular el riesgo operacional en la Línea Aérea de Contacto (LAC) para las líneas alimentadas a 3000 V corriente continua. La LAC, que constituye el sistema aéreo de alimentación empleado en el transporte ferroviario, está constituido por un sistema formado por varios cables situados a una altura determinada sobre el tren de manera que todo el convoy circule por debajo de él, llevando la locomotora un elemento extensible de captación de corriente denominado pantógrafo [1] [2].



Fig. 1: Catenaria CA 220

Este sistema de alimentación aérea, denominada comúnmente “catenaria”, está compuesto de un gran número de elementos distribuidos a lo largo de los 9.200 kilómetros de vías férreas electrificadas en corriente continua que Adif dispone a lo largo de todo el estado español. Este sistema es especialmente sensible, no sólo debido a las múltiples funciones que deben realizarse para la correcta alimentación del ferrocarril, sino también por las distintas tecnologías que conviven (en la figura 1 se muestra uno de los tipos de catenaria empleados por Adif, la CA 220). Por este motivo, el sistema requiere de un mantenimiento e inversiones adecuadas para reducir al mínimo el número de averías que pueda sufrir, por lo que disponer de un procedimiento que permita discriminar aquellas zonas con un mayor riesgo de sufrir alguna avería, y poder de esta forma priorizar actuaciones, resultará de enorme valor para los gestores de Adif.

En el apartado 2 se define el concepto de riesgo operacional aplicado a este sistema, mientras que en el apartado 3 se detallan los datos e índices que se emplearán en la determinación de dicho riesgo operacional. En el apartado 4 se define el indicador buscado y se describen los resultados obtenidos en su aplicación al sistema que nos ocupa y el tratamiento estadístico que permitirá su cuantificación. El apartado 5 contiene las conclusiones del artículo.

2. NIVEL DE RIESGO OPERACIONAL

El término “*riesgo operacional*” fue establecido en el Comité de Basilea como “el riesgo de pérdidas resultantes de la falta de adecuación o fallas en los procesos internos, de la actuación del personal o de los sistemas o bien aquellas que sean producto de eventos externos” [3][4]. Sin embargo, a pesar de haber sido utilizado principalmente en ámbitos económicos, este concepto puede extrapolarse a otros sectores como, por ejemplo, el ferroviario, considerándolo como los efectos negativos resultantes de la falta de adecuación del sistema, de averías en su funcionamiento, de la actuación del personal o de eventos externos que tengan incidencia en la circulación de los trenes produciendo retrasos o interrupción del servicio; pues ésta será, por definición, la única dimensión del daño que se tomará en cuenta en este estudio.

Pero más allá de una definición concreta de riesgo operacional o riesgo operativo, lo importante para cualquier sistema es contar con un procedimiento que permita identificar, evaluar y gestionar dichos riesgos. Este proceso de análisis del riesgo operacional es el que permitirá alcanzar elevados estándares de funcionamiento, y en el caso de Adif, obtener la máxima eficiencia operativa añadiendo una nueva dimensión a su Gestión de Activos.

Hay que tener presente que en el ámbito ferroviario, los análisis de riesgos son relativamente recientes (principios de los noventa) [5] y han venido motivados fundamentalmente por cambios organizacionales (procesos de liberalización) [6] y una mayor complejidad tecnológica, siendo principalmente considerados en términos de seguridad, implementándose una directiva en este campo en la Unión Europea en 2006 [7] y una serie de regulaciones relacionadas en 2009 [8]. También en este campo se puede citar la publicación de *UK Rail Safety and Standards Board* de 2012 [9], y a nivel español, como normativa genérica en el campo de la gestión del riesgo se puede destacar [10] [11].

Sin embargo en la bibliografía especializada hay una escasa literatura relacionada con el riesgo operacional. Así, en [12] se presenta una propuesta de procedimiento de evaluación de riesgo en el sector del transporte en general y más específicamente en el sector ferroviario, en [13] se propone un modelo de evaluación de riesgos para el sistema de señalización, en [14] para el material rodante, en [15] y en [16] para la vía y en [17] y en [18] para el balasto.

Por este motivo desde Adif se impulsa un proceso encaminado a una adecuada identificación de los riesgos operativos, que posibilite discriminar principalmente aquellos puntos donde priorizar las actuaciones e inversiones a realizar.

Para ello se dividieron las infraestructuras de Adif en sus distintas especialidades y se planteó la obtención de unos indicadores que permitiesen cuantificar el estado actual y la evolución potencial de los activos de las distintas especialidades, y que sirvan de ayuda a la toma de decisiones, tanto desde el punto de vista técnico como económico.

En este artículo se recoge la propuesta de obtención de un indicador de riesgo operacional de aplicación en las líneas electrificadas convencionales de las que Adif es responsable, es decir, las líneas alimentadas a 3.000 V corriente continua y que resulta especialmente interesante al ser un sistema altamente distribuido. Sin embargo, aunque este estudio se ha enfocado al análisis de este sistema por la información de la

que se ha dispuesto, es claro que sería igualmente aplicable a cualquier otro sistema de electrificación: líneas alimentadas a 25 kV y frecuencia industrial, 15 kV y frecuencia 50/3 Hz como existe especialmente en Alemania y por supuesto también a los ferrocarriles metropolitanos, pues el indicador que se propone tiene en cuenta, entre otros aspectos, el estado de los diferentes tramos en que se divide la red, su nivel de fiabilidad, su ciclo de vida, el tráfico que soporta, etc., aspectos todos ellos independientes de la LAC a la que se aplique el estudio.

Más aún, si se consideran los índices que en el apartado siguiente se tienen en cuenta en la definición del indicador (estado del sistema, prestaciones, desviación de la instalación tipo, vida residual y nivel de utilización), que denominaremos Nivel de Riesgo Operacional (NRO), es fácil ver que la metodología subyacente puede adaptarse sin excesivas dificultades a otros sistemas altamente distribuidos como las redes eléctricas de transporte y distribución o las infraestructuras de transporte y telecomunicaciones.

Finalmente señalar, que además de esta metodología, la otra aportación fundamental de este artículo es el uso de los procedimientos estadísticos apropiados, lo que permite la definición de un indicador con un sustrato científico sólido y en el que las valoraciones subjetivas se reduzcan al mínimo posible.

3. ÍNDICES QUE INFLUYEN EN EL NIVEL DE RIESGO OPERACIONAL

En este apartado se presentan varios índices que pueden ser satisfactoriamente utilizados para valorar numéricamente diferentes aspectos a considerar en el Nivel de Riesgo Operacional (NRO) de los tramos en que se organiza la red ferroviaria a nivel de LAC. Los factores que van a usarse como entradas de dichos índices tienen que ver con las principales características asociadas al funcionamiento de la instalación y al servicio que dicha instalación presta, considerando la complejidad inherente a una instalación de estas características, extendida a lo largo de miles de kilómetros.

Los índices propuestos sirven para resumir todos estos factores en unos pocos valores que permiten cuantificar aspectos relacionados con el estado de la instalación desde el punto de vista de la interacción pantógrafo-catenaria, con las prestaciones que ofrece dicha instalación asociadas a las incidencias producidas en la misma y con cómo se utiliza la instalación desde el punto de vista del tráfico. También se propone considerar la vida útil residual de la instalación y una valoración tipológica relacionada con su semejanza a una instalación estándar definida por Adif. Resumiendo, los índices propuestos para el cálculo del nivel de riesgo operacional van a ser el índice de estado (Iest), el de prestaciones (Ipre), el de desviación de instalación tipo (Ides), el de vida residual (Ivid) y el de utilización (Iuti).

En los siguientes subapartados se describirá qué se pretende medir con cada uno de estos índices y se comentarán los distintos factores que se tienen en cuenta en la obtención de cada uno de ellos. En cualquier caso, un valor más alto de cualquiera de estos índices o del propio NRO indicará un mayor riesgo operacional en el tramo correspondiente.

3.1. ÍNDICE DE ESTADO (Iest)

La instalación correspondiente a la LAC presenta una gran fiabilidad y durabilidad. No obstante, hay que tener en cuenta que los hilos conductores están sometidos a tensiones mecánicas entre 1000 y 2000 kg y por ellos circulan además elevadas intensidades [19]. Debido a las características del sistema analizado, es posible, tal como la experiencia ha mostrado [2], cuantificar el estado de la catenaria mediante propiedades mensurables y externamente reconocibles. Por ello, a partir del seguimiento de unos indicadores técnicos enfocados a conocer la calidad de la instalación se calcula el denominado “Índice de Estado” (Iest).

Para la determinación de este índice se propone tener en cuenta las características que más influyen en la interacción pantógrafo-catenaria y, por lo tanto, las que más se deben cuidar en las labores de mantenimiento, las cuales están relacionadas con la geometría del tendido. En concreto, se tienen en cuenta los dos factores siguientes:

• Factor de geometría

Se obtiene procesando los defectos detectados por el coche auscultador de los diversos parámetros que éste registra: alturas en más o en menos en poste y vano (distancia entre dos postes contiguos), descentramientos en recta y poste, descentramiento en curva en poste y centro del vano y pendiente a lo largo del trayecto auscultado. [20]

Cada una de las lecturas anteriores se clasifica atendiendo a la mayor o menor importancia del defecto y se pondera por el número de km auscultados.

• Factor de compensación

Está referido exclusivamente a catenarias que se encuentren compensadas, es decir, catenarias que disponen de sistemas que de una manera automática permiten contrarrestar y regular las dilataciones y contracciones que por efecto de la temperatura sufren los hilos y cables que forman la LAC, para lo cual ésta se divide en tramos de unos 1000m denominados cantones. El cálculo de este factor está basado en los datos de geometría de flechas y contraflechas detectadas en el centro de cada vano de los diversos cantones, así como las contraflechas detectadas en los seccionamientos (solapamientos entre cantones).

3.2 ÍNDICE DE PRESTACIONES (Ipre)

La LAC es un sistema complejo con una gran cantidad de elementos instalados, y que desde el punto de vista de fiabilidad constituye un sistema serie, es decir, no posee redundancia, debido tanto a razones técnicas como económicas [2]. En consecuencia, el mal funcionamiento de un elemento cualquiera de la instalación puede provocar la interrupción del servicio. Por ello, a la hora de considerar las prestaciones ofrecidas por la instalación es necesario incorporar la fiabilidad inherente a la misma así como la cuantificación de las repercusiones que un posible fallo tenga sobre el servicio prestado.

Con este objetivo, se considera un “Índice de prestaciones” (Ipre), que refleje las prestaciones que ofrece la instalación considerando las incidencias que se han producido en la misma (computadas tanto en número total como en el tiempo correspondiente) y las repercusiones que éstas han tenido en el tráfico.

Si usamos m para referirnos al total de incidencias en el tramo analizado, el subíndice i para referirnos a las incidencias, el subíndice j para los 6 diferentes tipos de circulación referidos en la tabla 1 y kmv para el total de kilómetros de vía en el tramo considerado, entonces los factores que se consideran para computar este índice son los siguientes:

• **Factor de fiabilidad**

Recoge las incidencias acontecidas por kilómetro de vía en el tramo estudiado mediante el cociente

$$m/kmv \quad (1)$$

• **Factor de indisponibilidad**

Mide el tiempo de indisponibilidad debido a averías acontecidas. Este factor puede definirse como

$$\sum_{i=1}^m t_i \sum_{j=1}^6 n_{ij} k_j / km \quad (2)$$

donde t_i es el tiempo de indisponibilidad debido a la avería i , n_{ij} es el número de trenes de tipo de circulación j afectados por la avería i , y K_j es la ponderación asignada al tipo de circulación j . Esta ponderación pretende tener en cuenta la diferente relevancia de las averías dependiendo del tipo de circulación afectada. Las ponderaciones asignadas a cada tipo de circulación aparecen en la Tabla 1.

Grandes Líneas	Regionales	Cercanías	Cargas	Combinado	Servicios internos
1.20	1.10	1.40	1.10	1.16	1.06

Tabla 1: Valor de la ponderación para los diferentes tipos de circulación

• **Factor de afectación a la explotación ferroviaria**

Tiene en cuenta los retrasos acontecidos como consecuencia de las averías. Se define como

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^6 r_{ij} k_j / km \quad (3)$$

donde r_{ij} es el retraso sufrido por el tipo de circulación j debido a la incidencia i y K_j es la ponderación recogida en la Tabla 1.

Como horizonte temporal se ha considerado un período de tres años, dando más preponderancia a las incidencias más recientes frente a las acaecidas tres años atrás. De esta forma, para el cálculo final de cada uno de estos índices, se toma la media ponderada de los valores de dicho índice en los tres años anteriores asignando un peso de 0.5 al año más reciente, 0.3 al anterior y 0.2 al más antiguo de los tres años considerados.

3.3. ÍNDICE DE DESVIACIÓN DE LA INSTALACIÓN TIPO (Ides)

Como es lógico, dadas las características del sistema analizado, las diferentes instalaciones a considerar datan de fechas muy diferentes y han sufrido renovaciones a lo largo de su vida útil de diferente intensidad y en momentos probablemente distintos en el tiempo. El esfuerzo, tanto técnico como económico, para conseguir que todas las instalaciones sean homogéneas es enorme. Por ello, para poder contemplar este

hecho dentro de la cuantificación global del nivel de riesgo, se ha definido un índice que tiene en cuenta lo cerca o lejos que tipológicamente la instalación en consideración está de una definida por Adif como “tipo” y, por lo tanto, tomada como referencia.

La idea al definir este índice es poder disponer de una valoración de los distintos tramos de la red ferroviaria de acuerdo a este criterio, al entender que aquellos tramos que se encuentren más alejados de los estándares definidos por Adif pueden ser susceptibles de tener un mayor riesgo de incidencias.

Para la obtención de este índice, denominado “Índice de desviación de la Instalación Tipo” (Ides), se ha tomado como referencia, de acuerdo con Adif, la instalación correspondiente a la línea aérea de contacto tipo CA160 [20].

3.4. ÍNDICE DE VIDA ÚTIL RESIDUAL (Ivid)

Considerando que podemos definir la vida útil de una instalación como la edad en la que hay un rápido incremento en la probabilidad condicional de fallo [21], se define la vida útil residual de cada uno de los tramos de la red ferroviaria como el tiempo de vida “restante” desde la última intervención relevante llevada a cabo en dicho tramo.

La vida útil residual es un índice definido por Adif como la diferencia entre la vida útil teórica y su edad real (la edad de la instalación considerada como el tiempo transcurrido desde la última intervención relevante en el tramo o el tiempo transcurrido desde su puesta en funcionamiento en caso de no constar ninguna intervención sobre dicho tramo).

La vida útil teórica se establece a partir de un valor constante igual a 35 años, mayorado o minorado por una serie de factores que tienen en cuenta los siguientes aspectos:

• **Factor de tipología**

Se calcula en función de la desviación de la instalación respecto de una de referencia tomada como aquella que tiene un hilo de contacto de 107 mm² de cobre, compensación conjunta y pendolado de varilla [20].

• **Factor de tráfico**

Coefficiente de mayoración o minoración en función del tráfico soportado por el tramo.

• **Factor de trazado**

Coefficiente de mayoración o minoración en función del trazado en planta y en alzado

Con el propósito de que, al igual que el resto de los índices, valores altos indiquen tramos con un riesgo mayor, definiremos el índice Ivid de tal modo que valores altos en este índice correspondan a instalaciones más “consumidas” o con menor vida residual remanente.

3.5. ÍNDICE DE UTILIZACIÓN (Iuti)

Finalmente, a nivel corporativo, se precisa un “índice de utilización” (Iuti), que tenga en cuenta aspectos relacionados con las condiciones operativas del tramo tales como el número de circulaciones, la saturación del tramo y la velocidad máxima. Por su naturaleza, estas características son comunes a todas las especialidades de Adif (señalización, vía, electrificación, etc.) por lo que este coeficiente se define de manera única para todos los casos. Así, al no ser exclusivo de la ins-

talaciones de electrificación, la forma de calcular dicho coeficiente ya estaba predefinida por Adif.

4. CUANTIFICACIÓN DEL NIVEL DE RIESGO OPERACIONAL

El NRO se calculará mediante una función que combine de forma adecuada los índices introducidos en la sección anterior:

$$NRO = f(I_{est}, I_{pre}, I_{des}, I_{vid}, I_{uti}) \quad (4)$$

La destacable experiencia acumulada por el personal encargado del mantenimiento de la LAC en Adif ha permitido establecer más que razonables valoraciones numéricas para todos los trayectos de los índices I_{est} , I_{pre} , I_{des} , I_{vid} e I_{uti} , siempre teniendo en cuenta todos los factores que comentábamos en la sección anterior. Desgraciadamente, la diversidad de factores que aparecen en la obtención de estos índices hace que estén medidos en escalas muy diferentes y tengan distribuciones de datos con formas dispares y con numerosas observaciones atípicas. Este hecho hace que sea complicado proponer una función f que sirva para combinar dichos índices en una forma en la que realmente los índices tengan la relevancia que realmente se les quiere atribuir en la obtención final del NRO.

A la hora de combinar diferentes índices en un único valor de nivel de riesgo operacional (NRO) y de tal forma que los pesos que se otorgan a cada uno de ellos queden correctamente reflejados en la combinación final, es evidente que dichos índices deben estar “en pie de igualdad” antes de ser combinados. Así, el tratamiento estadístico aplicado a los diferentes índices, con excepción del “Índice de utilización” (I_{uti}), que como se ha indicado anteriormente se definió de forma global para todas las especialidades de Adif, pasa por las siguientes fases:

- En primer lugar, es interesante que los índices no presenten una gran asimetría ni que aparezcan valores muy extremos que puedan condicionar de forma no deseada los resultados obtenidos al combinarlos. Con esta idea en mente, se han probado transformaciones que promovieran la simetría y que integraran los valores atípicos en la medida de lo posible. La transformación ideal sería aquella que consiguiera que el índice transformado pudiera asimilarse, lo más posible, a una muestra obtenida a partir de una distribución normal. En este trabajo, como por otra parte es habitual en la práctica estadística en el tratamiento de este tipo de asimetría, se ha utilizado sistemáticamente la transformación logarítmica puesto que ésta siempre ha arrojado buenos resultados respecto a los objetivos previamente comentados. Caso de existir valores 0 en alguno de los índices, para hacer la transformación logarítmica, necesitaremos sumar un valor constante pequeño a los valores de dicho índice.
- A continuación, se han tipificado (llevado a media y desviación típica comunes) los índices antes de ser combinados. Como se desea que el indicador final se mantenga en el rango $[0,10]$ se han utilizado como me-

dia común el valor 5 (centro del intervalo) y como desviación típica 1.5 (lo que asegura que un alto porcentaje de las observaciones se mantenga dentro del rango $[0,10]$).

- En tercer lugar, y para evitar los valores atípicos que, a pesar de todo, pudieran salir del intervalo, se ha efectuado un truncamiento de los valores de los índices a $[0,10]$.

La siguiente fórmula resumiría lo comentado en los tres pasos anteriores:

$$\text{Índice}^* = \text{TRUNC} \left(5 + 1.5 \left(\frac{\log(\text{Índice}) - \overline{\log(\text{Índice})}}{\text{sd}(\log(\text{Índice}))} \right); 0, 10 \right) \quad (5)$$

donde $\bar{X}$ denota la media muestral, $\text{sd}(X)$ la desviación estándar de los valores que toma la variable X , y $\text{TRUNC}(x; 0, 10)$ es una función de truncamiento que toma el valor x si el número x está entre 0 y 10, 0 si x es menor que 0 y 10 si x es mayor que 10.

Los diagramas de caja de los índices I_{est} , I_{pre} , I_{des} , I_{vid} antes y después de aplicarles estos tres pasos se muestran en las Figuras 2 y 3. Puede comprobarse en las figuras cómo los índices iniciales eran fuertemente heterogéneos y el efecto conseguido con la transformación propuesta.

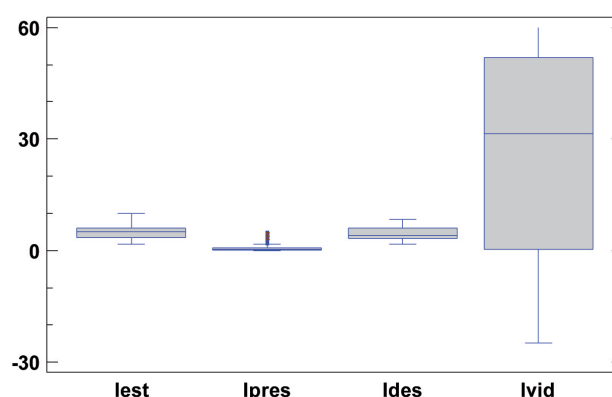


Fig 2: Diagramas de caja de los índices I_{est} , I_{pre} , I_{des} , I_{vid} antes de aplicar los pasos a b y c

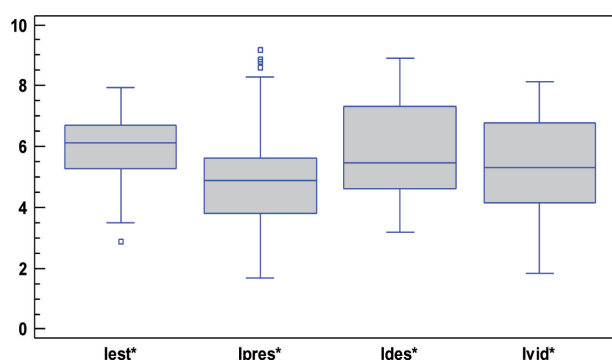


Fig 3: Diagramas de caja de los índices I_{est} , I_{pre} , I_{des} , I_{vid} después de aplicar los pasos a b y c

El “índice de utilización” (I_{uti}), que como se indicó anteriormente, pretende tener en cuenta aspectos tales como el

número de circulaciones, la saturación del tramo y la velocidad máxima, fue definido tal que su valor de referencia sea 1, de forma que, valores mayores que 1 indicarían un aumento en el indicador NRO, y valores menores que 1 indicarían una disminución. Es decir, su actuación sobre el NRO será claramente multiplicativa. El gráfico de la Figura 4 muestra un diagrama de cajas para los valores que toma Iuti en los diferentes tramos.

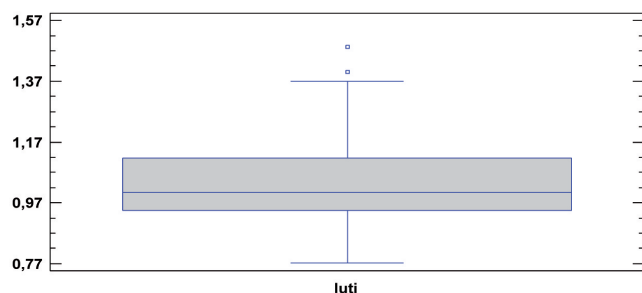


Fig 4: Diagrama de cajas del índice Iuti

Una vez que los cuatro primeros índices se encuentran en “pie de igualdad” y en una escala que hace fácil su interpretación, se establecieron pesos que tuvieran en cuenta la importancia relativa de cada uno de estos factores. En este estudio, a la hora de establecer los pesos se efectuó un análisis en componentes principales (ACP) [22] del que se concluyó que Ides* tenía una importancia mayor que el resto y que las importancias de Ipre* e Iest* debían ser significativamente menores.

Los resultados obtenidos en dicho análisis, junto con la opinión del personal de mantenimiento, cuya experiencia indudablemente es un factor que debe ser considerado, permitieron fijar los pesos definitivos de los índices Iest*, Ipre*, Ides* e Ivid*. Estos pesos, junto con la actuación multiplicativa de Iuti, permitieron obtener la siguiente expresión final para el NRO:

$$NRO = (0.05 Iest^* + 0.1 Ipre^* + 0.7 Ides^* + 0.15 Ivid^*) \times Iuti \quad (6)$$

En la Tabla 2 se muestran las frecuencias del indicador NRO, y en las figuras 5 y 6 el histograma y el diagrama de caja, respectivamente, de los valores obtenidos para el indicador NRO en los tramos en que se divide la red ferroviaria estudiada.

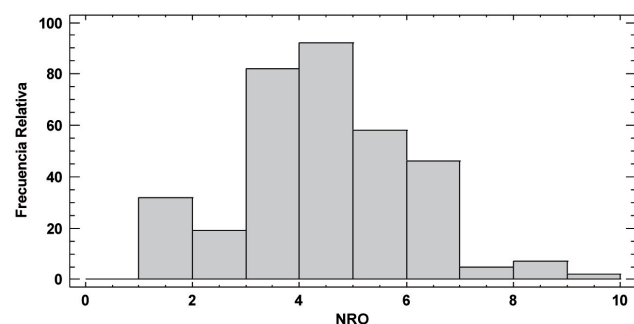


Fig. 5: Histograma NRO

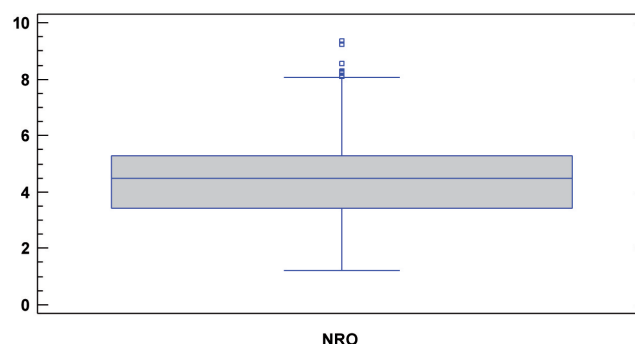


Fig. 6: Diagrama de caja NRO

Límite Inferior	Límite Superior	Frecuencia	Frecuencia Relativa	Frecuencia Relativa Acumulada
0	1,0	0	0,0000	0,0000
1,0	2,0	32	0,0933	0,0933
2,0	3,0	19	0,0554	0,1487
3,0	4,0	82	0,2391	0,3878
4,0	5,0	92	0,2682	0,6560
5,0	6,0	58	0,1691	0,8251
6,0	7,0	46	0,1341	0,9592
7,0	8,0	5	0,0146	0,9738
8,0	9,0	7	0,0204	0,9942
9,0	10,0	2	0,0058	1,0000

Tabla 2: Tabla de frecuencias para NRO

En la Tabla 2 y en los gráficos 5 y 6, se puede observar como el NRO toma valores entre 0 y 10 como se pretendía. Los resultados obtenidos muestran además que ninguno de los tramos toma valores entre 0 y 1 y menos de un 10% de los tramos toman valores entre 1 y 2. Estos 32 tramos serían aquellos en los que se identifica una mayor necesidad de actuación ya que son los que tienen un riesgo operativo más elevado en la LAC teniendo en cuenta, tanto el estado de la catenaria, como sus prestaciones (valoradas mediante el número de averías que registraron en los últimos años y sus consecuencias), la desviación de la instalación con respecto al modelo establecido, la vida útil residual y la utilización que se hace de la misma.

Es importante tener en cuenta que la conclusión es que estos tramos tienen mayor necesidad de actuación que los demás, lo que no implica necesariamente que dichos tramos se encuentren en mal estado ya que de lo que informa el índice es de cómo se encuentra cada tramo con respecto al resto de los tramos de la red. En otras palabras, no se trata de valores que puedan considerarse absolutos con conclusiones del tipo “aquellos tramos con valores por debajo de un determinado valor x están en mal estado” sino que lo que hace es establecer un ranking entre los tramos. Debe tenerse presente que el estado general de la LAC en la red es altamente satisfactorio con un reducido número de averías.

5. CONCLUSIONES

Este trabajo muestra un procedimiento que permite medir el riesgo operacional de la LAC del ferrocarril mediante la obtención de un indicador que posibilita valorar la necesidad de actuación en los distintos tramos en que se divide la red ferroviaria, algo fundamental en cualquier sistema, pero de manera especial en un sistema altamente distribuido como es la LAC. Este indicador pretende ayudar al gestor a priorizar las actuaciones e inversiones a realizar, facilitando de esta forma la toma de decisiones con el objetivo de elevar lo máximo posible sus niveles de disponibilidad.

Este procedimiento, elaborado para la Dirección de Energía e Instalaciones de Adif, muestra cómo cuantificar dicho indicador a partir del estado actual y la evolución potencial de los activos de la LAC, teniendo en cuenta su fiabilidad, vida útil residual, tráfico que soporta, etc. Todo ello es sometido a un tratamiento estadístico que, junto con la opinión del personal de mantenimiento, permite generar una expresión que cuantifica el nivel de riesgo operacional de cada tramo en que se divide la red ferroviaria. El empleo del tratamiento estadístico apropiado basado en técnicas de análisis multivariante es una de las aportaciones de este artículo, siendo de interés al permitir reducir al mínimo posible el grado de subjetividad que habitualmente suele aparecer en este tipo de procedimientos.

Este índice de riesgo operacional ha sido implementado por Adif en una aplicación informática que recoge la información que se produce en la red en cada momento y está previsto que sea utilizado en la gestión de activos, en la toma de decisiones a la hora de priorizar inversiones y como ayuda en la determinación del nivel de mantenimiento necesario en los diferentes tramos de la red ferroviaria.

Aunque la metodología descrita, que constituye la otra aportación fundamental de este trabajo, se presenta para un sistema concreto, el planteamiento que se recoge se puede extrapolar sin grandes dificultades a otros sistemas, como las redes eléctricas de transporte y distribución o las infraestructuras de transporte y telecomunicaciones, en los que se quieran efectuar valoraciones basadas en diferentes aspectos heterogéneos, una vez determinadas en estrecha colaboración con el personal experto, las variables que significativamente tuviesen influencia en la determinación del riesgo operacional de dicho sistema.

AGRADECIMIENTOS

El presente artículo se realizó al amparo de un proyecto de investigación realizado entre la Universidad de Valladolid y Amayuelas S.L. a petición de Adif. Los autores desean expresar su agradecimiento al personal de Adif que hizo posible la realización de dicho trabajo así como la labor de los revisores cuyos comentarios han dado lugar a la versión mejorada del presente artículo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Calvo Poyo FJ, Lorente Gutiérrez J, de Oña López J. *Funcionamiento y explotación de la infraestructura ferroviaria*. 2ª edición. Granada: Grupo Editorial Universitario, 2006. 135p. ISBN: 848491609X, 9788484916093

- [2] Kiessling F, Puschmann R, Schmieder A, Schneider E. *Contact lines for electric railways: planning, design, implementation, maintenance*. 2ª edición. Munich: Publicis Corporate Publishing, 2009. 822p. ISBN: 3-89578-322-6
- [3] Cabedo Semper JD, García F, Moya Clemente I. "El riesgo operacional en las normas del Comité de Basilea" *Actualidad financiera*, nº 11, p. 15-24. ISSN 0213-6929
- [4] Fernández Laviada A. (ed.) *La gestión del riesgo operacional: de la teoría a su aplicación*. Madrid: Ediciones 2010, 2007. 609p. ISBN: 978-84-8102-447-0
- [5] Rausand M. *Risk assessment: theory, methods, and applications*. Ed. John Wiley & Sons, 2013, 646p. ISBN: 9780470637647.
- [6] López Peláez A, Segado Sánchez-Cabezudo S. "¿Políticas privatizadoras o políticas degradadoras? El caso de los ferrocarriles españoles". *Revista internacional de sociología*, Vol. 68, Nº. 3, 2010, p. 757-773 ISSN 0034-9712.
- [7] EU (2004). Council Directive 2004/149/EC of 29 April 2004 on the Licensing of Railway Undertakings (Railway Safety Directive). *Official Journal of the European Union*, L 220116 (2004).
- [8] Regulation (EC) No 352/2009 on the adoption of a common safety method on risk evaluation and assessment (2009).
- [9] GE/GN8643. *Guidance on Reducing Risk*. Rail Safety and Standards Board Limited. 2012.
- [10] Norma UNE-ISO 31000:2010. *Gestión del riesgo. Principios y directrices*.
- [11] Norma UNE 31010:2011. *Gestión de riesgos. Técnicas de apreciación de riesgos*.
- [12] Jamroz K, Kadziński A, Chruzik K, Szymanek A. "TRANS -RISK-an integrated method for risk management in transport". *Journal of Konbin* 01/2010; 1(13):2009 - 220. DOI:10.2478/v10040-008-0149-9.
- [13] Iwata K, Watanabe I. "Risk Evaluation Method for Improvement of Railway Signalling Systems". *Quarterly Report of RTRI*, Vol. 51 (2010) No. 4 p. 205-213, <http://dx.doi.org/10.2219/rtriqr.51.205>.
- [14] Kim J, Jeong, H.Y. "Evaluation of the adequacy of maintenance tasks using the failure consequences of railroad vehicles". *Reliability Engineering and System Safety*, Vol.117 (2013) p. 30-39, <http://dx.doi.org/10.1016/j.res.2013.03.008>.
- [15] Podofilini L, Zio E, Vatn J. "Risk-informed optimisation of railway tracks inspection and maintenance procedures", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 91, Issue 1, January 2006, p. 20-35, <http://dx.doi.org/10.1016/j.res.2004.11.009>.
- [16] Rhayma N, Bressollette Ph., Breul P, Fogli M, Saussine G. "Reliability analysis of maintenance operations for railway tracks" *Reliability Engineering and System Safety* 114 (2013) p. 12-25, <http://dx.doi.org/10.1016/j.res.2012.12.007>.
- [17] Macchi M, Garetti M, Centrone D, Fumagalli L, Pavirani G.P. "Maintenance management of railway infrastructures based on reliability analysis", *Reliability Engineering and System Safety* 104 (2012) 71-83, <http://dx.doi.org/10.1016/j.res.2012.03.017>.
- [18] Andrews J, Prescott D, De Rozières F. "A Stochastic Model for Railway Track Asset Management". *Reliability Engineering & System Safety* (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.res.2014.04.021>.
- [19] González Fernández FJ, Fuentes Losa J. *Ingeniería ferroviaria*. 2ª edición. Madrid. Ediciones UNED, 2010. 674p. ISBN: 978-84-362-6074-8
- [20] Carmona Suárez M, Montesinos Ortuño J. *Sistemas de alimentación a la tracción ferroviaria*. Ediciones Formarail, 2013. 1191p. ISBN: 978-84-615-9536-5
- [21] Moubray J. *RCM II: Reliability-centered maintenance*. 2ª edición. Nueva York: Industrial Press Inc., 2001. 440p. ISBN: 0-8311-3078-4
- [22] Aluja T, Morineau A. *Aprender de los datos: el análisis de componentes principales, una aproximación desde el data mining*. Barcelona: Ediciones Universitarias de Barcelona, 1999. 176p. ISBN: 9788483120224