

# Índice

Capítulo 1	Introducción.....	16
1.1.	Antecedentes.....	16
1.2.	Objetivos y resultados.....	19
1.3.	Proceso de elaboración de tesis.....	20
1.4.	Estructura del documento de tesis.....	22
Capítulo 2	El mantenimiento de la infraestructura ferroviaria.....	24
2.1.	Introducción.....	24
2.2.	El sistema Ferroviario Español.....	26
2.3.	Fundamentos de mantenimiento Industrial.....	31
2.4.	Sistemas de mantenimiento aplicados al sector ferroviario.....	36
2.5.	Condiciones de aplicación de los proyectos en el ámbito de la infraestructura ferroviaria.....	38
2.6.	El problema de la selección proyectos de mantenimiento ferroviario.....	39
2.7.	Proceso de toma de decisiones actual y sistemas de apoyo a la decisión utilizados.....	47

Capítulo 3	Proceso de decisión multicriterio y el método AHP/ANP.	50
3.1.	Introducción.	50
3.2.	Proceso de decisión multicriterio.	55
3.3.	Elementos de una decisión multicriterio.	59
3.3.1.	Selección de criterios.	59
3.3.2.	Selección de Pesos.	61
3.3.3.	Alternativas.	62
3.4.	El método AHP. Breve descripción del método AHP.	62
3.5.	El método ANP.	66
3.6.	Valoración de alternativas mediante “Ratings”	73
3.7.	El método ANP/BOCR.	74
3.8.	Evaluación multicriterio de proyectos en el ámbito ferroviario.	76
Capítulo 4	Propuesta de modelos de selección de cartera de proyectos de MR&I ferroviario basado en AHP/ANP.	79
4.1.	Proceso de toma de decisiones.	79
4.2.	Formulación del problema.	81
4.3.	Identificación de las alternativas.	84
4.4.	Identificación y agrupación de los criterios de decisión.	90
4.4.1.	Identificación y agrupación de criterios según el modelo jerárquico.	91
4.4.2.	Técnica de clasificación Post-Hoc. Algoritmo de las K-Medias.	110
4.4.3.	Identificación y agrupación de criterios según el modelo ANP-BC	121
4.4.4.	El modelo ANP-BOCR.	125
4.5.	Criterios del modelo ANP-BOCR.	126
4.5.1.	CSC Criterios de seguridad en la circulación.	126
4.5.2.	CSE Criterios de eficiencia en la explotación.	128
4.5.3.	CET Criterios de eficiencia técnica.	129
4.5.4.	CUS Criterios de utilidad social.	130
4.5.5.	CTV Criterios de categoría de línea.	131
4.5.6.	CMU Criterios de mejora de utilidad.	134

4.5.7.	CMC Criterios de mejoras de Coste. ....	135
4.5.8.	CML Criterios de mejora de la línea.....	136
4.5.9.	CEE Criterios de eficiencia económica. ....	139
4.5.10.	CVP Criterios de variación de proyecto. ....	140
4.5.11.	CUF Criterios de uso futuro.....	142
4.6.	Agrupación de los datos.....	143
<b>Capítulo 5 Ponderación de criterios, valoración de alternativas y priorización 144</b>		
5.1.	Ponderación de criterios. Modelo Jerárquico (AHP).....	145
5.2.	Ponderación de criterios. Modelo ANP-BC.....	149
5.2.1.	Pesos obtenidos en el modelo ANP-BC.....	161
5.2.2.	Comparación de resultados entre AHP y ANP-BC. ....	162
5.3.	Ponderación de criterios con el modelo ANP-BOCR.....	165
5.3.1.	Análisis del peso de los criterios del modelo ANP-BOCR. 165	
5.4.	Ponderación de las categorías. ....	193
5.4.1.	Ponderación de las categorías para la jerarquía AHP y ANP-BC. 193	
5.4.2.	Ponderación de las categorías para ANP-BOCR.....	198
5.5.	Valoración de las alternativas. ....	200
5.5.1.	Valoración de las alternativas según modelo AHP.....	200
5.5.2.	Valoración de las alternativas según el modelo ANP-BC	201
5.6.	Análisis de las valoraciones obtenidas por los proyectos considerados en el modelo ANP-BOCR. ....	205
5.6.1.	Análisis de resultados del ANP-BOCR sobre el conjunto de alternativas.....	206
5.6.2.	Análisis de las valoraciones por Subredes del conjunto total de actuaciones.....	216
5.6.3.	Importancia del tipo de línea y del tipo de proyecto sobre las valoraciones obtenidas.....	224
5.6.4.	Conversión de los proyectos priorizados en una cartera optima. 228	
5.7.	Análisis de Sensibilidad AHP.....	239
5.7.1.	Análisis de sensibilidad de los criterios. ....	239

5.7.2.	Conclusiones del análisis de sensibilidad de la jerarquía AHP.	251
5.8.	Análisis de sensibilidad ANP-BC	251
5.8.1.	Análisis de sensibilidad de las subredes.	253
5.8.2.	Conclusiones del análisis de sensibilidad de la red ANP-BC.	254
5.9.	Análisis de sensibilidad ANP-BOCR	255
5.9.1.	Análisis de sensibilidad de las subredes.	255
5.9.2.	Conclusiones del análisis de sensibilidad de la red ANP-BOCR.	261
Capítulo 6	Conclusiones, aportaciones y líneas de trabajo futuras...	262
6.1.	Conclusiones sobre el análisis multicriterio aplicado a carteras de proyectos de mantenimiento.	262
6.2.	Conclusiones sobre la selección de criterios aplicados en análisis multicriterio de mantenimiento ferroviario.	264
6.3.	Conclusiones sobre el ANP-BC con categorías en análisis multicriterio de mantenimiento ferroviario.	266
6.4.	Conclusiones sobre el ANP-BOCR en análisis multicriterio de mantenimiento ferroviario.	267
6.5.	Resultados obtenidos de una cartera de proyectos reales.	268
6.6.	Resultados obtenidos de la cartera de proyectos.	270
6.7.	Líneas de trabajo futuras.	271
Capítulo 7	Referencias Bibliograficas.	273

## Índice de Figuras.

Figura 1 1 Proceso de elaboración de la tesis.....	22
Figura 2 1 Tipos de mantenimiento. Elaboración propia a partir de (Murty 2002). .....	32
Figura 3 1 Esquema del método AHP. Adaptado de (Aragónés-Beltrán et al., 2014) .....	65
Figura 3 2 Esquema de los pasos del modelo. adaptada de (Aragónés-Beltrán et al., 2014).....	69
Figura 4 1 Proceso de decisión.....	80
Figura 4 2 Ámbito de la Gerencia de mantenimiento de Valencia (ADIF) .....	82
Figura 4 3 Esquema de la jerarquía AHP .....	92
Figura 4 4. Subred de Costes ANP-BC.....	122
Figura 4 5 Subred de Beneficios ANP-BC.....	123
Figura 4 6 Modelo ANP-BC.....	129
Figura 4 7. Grupos de criterios considerados agrupados por subredes. Elaboración propia.....	126
Figura 5 1 Pesos acumulados de los criterios en AHP. Elaboración propia. ....	148
Figura 5 2 Aportación acumulada de cada criterio al total de la subred de beneficios.....	188
Figura 5 3 Aportación acumulada de cada criterio al total de la subred de oportunidades .....	189
Figura 5 4 Aportación acumulada de cada criterio al total de la subred de costes.....	189
Figura 5 5 Aportación acumulada de cada criterio al total de la subred de riesgos.....	190
Figura 5 6 Comparativa de posición en la ordenación según el modelo utilizado.....	204

Figura 5 7 Ordenación de proyectos por valoración y tipo de proyecto .....	207
Figura 5 8 Ordenación de proyectos por valoración y línea.....	209
Figura 5 9 Valoraciones proyectos. El color representa proyectos sobre la misma línea.....	211
Figura 5 10 Densidad de los beneficios de los proyectos y relación con la valoración total. ....	217
Figura 5 11 Densidad de las oportunidades de los proyectos y relación con la valoración total.....	219
Figura 5 12 Densidad de los costes de los proyectos y relación con la valoración total. ....	221
Figura 5 13 Densidad de los riesgos de los proyectos y relación con la valoración total .....	223
Figura 5 14 . Diagrama de cajas y barras de la densidad de las valoraciones conjuntas de cada tipo de proyecto. ....	225
Figura 5 15 Diagrama de cajas y barras de la densidad de las valoraciones conjuntas de cada línea.....	227
Figura 5 16 Alternativas ordenadas, las alternativas eliminadas en color negro.....	233
Figura 5 17 Valoración de los proyectos por líneas, la valoración de los proyectos eliminados en color rojo.....	234
Figura 5 18 Valoración de los proyectos sobre la línea 32300, los proyectos eliminados en color negro .....	235
Figura 5 19 Valoración de los proyectos sobre la línea 31300, los proyectos eliminados en color negro .....	236
Figura 5 20 Valoración por tipo de proyecto, las valoraciones de los proyectos eliminados en color rojo. Elaboración propia.....	238
Figura 5 21 Análisis de sensibilidad del criterio CSC.C1 Reducción de pasos a nivel. ....	240
Figura 5 22 Análisis de sensibilidad del criterio CSC.C2 Señalización de pasos a nivel. ....	242
Figura 5 23 Análisis de sensibilidad del criterio CSC.C3. Mejora sistemas de ayuda a la conducción .....	244
Figura 5 24 Análisis de sensibilidad del criterio CSE.C6 Reducción del cantón crítico. ....	246
Figura 5 25 Análisis del criterio CUS.C26 Mejora comunicación entre municipios.....	248
Figura 5 26 Análisis de sensibilidad del criterio CSC.C4 Automatización de itinerarios y bloqueos. ....	250
Figura 5 27 Análisis de sensibilidad de la Subred de Beneficios en ANP-BC .....	253
Figura 5 28 Análisis de sensibilidad de la subred de costes en ANP-BC .....	254
Figura 5 29 Análisis de sensibilidad de la subred de Beneficios ANP-BOCR.....	257

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

Figura 5 30 Análisis de sensibilidad de la subred de Oportunidades ANP-BOCR.....	258
Figura 5 31 Análisis de sensibilidad de la subred de Costes ANP-BOCR .....	259
Figura 5 32 Análisis de sensibilidad de la subred de Riesgos ANP-BOCR .....	260

## Índice de Tablas.

Tabla 2 1. Extensión de las redes de interés general, elaboración propia en base a la declaración de la red de ADIF.....	26
Tabla 2 2. Coste estimado del tiempo de viaje (€/km) en los países de la UE, a precios del 2002. elaboración propia a partir de (Breu et al., 2008) .....	43
Tabla 3 1. Valores de RI .....	64
Tabla 4 1 Acciones Tipo.....	85
Tabla 4 2 Líneas .....	87
Tabla 4 3 Conversión tipo de línea. ....	113
Tabla 4 4 Conversión velocidad máxima .....	113
Tabla 4 5 Conversión Tipo de carril.....	114
Tabla 4 6 Conversión Tipo de traviesa.....	114
Tabla 4 7 Conversión tipo de LAC.....	115
Tabla 4 8 Conversión tipo de bloqueo.....	115
Tabla 4 9 Conversión tipo de enclavamiento.....	116
Tabla 4 10 Conversión circuito de vía.....	116
Tabla 4 11 Agregación de clusters. Elaboración propia.....	119
Tabla 4 12 Centros de los conglomerados finales.....	121
Tabla 5 1 Pesos locales y globales de los criterios en AHP. ....	146
Tabla 5 2 Pesos acumulados por criterio.....	148
Tabla 5 3 Matriz de influencia en las subred de beneficios del modelo ANP-BC .....	152
Tabla 5 4 Matriz de influencia en la subred de Costes del modelo ANP-BC .....	152
Tabla 5 5 Matriz de comparación local de la subred de Beneficios del modelo ANP-BC.....	155
Tabla 5 6 Matriz de comparación local de la subred de costes del modelo ANP-BC .....	156
Tabla 5 7 Matriz de comparación global de la subred de Beneficios del modelo ANP-BC.....	160
Tabla 5 8 Matriz de comparación global de la subred de costes del modelo ANP-BC.....	160



Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

Tabla 5 9 Pesos de los criterios en la subred de Beneficios del modelo ANP-BC .....	161
Tabla 5 10 Pesos de los criterios en la subred de Costes del modelo ANP-BC .....	162
Tabla 5 11 Pesos de los criterios en AHP y ANP-BC.....	163
Tabla 5 12 Matriz de influencia de la subred de beneficios del modelo ANP-BOCR .....	167
Tabla 5 13 Matriz de influencia de la subred de Oportunidades del modelo ANP-BOCR .....	168
Tabla 5 14 Matriz de influencia de la subred de Costes del modelo ANP-BOCR.....	169
Tabla 5 15 Matriz de influencia de la subred de Riesgos del modelo ANP-BOCR.....	170
Tabla 5 16 Matriz de pesos locales de la subred de beneficios del ANP-BOCR.....	172
Tabla 5 17 Matriz de pesos locales de la subred de Oportunidades del ANP-BOCR .....	174
Tabla 5 18 Matriz de pesos locales de la subred de Costes del ANP-BOCR .....	175
Tabla 5 19 Matriz de pesos locales de la subred de Riesgos del ANP-BOCR.....	176
Tabla 5 20 Matriz de pesos globales de la subred de beneficios del ANP-BOCR.....	178
Tabla 5 21 Matriz de pesos globales de la subred de Oportunidades del ANP-BOCR .....	179
Tabla 5 22 Matriz de pesos globales de la subred de Costes del ANP-BOCR.....	180
Tabla 5 23 Matriz de pesos globales de la subred de Riesgos del ANP-BOCR.....	181
Tabla 5 24 Pesos de los criterios de la subred de Beneficios del ANP-BOCR.....	183
Tabla 5 25 Pesos de los criterios de la subred de Oportunidades del ANP-BOCR.....	185
Tabla 5 26 Pesos de los criterios de la subred de Costes del ANP-BOCR .....	186
Tabla 5 27 Pesos de los criterios de la subred de Riesgos del ANP-BOCR .....	187
Tabla 5 28 Valoración de las categorías utilizadas en el modelo AHP...196	
Tabla 5 29 Valoración de las nuevas categorías empleadas en el modelo ANP-BOCR .....	200
Tabla 5 30 Valoración de las alternativas según AHP. Ordenadas.....	201
Tabla 5 31 Valoración de las alternativas según ANP-BC. Ordenadas ...	202

Tabla 5 32 Comparación entre valoraciones y ordenaciones según modelos AHP y ANP-BC.....	203
Tabla 5 33 Valoración de las alternativas significativas según ANP-BOCR .....	206
Tabla 5 34 Listado de los 10 proyectos con mejor valoración global.....	212
Tabla 5 35 Listado de 10 proyectos con valoración global intermedia.	214
Tabla 5 36 Listado de los 10 proyectos con peor valoración global. ....	215
Tabla 5 37 Proyectos eliminados del listado general .....	232
Tabla 5 38 Valoración de las alternativas en cada Subred .....	252
Tabla 5 39 Valoración de las alternativas según cada subred en ANP-BOCR.....	256

## **Acrónimos utilizados en el texto:**

**ADIF:** Administrador de infraestructuras ferroviarias.

**AHP:** Analytic Hierarchy Process. Proceso analítico jerárquico.

**ANP:** Analytic network process. Proceso analítico en red.

**ASFA:** Anuncio de Señal y frenado automático. Sistema puntual de protección de tren usado en las líneas de ADIF.

**AT:** Analysis team. Equipo de análisis para toma de decisiones multicriterio.

**AVE:** alta velocidad española. Nombre comercial de los servicios ferroviarios de larga distancia de RENFE, por extensión se usa para la infraestructura.

**BAB:** Bloqueo automático banalizado. Sistema de señalización ferroviario en el que se puede circular en ambos sentidos por cualquier vía.

**BAD:** Bloqueo automático en vía doble. Sistema de señalización ferroviario para doble vía en el que cada vía tiene un sentido de circulación preferente.

**BAU:** Bloqueo automático en vía única. Sistema de señalización ferroviario para vía única.

**BLAU.** Bloqueo de liberación automática en vía única. Sistema de señalización ferroviario para vía única donde no se supervisa la presencia del tren en todo el cantón, solo en las entradas y salidas.

**BOCR:** Benefits, Opportunities, Costs and Risks. Beneficios, oportunidades, costes y riesgos.

**BSL:** Bloqueo señalización lateral. Sistema de señalización ferroviario para vía doble utilizado en las líneas de alta velocidad. Similar al BAB pero con funcionalidades diferentes.

**BT:** Bloqueo telefónico. Sistema de gestión de la circulación ferroviaria en el que la autorización de movimiento al tren se da por medio telefónico.

**CBA:** Cost-Benefit analysis. Análisis coste Beneficio.

**CBTC:** Communications based Train control. Sistema de protección automática de tren digital utilizado en las explotaciones de metro, tecnológicamente similar al ERTMS.

**CdV:** circuito de vía. sistema de detección de la presencia de tren en la vía.

**CENELEC:** Comité Européen de Normalisation Electrotechnique, Comité Europeo de Normalización Electrotécnica.

**CR160:** Denominación de una tecnología de línea aérea de contacto para ferrocarriles diseñada por RENFE para velocidades de hasta 160 km/h.

**CR220:** Denominación de una tecnología de línea aérea de contacto para ferrocarriles diseñada por RENFE para velocidades de hasta 220 km/h.

**DM:** Decision maker. Decisor.

**ELECTRE.** ELimination Et Choix Traduisant la REalité, eliminación y elección para expresar la realidad. Método de decisión multicriterio.

**ERTMS:** European Railway Traffic Management System. Sistema europeo de gestión del tráfico ferroviario. Sistema de protección automática de tren para líneas de alta velocidad utilizado por ADIF y RENFE y otras administraciones europeas.

**FEVE:** Ferrocarriles españoles de vía estrecha.

**FFCC:** Ferrocarriles.

**GDSS:** Group Decision Support System. Sistema de apoyo a la decisión en grupo.

**MAMCA:** Multi actor, Multi criteria analysis. Analisis multicriterio multiactor.

**MAUT:** Multi-attribute utility theory, Teoría de la utilidad multiatributo.

**MCDA:** Multi criteria decision analysis. Análisis de la decisión multicriterio.

**MCDM:** Multi criteria decision making. Toma de decisiones multicriterio.

**MDT:** Mean down time. Tiempo medio fuera de servicio.

**MR&I:** Maintenance, renewal and improvement. Mantenimiento, rehabilitación y mejora.

**MTBF:** Mean time between failures. Tiempo medio entre fallos.

**MTTR:** mean time to repair. Tiempo medio hasta reparación.

**MTTR:** mean time to recovery. Tiempo medio fuera de servicio desde el fallo.

**NAFA:** Nuevo acceso ferroviario a Andalucía. Proyecto que se convirtió en la línea de alta velocidad Madrid-Sevilla.

**NCB:** National competence baseline. Bases para la competencia (IPMA)

**PaN:** Paso a nivel.

**PIB:** Producto interior bruto.

**PMBok:** Project Management Body of Knowledge, Fundamentos de Gestión de Proyectos (PMI)

**PROACT:** Problem, Objectives, Alternatives, Consequences, Tradeoffs. Problema, objetivos, alternativas, consecuencias y transacciones. Método de decisión multicriterio.

**PROMETHEE:** Preference Ranking Organization METHod for Enrichment of Evaluations. Metodo multicriterio de ordenación por superación.

**RCM:** Reliability centered maintenance. Mantenimiento centrado en la fiabilidad.

**RENFE:** Antiguamente Red nacional de ferrocarriles. Empresa operadora de transporte ferroviario.

**RS:** Tipo de traviesa ferroviaria de hormigón bloque y con riostra de acero.

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

**TOPSIS:** Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution. Técnica para el orden de preferencia por similitud a la solución ideal. Un método de decisión multicriterio.

**UE:** Unión Europea.

**UIC:** Union Internationale des Chemins de Fer, Unión internacional de ferrocarriles. Junto con un número designa perfiles de carril del estándar internacional, 42,5-45-54-60 y otros.