

SELECCIÓN DE PROYECTOS DE MANTENIMIENTO DE INFRAESTRUCTURAS FERROVIARIAS UTILIZANDO EL PROCESO ANALÍTICO EN RED CON BENEFICIOS, OPORTUNIDADES, COSTES Y RIESGOS

Jesús Montesinos-Valera

Departamento Proyectos de Ingeniería. Universitat Politècnica de València

Pablo Aragonés-Beltrán

INGENIO (CSIC-UPV), Universitat Politècnica de València

Juan-Pascual Pastor-Ferrando

Departamento Proyectos de Ingeniería. Universitat Politècnica de València

Abstract

In this article the application of the Analytic Network Process with Benefits, Opportunities, Costs and Risks (ANP-BOCR) to establish priorities among the portfolio of rail infrastructure maintenance, rehabilitation and improvement projects in the area of Valencia (Spain) is presented. The problem is complex because of the large number and variety of projects to be considered and the great number of criteria that must be taken into account in the decision analysis process.

The present work is a continuation of a previous research based on the AHP and ANP model. The present study analyzes the results obtained with the ANP-BOCR model, relating them with previous AHP/ANP models and shows the changes in the relative importance of criteria and changes in the priorities of the projects involved.

Keywords: *Railway; Maintenance; ANP*

Resumen

En este artículo se presenta la aplicación del proceso analítico en red (ANP) con Beneficios, oportunidades, costes y riesgos para la priorización de una cartera de proyectos mantenimiento, rehabilitación y mejora de infraestructura ferroviaria en la zona de Valencia (España). El problema es complejo por el gran número y variedad de proyectos considerados y el elevado número de criterios a considerar en el proceso de análisis de la decisión.

Este trabajo es una continuación de investigaciones anteriores basadas en el modelo AHP y ANP. Se analizan los resultados obtenidos con el modelo ANP-BOCR y se relacionan con los modelos AHP/ANP anteriores, mostrando los cambios en la importancia relativa de los criterios y los cambios en las prioridades de los proyectos analizados.

Palabras clave: *Mantenimiento; infraestructura; ferroviaria; ANP*

1. Introducción

La construcción de líneas de ferrocarril requiere de grandes inversiones, con periodos de ejecución y plazos de amortización muy largos. Las actividades de mantenimiento, rehabilitación y mejora (MR&M) son esenciales para mantener la infraestructura ferroviaria en buenas condiciones y adaptarla a los cambios en las necesidades de explotación y medioambientales. La eficiente aplicación de los recursos destinados a MR&M es crítica para los gestores y planificadores de la red ferroviaria existente.

Todos los años el gestor de una zona de la red convencional (ancho ibérico, 1667 mm y velocidades máximas de 220 km/h) se enfrenta con diferentes necesidades de MR&M. Estas necesidades se concretan en una cartera de proyectos a ser ejecutados con diferentes niveles de urgencia, diferentes necesidades económicas y diferentes medidas de mejora y planes de actuación en la red ferroviaria. El gestor tiene una cartera de proyectos amplia y un presupuesto limitado. El problema que tiene el gestor es seleccionar qué proyectos de MR&M tienen prioridad. Se trata de un problema complejo, con un gran número de criterios y de posibles acciones a tener en cuenta. En este artículo se propone afrontar el problema planteado como un problema de decisión multicriterio siguiendo el método ANP con un modelo de Beneficios, Oportunidades, Costes y Riesgos (Saaty, 2006) para ayudar al gestor a priorizar la cartera de proyectos existente.

AHP y ANP se han usado en el campo de gestión y planificación ferroviaria y proyectos con características similares, como la selección de ruta para un gasoducto (Thomaidis et Mavrakis, 2006), Selección de una cartera de proyectos en una empresa eléctrica (Smith-Perera et al, 2010), Selección de un puente en condiciones de incertidumbre (Gervasio et Da Silva, 2012), Selección de grandes proyectos internacionales de ferrocarriles (Tsamboulas, 2007), Selección de rutas para tranvías urbanos (Gercek et al, 2004), Priorización de ferrocarriles a reconstruir (Baric et al, 2006) Selección entre variantes de ejecución de proyectos Ferroviarios internacionales (Ambraseite et al, 2011). De forma indirecta se ha utilizado evaluación multicriterio en ferrocarriles para análisis de mantenimiento mediante RCM (Carretero et al, 2003)

El método se aplicará al caso de estudio descrito en el apartado 3. Este estudio presenta un modelo basado en ANP con Beneficios, Oportunidades, Costes y Riesgos (ANP-BOCR) y es continuación de un trabajo previo realizado con AHP anteriormente. En este artículo, para simplificar el estudio, se consideran 24 alternativas previamente seleccionados como representativas de las posibles acciones de una cartera de más de 400, aunque en el estudio que se realizó con AHP se estudiaron las 400 alternativas.

2. Introducción a ANP con BOCR

El método ANP con beneficios, oportunidades, costes y riesgos (BOCR) fue propuesto por (Saaty, 2005). Es una herramienta de decisión multicriterio para tratar con problemas complejos con múltiples atributos. Con este modelo los elementos del proceso de decisión (criterios y alternativas) forman una red que se compone de cuatro subredes: beneficios, oportunidades, costes y riesgos. En las subredes de beneficios y oportunidades las comparaciones pareadas permiten establecer prioridades entre las alternativas más beneficiosas o con mejores oportunidades para cada criterio de control. Los costes y riesgos son inversos, ordenan las alternativas más costosas o arriesgadas frente a cada criterio de control. De este modo la mejor alternativa recibe la máxima prioridad en las subredes de beneficios y oportunidades y la peor recibe la máxima prioridad para costes y riesgos. Posteriormente los pesos de las alternativas bajo cada subred se pueden calcular y combinar para obtener un resultado único para cada alternativa. (Lee, Kang, Liu & Wang, 2007)

Los pasos del ANP-BOCR se resumen de la siguiente manera. (Saaty, 2005)(Wang et al, 2010):

- Paso 1: Descomponer el problema jerárquicamente, construyendo una jerarquía de control y una red BOCR. La jerarquía de control contiene el objetivo del problema, los criterios estratégicos (si son necesarios) y los cuatro méritos: Beneficios (B), Oportunidades (O), costes (C) y riesgos (R). La red BOCR intenta conseguir el objetivo (Goal) con la consideración simultánea de los cuatro méritos. Bajo cada merito hay criterios de control y alternativas (aplicando ratings no hay alternativas).
- Paso 2: Determinar las prioridades de los criterios estratégicos de la jerarquía de control. La escala de nueve puntos de Saaty, se aplica para obtener las comparaciones pareadas de la importancia de los criterios estratégicos para conseguir el objetivo general. (Saaty, 1996)
- Paso 3: Basándose en la red BOCR, se comparan los criterios con respecto a merito de nivel superior, la interdependencia entre los criterios y la eficacia de cada alternativa bajo cada criterio por la escala de evaluación de Saaty.
- Paso 4: Calcular la prioridad relativa de los criterios con respecto al mismo merito del nivel superior, las prioridades relativas de la interdependencia entre los criterios y las prioridades relativas de las alternativas bajo cada criterio. En el caso de usar ratings (como en nuestro caso de estudio) esta fase se sustituye por la elaboración de los ratings para cada criterio y su análisis pareado para generar sus prioridades. Formar la supermatriz de cada subred por ANP, propuesto por Saaty (1996). Calcular la prioridad de cada alternativa para cada merito.
- Paso 5: Determinar la importancia de los beneficios, oportunidades, costes y riesgos con respecto a cada criterio estratégico.
- Paso 6: Determinar las prioridades de los meritos. Calcular la prioridad de un merito multiplicando la prioridad de los respectivos criterios estratégicos del paso2 con la puntuación del merito de cada criterio estratégico del paso 5, y, añadiendo los valores calculados del merito.
- Paso 7: Calcular las prioridades generales de las alternativas sintetizando la prioridad (B, O, C, R) de cada alternativa para cada merito del paso 4 con las correspondientes prioridades de los meritos del paso 6. De las diferentes formas de combinar las prioridades de cada alternativa bajo ANP-BOCR. (Saaty, Ozdemir, 2003) en este caso se ha usado la multiplicativa.
 - Multiplicativa: $P_i = B_i O_i / C_i R_i$
 - Aditiva: $P_i = bB_i + oO_i + c(1/C_i) \text{Normalizada} + r(1/R_i) \text{Normalizada}$
 - Aditiva probabilística: $P_i = bB_i + oO_i + c(1 - C_i) + r(1 - R_i)$
 - Substractiva: $P_i = bB_i + oO_i - cC_i - rR_i$

3. Caso de estudio

ADIF (Administrador de Infraestructura Ferroviaria) es el gestor de la red de ancho ibérico (1667 mm) propiedad del estado español. Entre las funciones de ADIF se encuentra el MR&M de la infraestructura ferroviaria, que incluye la implementación de proyectos y acciones preventivas. El área seleccionada para el caso de estudio es extensa e incluye diferentes tipos de líneas con tráficos de muy diverso tipo, desde líneas sin electrificar y señalización mecánico-eléctrica a líneas de velocidad alta (220 km/h) de alta capacidad y tráficos muy variables. La falta de homogeneidad entre las acciones de mejora posibles hace la toma de decisiones mucho mas compleja, para facilitar el proceso de toma de

decisiones, se han diseñado criterios basados en las características de la infraestructura y el uso actual que reciben.

El presente estudio se llevó a cabo por el gestor local de Valencia junto con uno de los técnicos de su departamento (y coautor de este artículo), que actuó como decisor por consenso, asistido por dos miembros del equipo de investigación del departamento de proyectos de ingeniería de la Universitat Politècnica de València, que actuaron como equipo de análisis.

Este trabajo es una continuación de trabajos previos que usaron el proceso analítico jerárquico (AHP) para establecer prioridades entre las 418 actuaciones de mejora propuestas por el Decisor. Se identificaron 24 criterios que se agruparon para la evaluación de las acciones de mejora usando Ratings. Tras los resultados obtenidos con el análisis AHP se rediseñaron los criterios, 26 ahora, agrupados en subredes de Beneficios, Oportunidades, Costes y Riesgos.

3.1 Identificación y agrupación de los criterios

En esta etapa se identifica la red BOCR con sus respectivos grupos de criterios y se identifican las influencias entre ellos. Debido al gran número de alternativas existentes, se utilizó el método de los ratings que se basa en asignar unas categorías a cada criterio, ponderarlas por comparación pareada, de modo que posteriormente se valoran las alternativas para cada criterio, asignándoles la categoría que corresponda. El problema de decisión es "Dada una infraestructura ferroviaria y una cartera de proyectos de MR&M, establecer cuáles son las prioridades entre los proyectos de acuerdo con los criterios identificados". Los análisis de influencias entre criterios con cada subred fueron realizados usando una matriz de influencia entre los elementos que tienen valor 1 si el elemento de la fila tiene influencia en el elemento de la columna o 0 en cualquier otro caso. Los criterios identificados y agrupados por el Decisor se describen a continuación, algunos criterios y subcriterios están incluidos en varias subredes, como se puede ver en el Anexo 1 (la numeración no es correlativa porque se han eliminado criterios respecto a un modelo anterior):

1 Criterios de Seguridad

1 Reducción número pasos a nivel: Los pasos a nivel son los elementos donde se pueden producir más accidentes. Cualquier reducción en el número de pasos a nivel reduce las posibilidades de accidentes y el número de incidencias.

2 Mejora señalización pasos a nivel: disminuye las posibilidades de un accidente en este, la mejora depende del tipo de señalización instalada anteriormente y el nuevo tipo de señalización.

3 Mejora sistemas de conducción: Son mejoras en los sistemas de apoyo al maquinista y todos los componentes del sistema de señalización por ejemplo los sistemas que supervisan la temperatura de los ejes y los detectores de impacto en la rueda.

4 La instalación de sistemas automatizados de explotación de los enclavamientos de las estaciones, todo tipo de mejoras que permitan aumentar el número de trenes y su velocidad mediante modificaciones en las instalaciones de señalización. Reducen el número de errores humanos y el nivel de seguridad esperable.

2 Criterios de eficiencia en la explotación:

5 Reducción tiempos de viaje: Las actuaciones que mejoran los trazados o eliminan limitaciones de velocidad, permiten reducir los tiempos de viaje, esta mejora es más importante cuanto más se reduzca el tiempo de viaje, por lo que serán más importantes en los tramos de línea más lentos.

6 Reducción del cantón crítico: La capacidad de todo el tramo está limitado por la capacidad de la parte más débil, el cuello de la botella, que marca la capacidad máxima. Toda actuación que reduzca el cantón crítico, aumentará la capacidad de la red y reducirá la criticidad de éste, reduciéndose el número de trenes retrasados, el retraso de estos y aumentando la resiliencia de la red. Baric et al (2006) expone la preferencia de los usuarios a un sistema de alta fiabilidad frente a aumentos de la velocidad media o del número de frecuencias.

7 Mejora en los sistemas de operación: Todo cambio en el sistema de regulación de la explotación que permita acercar la explotación real a la máxima teórica resulta importante para aumentar la capacidad y reducir los retrasos causados por la acumulación de trenes.

3 Criterios de eficiencia técnica:

8 Reducción en el número de incidencias: el número de incidencias penaliza el funcionamiento de la instalación, aunque sean menores y de poca importancia, implican un alto coste de oportunidad, porque suponen el desplazamiento de personal operativo para la actuación correctiva, desplazándose de sus funciones de prevención y dejando de estar disponibles para otra actuación correctiva.

9 Reducción en los tiempos de retraso que genere una actuación. Evalúa la reducción del número de averías y la reducción del retraso medio generado por la incidencia.

4 Criterios sociales:

10 Mejora de las medidas de seguridad: La reducción de accidentes causados directa o indirectamente por las infraestructuras ferroviarias.

5 Criterios de categoría de la línea:

11 km recorridos/km: Uso del tramo a lo largo del año 2008, usando la métrica habitual del sector, número de kilómetros recorridos por todos los trenes en el tramo dividido por el número de kilómetros del tramo.

12 Número de pasos a nivel presentes en el tramo, agrupados en varios niveles.

13 Velocidad máxima en el tramo, con los diferentes escalones habituales.

14 Sistema de señalización del tramo, según la definición de ADIF.

6 Criterios de Mejora de uso:

15 Aumento en el número de circulaciones: Toda actuación que permita aumentar el número de circulaciones aumenta la productividad de las instalaciones de una forma directa.

7 Criterios de mejora de las líneas:

18 Número de minutos de retraso por kilómetro acumulados en el tramo.

19 Número de minutos de retraso por kilómetro dividido por el total de circulaciones.

20 Número de incidencias por kilómetro en el tramo.

21 Número de incidencias por kilómetro divididas por el número de circulaciones.

8 Criterios de mejora en costes:

16 Reducción prevista en los costes de mantenimiento por realizar el proyecto previsto.

17 Reducción en costes futuros. Una solución que a priori puede resolver una situación, puede implicar en el futuro sobre-costes muy elevados en tratamientos sucesivos o imposibilite reformas posteriores, convirtiéndose en una limitación importante para el futuro uso de la infraestructura

9 Criterios de eficiencia económica

22 Costes operación futuros. Cambios en los costes de explotación previstos por la realización del proyecto.

23 Costes de mantenimiento futuros: Cambios en los costes de mantenimiento previstos por la realización del proyecto.

24 Costes de realización del proyecto, agrupados en categorías generales. En este nivel de decisión se trabaja con anteproyectos y una estimación del coste real

11 Criterios de desviaciones en el proyecto:

25 Desviación en los costes posible durante la realización del proyecto.

26 Desviación en los resultados posibles durante la realización del proyecto.

3.2 Identificación de Ratings

El Anexo 1 muestra los criterios y los ratings usados para evaluar las alternativas. Los Ratings para cada criterio se obtienen por comparación pareada entre ellos.

3.3 Identificación y evaluación de las alternativas.

En la etapa de síntesis el método ANP se aplica a las subredes. El decisor hace los juicios usando comparaciones pareadas para construir la matriz sin ponderar y ponderada. El Decisor evaluó las 24 alternativas para cada criterio y le dio el correspondiente Rating. Los resultados fueron analizados con el software Superdecisions.

3.4 Resultados.

La Tabla 1 muestra los valores obtenidos de las alternativas con los modelos ANP, AHP y ANP-BOCR. La Figura 1 muestra una representación de los resultados obtenidos con el modelo ANP-BOCR. La Figura 2 muestra una representación de las diferencias de evaluación de cada alternativa según el modelo empleado. La mejor alternativa es la que tiene la mayor puntuación. La Tablas 2 y Tabla 3 muestran la influencia de cada criterio en el resto de criterios de la red y la importancia relativa de cada criterio sobre los demás en el modelo ANP-BOCR (las 4 subredes han sido igualmente ponderadas).

Figura 1: Ordenación obtenida mediante ANP-BOCR

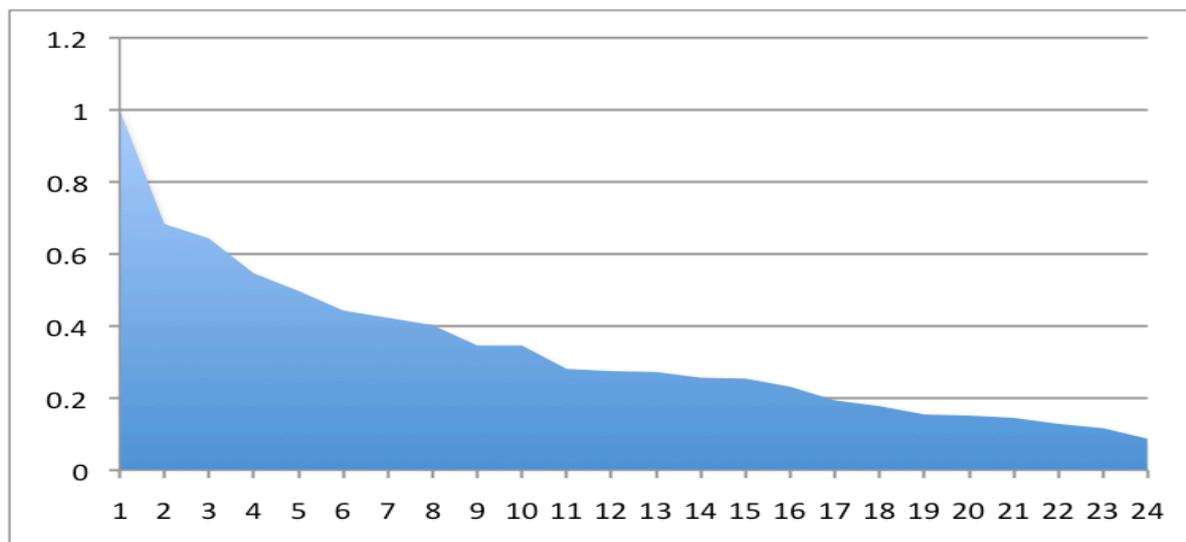


Tabla 1. Resultados obtenidos por los modelos ANP, AHP y ANP BOCR

ANP			AHP		ANP BOCR		
Name	Ideals	Ordenacion	Ideals	Name	Ordenacion	Ideals	Name
32350G	1	1	1	32350X	1	1	31300X
33800P	0,7604	2	0,921883	31050X	2	0,84965	32350X
31300D	0,466181	3	0,843595	33800P	3	0,662593	30802X
32350X	0,395194	4	0,744125	31300X	4	0,599852	32350G
32350A	0,380199	5	0,666213	31300D	5	0,59858	31050X
31050X	0,337922	6	0,652332	32350G	6	0,593204	33800K
31300X	0,316445	7	0,649123	30850R	7	0,565947	30850O
30850R	0,233327	8	0,631141	32300V	8	0,520693	33650H
30850O	0,223818	9	0,629941	32300U	9	0,397113	33800P
30802X	0,197649	10	0,613798	30850O	10	0,378767	31050B
31300N	0,197583	11	0,577203	33800D	11	0,37425	32300U
32300U	0,183049	12	0,574993	31300N	12	0,36838	32150Y
32300V	0,176414	13	0,564718	30802X	13	0,361458	30850I
33800D	0,167587	14	0,51007	33650H	14	0,361458	30850J
33650H	0,158887	15	0,507649	30850J	15	0,259117	32300V
33800K	0,145412	16	0,50657	30850I	16	0,255806	31300N
30850I	0,140073	17	0,492691	32350A	17	0,240972	30850R
30850J	0,140073	18	0,486926	31050B	18	0,237731	33800D
31050B	0,130001	19	0,452659	32150Y	19	0,205953	31300D
32150Y	0,112653	20	0,447606	33800K	20	0,168628	32350A
31250M	0,103035	21	0,271652	33801L	21	0,1374	33801L
31200H	0,080788	22	0,255119	31250M	22	0,123521	31200H
33801L	0,061204	23	0,241832	31200H	23	0,101374	31250M
33801H	0,054238	24	0,232454	33801H	24	0,089398	33801H

Figura 2: Orden de las alternativas en cada sistema de medición

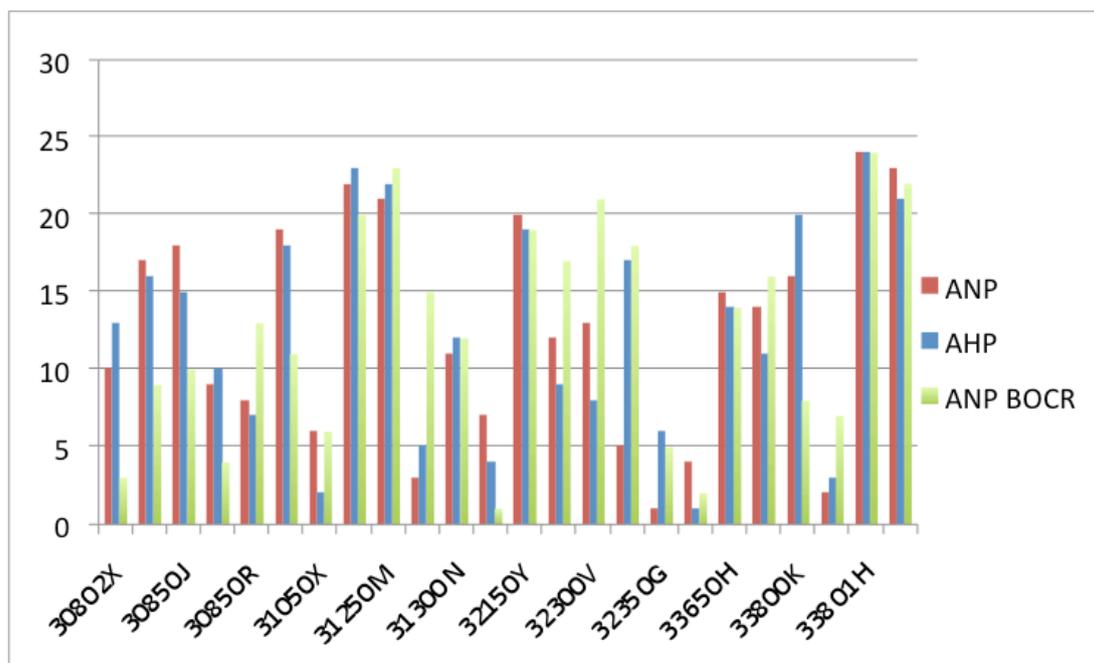


Tabla 2. Pesos de los criterios agrupados en las subredes Beneficios y Oportunidades

Beneficios			Oportunidades		
Criterio	Normalizado por agrupación	Limite	Criterio	Normalizado por agrupación	Limite
1	0,05929	0,008237	11	0,30027	0,068308
2	0,00394	0,000548	12	0,22696	0,051631
3	0,41703	0,057939	13	0,22824	0,051921
4	0,51973	0,072207	14	0,24452	0,055625
5	0,40518	0,182263	18	0,0454	0,009814
6	0,41754	0,187823	19	0,04142	0,008954
7	0,17728	0,079748	20	0,47894	0,103524
8	0,47776	0,015564	21	0,43423	0,09386
9	0,52224	0,017013	8	0,72843	0,259768
10	1	0,001176	15	0,27157	0,096846
11	0,2238	0,084479	16	0,77383	0,154571
12	0,34978	0,132037	17	0,22617	0,045178
13	0,20811	0,078559			
14	0,21831	0,082407			

Tabla 3. Pesos de los criterios agrupados en las subredes Beneficios y Oportunidades

Costes			Riesgos		
Criterio	Normalizado por agrupación	Limite	Criterio	Normalizado por cluster	Limite
11	0,50224	0,12555	11	0,1327	0,068842
12	0,14109	0,03527	12	0,11951	0,061999
13	0,22705	0,056757	13	0,38607	0,200279
14	0,12963	0,032404	14	0,36172	0,187647
22	0,73768	0,55327	23	1	0,029611
23	0,18009	0,135071	25	0,49902	0,225369
24	0,08223	0,061677	26	0,50098	0,226253

3.5 Análisis de Resultados.

Los resultados muestran diferencias significativas en los pesos de los criterios. Esto se debe al hecho de que los resultados en AHP reflejan la importancia dada por el decisor a los criterios individuales mientras que el ANP-BOCR tiene en cuenta las influencias entre criterios.

La importancia de los criterios en AHP esta asignada por el decisor basado en su experiencia y conocimiento. De todos modos, al considerar las influencias entre los criterios,

el grado de importancia de los criterios cambia. Los criterios considerados inicialmente muy importantes por el decisor son ahora menos importantes. En general los criterios que combinan mejoras en la funcionalidad de las instalaciones ganan influencia sobre los criterios de mejora indirectos.

Con respecto a los resultados obtenidos con AHP, las alternativas con las valoraciones mas altas y mas bajas se mantienen en posiciones similares, mientras que son las de valoraciones medias las que mas cambian de posición.

Los criterios con poca influencia en ANP podrían ser suprimidos para simplificar la evaluación de las actuaciones de mejora. De todos modos teniendo en cuenta que los cambios en la valoración de los criterios por parte del decisor puede hacer que estos factores ganen influencia en el futuro, no recomendándose su eliminación

Es importante destacar que los criterios aplicados en el ANP-BOCR se basan en los resultados obtenidos en el modelo AHP, reflejando la mayor experiencia, tanto del decisor como del evaluador en los sistemas de ayuda a la decisión y en el caso particular analizado. Podríamos decir que son unos criterios mas maduros y una evaluación mas meditada, por lo que es de esperar que sean considerados mas adecuados (o mas acordes a sus expectativas) por el decisor.

4. Conclusiones

Este estudio es la continuación de trabajos previos basados en AHP y ANP. En él se presenta un método para priorizar actuaciones de mejora de mantenimiento ferroviario usando modelo basado en ANP-BOCR para analizar la influencia entre criterios.

Los resultados muestran cambios en las prioridades y en el grado de importancia/influencia de los criterios. Los resultados fueron relevantes para el Decisor en cuanto el ANP-BOCR mostró que parte de los criterios considerados tenían influencias muy pequeñas.

Los resultados han sido satisfactorios para el decisor al ajustarse parcialmente a su percepción inicial. Después de un análisis detallado el decisor consideró que los resultados eran consistentes con su experiencia y conocimiento del problema. El decisor también encontró muy interesantes el estudio, aparte del valor de los resultados, por la reflexión sobre el problema que le obligo a hacer. El método ANP-BOCR produce una lista ordenada de proyectos, descartando los menos interesantes de forma eficiente, produciendo una lista de proyectos clave similar a la de AHP.

Una de las ventajas de trabajar por ratings es que no es necesario comprobar que todas las alternativas son óptimos de Pareto. Una alternativa no optima de Pareto nunca se ordenara por delante de su optimo pero sigue siendo preferible a otras alternativas con peor valoración. Dado que lo que buscamos en este caso es proyectos de mejora, proyectos con buena valoración aunque no sean óptimos son preferibles frente a otros óptimos pero en criterios menos importantes.

La ventaja de esta inclusión es que, al realizar un segundo análisis, alguna de las alternativas descartadas inicialmente pueden ser optimas, al haberse eliminado algunas de las alternativas del conjunto (alternativas seleccionadas y ejecutadas en el ciclo de trabajo).

El alto coste de las actuaciones de mejora en el ferrocarril y el hecho de que son inversión con fondos públicos nos obliga a presupuestarlas de la forma mas eficiente posible. ANP-BOCR permite la organización y aplicación sistemática de la información disponible por el decisor. La red de criterios obtenida en esta aplicación es valida para otras zonas o administraciones ferroviarias, debiendo el nuevo decisor recalcular las prioridades mediante comparación pareada para ajustar los pesos a las necesidades particulares de su area o su percepción personal del problema.

Como conclusión, lo más valorado por el decisor fue el disponer de una herramienta que permita el análisis sistemático, estricto y objetivo de los datos disponibles, tanto cuantitativos como cualitativos.

5. Referencias

Baric D., Radazic Z., Cuperic D., (2006), Implementation of multi-criteria decision-making method in selecting the railway line for reconstruction. International Conference on Traffic Science.

Carretero J., Pérez J.M., García-Carballeira F., Calderón A., Fernández J., García J.D., Lozano A., Cardona L., Cotaina L., Prete P. (2003) Applying RCM in large scale systems: a case study with railway networks, Reliability Engineering and System safety, 82, 257-273

Chen E.W.L. & Li H., (2005), Analytic network process applied to Project selection; Journal of construction engineering and management, 131; 459-466.

Gerçek H., Birsen K., Tülay K., (2004); A multiple criteria approach for the evaluation of the rail transport networks in Istanbul; Transportation; 2004; num 31; pag 203-228.

Gervásio H. & Simoes da Silva L. (2012) A probabilistic decision-making approach for the sustainable assessment of infrastructures, Expert systems with applications, 39, 7121-7131.

Saaty, T.L. (2001) Decision making with independence and feedback: The Analytic Network Process. RWS Publications: Pittsburgh.

Saaty, T. L. (2005). Theory and applications of the analytic network process: decision making with benefits, opportunities, cost, and risk. Pittsburgh: RWS Publications.

Smith-Perera A., García-Melón M., Poveda-Bautista R. & Pastor-Ferrando J.P. (2010) A Project Strategic Index proposal for portfolio selection in electrical company based on the Analytic Network Process, Renewable and Sustainable Energy reviews, 14, 1569-1579.

Thomaidis F. & Mavrikis D., (2006), Optimum route of the south transcontinental gas pipeline in SE Europe using AHP, Journal of Multi-Criteria Decision Analysis, 14, 77-88.

Tsamboulas, Dimitrios A., (2007), A tool for prioritising multinational transport infrastructure investments; Transport Policy, 14, 11-26.

Wang W.M., Lee A.H., Wu Z.L., (2010) ANP with BOCR applied to project selection of district revitalization and regeneration, International Conference in Business and Information.

Correspondencia (Para más información contacte con):

Pablo Aragonés-Beltrán.
INGENIO (CSIC-UPV).
Universitat Politècnica de València.
Ciudad Politécnica de la Innovación. Edif 8E 4º
Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, España
Phone: +34 963 877 048
Fax: +34 963 877 991
aragones@dpi.upv.es

Anexo1

Tabla 4. Criterios y ratings usados para evaluar las alternativas

Benefits				Opportunities			
1 Rail Safety Criteria				6 Use Improvement			
1 Reduction in the number of level crossings		2 Improvement of railroad crossing sings		8 Reduction in the number of incidences		14 Increase in the number of trains	
Total	1,000	Muy Alta	1,000	Very High	1,000	Very High	1,000
Parcial	0,401	Alta	0,637	High	0,459	High	0,413
Significativa	0,172	Significativa	0,222	Significant	0,151	Medium	0,234
Indiferente	0,743	Despreciable	0,112	Despreciable	0,076	Low	0,120
Aumento	0,027	Reducción	0,061	Increase	0,076	Very Low	0,110
3 Improvement of driving support systems		4 Automatic control of routes and blocking systems		5 Line Category criteria			
Muy Alta	1,000	Muy Alta	1,000	10 kmtrain/km		11 Level crossings in line	
Alta	0,513	Alta	0,486	Very High	1,000	More than 5	1,000
Significativa	0,254	Significativa	0,483	High	0,512	More than 3	0,376
Despreciable	0,145	Despreciable	0,059	Medium	0,206	At least 1	0,092
Reducción	0,060			Low	0,106	None	0,079
2 Exploitation efficiency criteria				Very Low 0,088 13 Signalling level			
5 Travel Time Reduction		6 Critical Block Reduction		12 Line Speed		ERTMS and ASFA	
Mayor 20%	1,000	Mayor 20%	1,000	Higher than 200 km/h	0,100	BAB/BAU	0,108
Mayor 10%	0,510	Mayor 10%	0,517	Higher than 160 km/h	0,120	BAD	0,219
Mayor 5%	0,252	Mayor 5%	0,256	Higher than 140 km/h	0,158	BLAU	0,389
Menor 1%	0,124	Menor 1%	0,164	Higher than 120 km/h	0,316	None	1,000
Reducción	0,065	Reducción	0,058	100 km/h or Less	1,000		
7 Improvement of operations systems				5 Line Improvement			
Muy Alta	1,000			17 Delays/km		18 Delays/kmtrain	
Alta	0,464			Very High	1,000	Very High	1,000
Significativa	0,208			High	0,618	High	0,604
Despreciable	0,098			Medium	0,254	Medium	0,214
3 Technical efficiency criteria				Low 0,082 Low 0,076 Very Low 0,094			
8 Reduction in the number of incidences		9 Reduction in train delays		19 Incidences/km		20 Incidences/kmtrain	
Mayor 50%	1,000	Mayor 50%	1,000	Very High	1,000	Very High	1,000
Mayor 20%	0,510	Mayor 25%	0,520	High	0,499	High	0,529
Mayor 10%	0,252	Mayor 10%	0,572	Medium	0,237	Medium	0,294
Menor 1%	0,124	Mayor 5%	0,080	Low	0,163	Low	0,092
Aumento	0,065	Aumento	0,059	Very Low	0,109	Very Low	0,086
4 Social criteria				7 Cost Improvement			
10 Improvement of rail safety measures				15 Reduction in maintenance costs		16 Further improvement costs	
Muy Alta	1,000			Very High	1,000	Very High	0,333
Alta	0,510			High	0,538	High	0,333
Significativa	0,252			Significant	0,248	Significant	1,000
Despreciable	0,124			Despreciable	0,222	Despreciable	1,000
Reducción	0,065			Increase	0,098		
5 Line Category criteria				8 Economic efficiency criteria			
10 kmtrain/km		12 Line Speed		21 Future operation costs		22 Future Maintenance costs	
Very High	1,000	Higher than 200 km/h	0,100	Mayor 120%	1,000	Mayor 120%	0,109
High	0,512	Higher than 160 km/h	0,120	Mayor 110%	0,670	Mayor 100 %	0,234
Medium	0,206	Higher than 140 km/h	0,158	Mayor 100%	0,564	Mayor 80%	0,569
Low	0,106	Higher than 120 km/h	0,316	Mayor 80%	0,262	Menor 80%	1,000
Very Low	0,088	100 km/h or Less	1,000	Mayor 60%	0,132		
11 Level crossings in line		13 Signalling level		Menor 50%	0,073		
More than 5	1,000	ERTMS and ASFA	0,108	10 Project Variance			
More than 3	0,376	BAB/BAU	0,108	23 Cost deviation		24 Results Deviation	
At least 1	0,092	BAD	0,219	More than 100%	1,000	More than 75%	1,000
None	0,079	BLAU	0,389	More than 70%	0,448	More than 50%	0,539
		None	1,000	More than 50%	0,174	More than 25%	0,193
				More than 20%	0,199	More than 10%	0,130
				Less than 20%	0,199	Less than 10%	0,099
9 Future Use				5 Line Category criteria			
22 Future Maintenance Costs				10 kmtrain/km		11 Level crossings in line	
Higher than 150%	1,000			Very High	1,000	More than 5	1,000
Higher than 120%	0,824			High	0,512	More than 3	0,376
Higher than 100%	0,354			Medium	0,206	At least 1	0,092
Higher than 80%	0,249			Low	0,106	None	0,079
Less than 80%	0,203			Very Low	0,088	13 Signalling level	
10 Project Variance				23 Project Costs			
23 Cost deviation		24 Results Deviation		12 Line Speed		ERTMS and ASFA	
More than 100%	1,000	More than 75%	1,000	Higher than 200 km/h	0,100	BAB/BAU	0,108
More than 70%	0,448	More than 50%	0,539	Higher than 160 km/h	0,120	BAD	0,219
More than 50%	0,174	More than 25%	0,193	Higher than 140 km/h	0,158	BLAU	0,389
More than 20%	0,199	More than 10%	0,130	Higher than 120 km/h	0,316	None	1,000
Less than 20%	0,199	Less than 10%	0,099	100 km/h or Less	1,000		
9 Future Use				5 Line Category criteria			
21 Future operation costs				10 kmtrain/km		11 Level crossings in line	
Mayor 120%	1,000	Mayor 120%	0,109	Very High	1,000	More than 5	1,000
Mayor 110%	0,670	Mayor 100 %	0,234	High	0,512	More than 3	0,376
Mayor 100%	0,564	Mayor 80%	0,569	Medium	0,206	At least 1	0,092
Mayor 80%	0,262	Menor 80%	1,000	Low	0,106	None	0,079
Mayor 60%	0,132			Very Low	0,088	13 Signalling level	
Menor 50%	0,073			12 Line Speed		ERTMS and ASFA	
10 Project Variance				23 Project Costs			
23 Cost deviation		24 Results Deviation		12 Line Speed		ERTMS and ASFA	
More than 100%	1,000	More than 75%	1,000	Higher than 200 km/h	0,100	BAB/BAU	0,108
More than 70%	0,448	More than 50%	0,539	Higher than 160 km/h	0,120	BAD	0,219
More than 50%	0,174	More than 25%	0,193	Higher than 140 km/h	0,158	BLAU	0,389
More than 20%	0,199	More than 10%	0,130	Higher than 120 km/h	0,316	None	1,000
Less than 20%	0,199	Less than 10%	0,099	100 km/h or Less	1,000		
9 Future Use				5 Line Category criteria			
21 Future operation costs				10 kmtrain/km		11 Level crossings in line	
Mayor 120%	1,000	Mayor 120%	0,109	Very High	1,000	More than 5	1,000
Mayor 110%	0,670	Mayor 100 %	0,234	High	0,512	More than 3	0,376
Mayor 100%	0,564	Mayor 80%	0,569	Medium	0,206	At least 1	0,092
Mayor 80%	0,262	Menor 80%	1,000	Low	0,106	None	0,079
Mayor 60%	0,132			Very Low	0,088	13 Signalling level	
Menor 50%	0,073			12 Line Speed		ERTMS and ASFA	
10 Project Variance				23 Project Costs			
23 Cost deviation		24 Results Deviation		12 Line Speed		ERTMS and ASFA	
More than 100%	1,000	More than 75%	1,000	Higher than 200 km/h	0,100	BAB/BAU	0,108
More than 70%	0,448	More than 50%	0,539	Higher than 160 km/h	0,120	BAD	0,219
More than 50%	0,174	More than 25%	0,193	Higher than 140 km/h	0,158	BLAU	0,389
More than 20%	0,199	More than 10%	0,130	Higher than 120 km/h	0,316	None	1,000
Less than 20%	0,199	Less than 10%	0,099	100 km/h or Less	1,000		