

## ENFOQUE HÍBRIDO PARA EL APOYO MULTICRITERIO A LA TOMA DE DECISIONES: UNA PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA PRIORIZACIÓN DE ATIVOS FERROVIARIOS EN LA GESTIÓN DE MANTENIMIENTO

Francirlei Ribeiro Barbosa - Especialista em Estratégia de Manutenimento de Rumo – Brasil  
 Flavio Trojan - D.Sc de Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Brasil

### Resumen

La elevada competencia y los requerimientos de los clientes son esenciales para basar las decisiones en la gestión de mantenimiento. En el sector ferroviario, la jerarquización de actividades involucra decisiones complejas que integran criterios objetivos, como datos técnicos, y subjetivos, como la experiencia del personal. En la práctica, decisiones basadas solo en la experiencia o en criterios técnicos pueden ser insuficientes para considerar de forma integrada todas las variables. Este estudio propone un modelo híbrido para la priorización de activos ferroviarios en la gestión de mantenimiento, combinando los métodos AHP (Analytic Hierarchy Process) y TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution). El AHP, desarrollado por Thomas Saaty en los años 1970, ayuda en la estructuración y análisis de problemas complejos, justificando las elecciones de los decisores. Por su parte, el TOPSIS, creado por Hwang y Yoon en 1981, evalúa alternativas por la similitud con la solución ideal. Con base en la revisión sistemática de la literatura y datos de mantenimiento de material rodante de una empresa ferroviaria, fue posible identificar y priorizar los activos críticos, correlacionando criterios. El método híbrido AHP-TOPSIS permitió un análisis completo, alineado con los objetivos de la empresa, como el aumento de la disponibilidad de los trenes, optimizando la precisión de las decisiones y promoviendo una mayor optimización de la operación. Este enfoque se muestra adecuado para integrar aspectos objetivos y subjetivos, contribuyendo significativamente a la gestión de mantenimiento.

### 1. Introducción

Los ferrocarriles buscan mitigar riesgos y asegurar su viabilidad, pero factores externos influyen en sus decisiones, exigiendo nuevos criterios (DEWITT y JONES, 2009). El mantenimiento de activos ferroviarios es crucial para la eficiencia y seguridad, agregando valor y reduciendo desviaciones. Fallas operacionales impactan la producción y logística, requiriendo métodos multicriterio robustos (KING y CROWLEY-SWEET, 2014). Datos de la ANTT (2024) muestran que fallas en material rodante y vía permanente causaron la mayoría de descarrilamientos en Brasil. La investigación busca crear un método híbrido multicriterio para priorizar activos ferroviarios en la gestión de mantenimiento.

### 2. Metodología

2.1 Evaluación de las directrices de la ISO 55000: El énfasis está en lineamientos para el ciclo de vida de los activos. La implementación de la norma promueve el mantenimiento proactivo de los activos, lo que conduciría a un equilibrio en la gestión de los activos y su ciclo de vida, como se muestra en la figura 1.



Figura 1 – Equilibrio en la gestión de activos y su ciclo de vida

Fuente: Adaptado de Amaral (2022)

2.2 Aplicación del método RCM: Evaluación de locomotoras, sus sistemas y subsistemas críticos, conectando una metodología técnico-operacional

(RCM) al cumplimiento de los objetivos de la norma ISO 55000 y la organización.

2.3 Encuesta de síntomas de falla y su criticidad (RCM) desde el sistema de gestión de mantenimiento SAP-PM de un operador ferroviario.

2.4 Opinión de expertos y responsables de estrategias de mantenimiento de locomotoras, para construir la jerarquía de problemas (AHP).

2.5 Revisión sistemática de la literatura, realizada mediante la metodología Methodi Ordinatio (Pagani et al., 2015; 2017) y Pagani et al. (2023) para identificar trabajos relacionados con el tema y su aplicación en Ingeniería Ferroviaria. Inicialmente se recogieron 8964 artículos, de los cuales 8791 fueron filtrados según criterios de relevancia relacionados con el impacto, el número de citas y el año de publicación (InOrdinatio). Luego de aplicar InOrdinatio y leer los artículos, se consideraron 173 artículos en el portafolio final. El objetivo fue estructurar el estado del arte sobre ADMC en el período de 2014 a 2024 y validar teóricamente la elección de criterios relevantes para AHP-TOPSIS, alineando las prácticas más actuales y efectivas de la literatura con el método propuesto.

### 3. Desarrollo

Con un enfoque híbrido, la combinación de métodos permite combinar las ventajas de los métodos, con el objetivo de maximizar la precisión y flexibilidad en los análisis multicriterio, siendo especialmente aplicable en contextos complejos, donde existen múltiples criterios y alternativas. En la figura 2 tenemos un modelo visual de la jerarquía general del método AHP-TOPSIS.

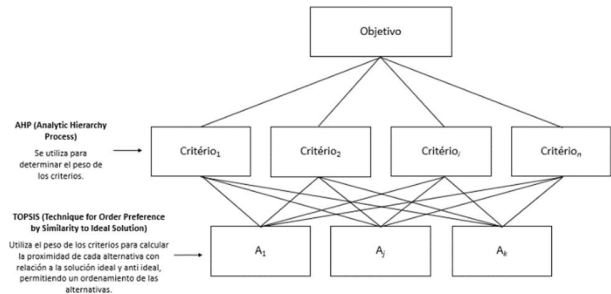


Figura 2 – Jerarquía general del método AHP-TOPSIS  
Fuente: Elaboración propia (2024)

El modelo multicriterio se desarrolló aplicando el método híbrido AHP-TOPSIS, con el objetivo de priorizar los activos en la gestión del mantenimiento. La Figura 3 muestra los macroprocesos.



Figura 3 – Macroprocesos para priorizar los activos ferroviarios en la gestión del mantenimiento y resultados esperados  
Fuente: Elaboración propia (2024)

#### 3.1 ISO 55000

En la evaluación de la norma ISO 55000 se observaron recomendaciones importantes para la gestión de activos, como la definición del concepto de gestión de activos y su alineación con los objetivos estratégicos de la organización. A norma recomienda una política formal de gestão de ativos com objetivos claros, avaliação de riscos ao longo do ciclo de vida, métricas de desempenho, auditorias para assegurar conformidade e um plano de comunicação abrangente para engajar partes interessadas internas e externas. Além disso, destaca a importância de atender regulamentações

aplicáveis e integrar a gestão de ativos a sistemas internos e outras normas, como ISO 9001, ISO 14001 e ISO 31000. Para Polimac e Polimac (2015), a adoção da norma ISO 55000 garantirá aos seus investidores e clientes um auxílio para a organização atingir os seus objetivos de forma eficiente. Para lograr tales beneficios, los procesos deben estar bien fundamentados y alineados con los objetivos de la empresa.

### 3.2 RCM (Reliability-centered maintenance)

RCM se aplicó con el objetivo principal de implementar los principios de la norma ISO 55000, principalmente en el seguimiento y optimización del desempeño de los activos, con énfasis en los siguientes criterios:

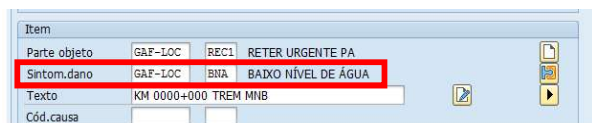
- Evaluación de los modos de falla y sus efectos (FMEA), estableciendo las funciones críticas del activo y conectando el mantenimiento con los objetivos de confiabilidad y disponibilidad requeridos por la organización;
- Evaluación de las consecuencias de las fallas y sus impactos en la seguridad, el medio ambiente y las operaciones, proponiendo estrategias para mitigar los riesgos a lo largo del ciclo de vida de los activos;
- Evaluación de la criticidad de los sistemas y sus componentes en cada fase del ciclo de vida de los activos utilizando el software Reliasoft Weibull++;

### 3.3 Reuniones

Se realizaron reuniones con especialistas y responsables de la estrategia de mantenimiento de locomotoras con el objetivo de estructurar el problema y recoger opiniones mediante el método AHP. Los criterios se definieron con base en la criticidad de los activos (RCM) y los resultados de la revisión sistemática de la literatura. Para definir y jerarquizar el conjunto de criterios se siguió la siguiente secuencia:

- Agenda 1: Presentación del problema de investigación;

- Agenda 2: Identificación de las principales variables involucradas en la decisión;
- Agenda 3: Construcción de la jerarquía de problemas (AHP);
- Agenda 4: Comparación par por par (AHP) de cada criterio, respondiendo a la pregunta “¿Es el criterio A más importante que el criterio B?” definir los pesos de los criterios;
- Agenda 5: Definición de “notas de criticidad” para los síntomas de las notas de mantenimiento extraídas de SAP-PM, indicando que cada síntoma tiene su nivel de importancia o urgencia para la asistencia de mantenimiento. Las “notas de criticidad” se indicaron según la criticidad encontrada en el RCM, siendo aplicables a todos los criterios. La Figura 4 indica el campo de síntomas de la nota;



Item	Parte objeto	GAF-LOC	REC1	RETER URGENTE PA
Sintom,dano	GAF-LOC	BNA	BAIXO NÍVEL DE ÁGUA	
Texto	KM 0000+000 TREM MNB			
Cód.causa				

Figura 4 – Campo de síntomas de nota de mantenimiento (SAP-PM)

Fuente: Elaboración propia (2024)

- Agenda 6: Consolidación de datos: Construcción de la matriz de decisión, cálculo de ponderaciones y análisis de consistencia. La Tabla 1 demuestra los criterios definidos.

Criterio	Acr.	Descrição	Prop.
Notas SAP-PM	C1	Notas de mantenimiento correctivo generadas en el sistema de gestión de mantenimiento SAP-PM	Max.
Reserva	C2	Tarjeta de mantenimiento preventivo caducada (SAP-PM)	Max.
Notas de restricciones operativas de SAP-PM	C3	Notas de mantenimiento correctivo generadas en el sistema de gestión de mantenimiento SAP-PM, indicando que la	Max.

		locomotora debe operar con algún tipo de restricción hasta que se atienda el mantenimiento.	
Seguridad operativa	C4	Notas de mantenimiento generadas en el sistema de gestión de mantenimiento SAP-PM con síntomas relacionados a riesgos o seguridad operacional	Max.
Costo	C5	Costo del posible impacto financiero del síntoma.	Max.
Consumo medio de gasoil	C6	Consumo de gasoil en un tramo concreto	Max.
Flexibilidad operativa	C7	Flexibilidad en relación con la capacidad de reemplazar el activo u operación restringida en una sección determinada.	Min.

Tabla 1 – Definición de criterios  
Fuente: Elaboración propia (2024)

Para definir el peso de los criterios se realizó una comparación por pares a partir de las opiniones planteadas en una reunión con expertos y directivos, mediante un formulario. Los criterios se evaluaron utilizando la escala fundamental de Saaty, como se muestra en la tabla 2.

1/9 = Absolutamente menos importante
1/7 = Muito menos importante
1/5 = Menos importante
1/3 = Um pouco menos importante
1 = Igual importância
3 = Pouco mais importante
5 = Muito mais importante
7 = Bastante mais importante
9 = Extremamente mais importante

Tabla 2 – Escala fundamental de Saaty  
Fuente: Adaptado de Saaty (1980)

Luego de sondear el criterio del equipo, se creó una matriz de evaluación (AHP). Las comparaciones se pueden ver en la tabla 3.

X	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	Auto Vektor	Pesos %
C1	1	1	0,3	0,1	0,1	0,2	0,1	0,3	2%
C2	1	1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1	0,3	2%
C3	3	5	1,0	0,1	0,1	0,2	0,3	0,6	5%
C4	9	9	9	1	3	3	3	4,1	37%
C5	9	9	7	0,3	1	3	3	2,9	26%
C6	5	5	5	0,3	0,3	1	1	1,5	13%
C7	9	7	3	0,3	0,3	1	1	1,5	14%
Σ	37	37	25,5	2,3	5,0	9	8,6	11,1	100%

Tabla 3 – Matriz de comparación por pares  
Fuente: Elaboración propia (2024)

En la tabla 3 también es posible observar la suma de las columnas para normalizar la matriz y el valor del peso de cada criterio. El índice de inconsistencia matricial fue de 0,097, siendo el máximo permitido 0,10. La matriz de evaluación refleja las prioridades percibidas por el equipo, según los pesos establecidos y el índice de consistencia aceptable. El análisis confirma la validez de las comparaciones y la idoneidad del método para el contexto propuesto. Estas ponderaciones se utilizarán para formar la matriz de priorización alternativa en el método TOPSIS.

Luego de calcular las ponderaciones, se creó la matriz de decisión TOPSIS para evaluar las alternativas, como se describe en la tabla 4.

Criterios	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MIN
w	0,02	0,02	0,1	0,4	0,3	0,1	0,1
Locomotora 1	53	5	20	180	2	980	1
Locomotora 2	82	12	169	235	5	5.320	5
Locomotora 3	22	22	88	133	1	2.200	2
Locomotora 4	127	9	42	324	3	1.560	4
Locomotora 5	15	7	69	202	2	3.452	2

Tabla 4 – Matriz de decisión  
Fuente: Elaboración propia (2024)

Para garantizar que todos los valores estén en la misma escala, es necesario normalizar los valores en la matriz de decisión. La tabla 5 muestra los valores normalizados.

Criterios	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MIN
<i>w</i>	0,02	0,02	0,1	0,4	0,3	0,1	0,1
Locomotoras 1	0,3	0,2	0,1	0,4	0,3	0,1	0,1
Locomotoras 2	0,5	0,4	0,8	0,5	0,8	0,8	0,7
Locomotoras 3	0,1	0,8	0,4	0,3	0,2	0,3	0,3
Locomotoras 4	0,8	0,3	0,2	0,6	0,5	0,2	0,6
Locomotoras 5	0,1	0,3	0,3	0,4	0,3	0,5	0,3

Tabla 5 – Matriz normalizada  
Fuente: Elaboración propia (2024)

Luego se ponderaron los valores normalizados, permitiendo estandarizar los valores finales en función de su importancia relativa. La Tabla 6 presenta los números ponderados.

Criterios	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MIN
<i>w</i>	0,02	0,02	0,1	0,4	0,3	0,13	0,14
Locomotoras 1	0,01	0,00	0,01	0,13	0,08	0,02	0,02
Locomotoras 2	0,01	0,01	0,04	0,17	0,20	0,10	0,10
Locomotoras 3	0,00	0,02	0,02	0,10	0,04	0,04	0,04
Locomotoras 4	0,02	0,01	0,01	0,24	0,12	0,03	0,08
Locomotoras 5	0,00	0,01	0,02	0,15	0,08	0,07	0,04

Tabla 6 – Matriz normalizada y ponderada  
Fuente: Elaboración propia (2024)

Después de ponderar los valores, se calcularon las soluciones ideales y antiideales, siendo la solución ideal la más deseable. En esta etapa, es fundamental observar qué criterio se está abordando en el problema, ya sea un criterio de maximización o de minimización. El cálculo se

realizó con base en la matriz normalizada y ponderada y se puede evaluar en la tabla 7.

Criterios	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MIN
<i>w</i>	0,02	0,02	0,1	0,4	0,3	0,13	0,14
Locomotoras 1	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00
Locomotoras 2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
Locomotoras 3	0,00	0,00	0,00	0,02	0,03	0,00	0,00
Locomotoras 4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00
Locomotoras 5	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00

Tabla 7 – Matriz con la solución ideal (SI+)  
Fuente: Elaboración propia (2024)

A continuación se muestra la tabla 8 con los valores de la Matriz con la solución Anti-ideal.

Criterios	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MIN
<i>w</i>	0,02	0,02	0,1	0,4	0,3	0,1	0,1
Locomotoras 1	0	0	0	0	0	0	0,01
Locomotoras 2	0	0	0	0,01	0,03	0,01	0
Locomotoras 3	0	0	0	0	0	0	0
Locomotoras 4	0	0	0	0,02	0,01	0	0
Locomotoras 5	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 8 – Matriz con la solución Anti-ideal (SI-)  
Fuente: Elaboración propia (2024)

Luego de calcular las distancias, en el siguiente paso se determinó el coeficiente de proximidad de cada alternativa con relación a la solución ideal, como se muestra en la tabla 9.

Alternativas	Di+	Di-
Locomotora 1	0,1843	0,0952
Locomotora 2	0,1033	0,1981
Locomotora 3	0,2233	0,0671
Locomotora 4	0,1263	0,1648
Locomotora 5	0,1584	0,1001

Tabla 9 – Coeficiente de proximidad  
Fuente: Elaboración propia (2024)

Las alternativas se clasificaron como se indica en la tabla 10.

Alternativas	Ci	Ranking (Orden)
Locomotora 1	0,3405	4
Locomotora 2	0,6572	1
Locomotora 3	0,2310	5
Locomotora 4	0,5661	2
Locomotora 5	0,3873	3

Tabla 10 – Clasificación de alternativas (Conclusión)  
Fuente: Elaboración propia (2024)

La Tabla 10 indica que se debe priorizar la intervención de mantenimiento o servicio de la locomotora 2, teniendo en cuenta su potencial impacto operativo y económico si el servicio no ocurre antes de que el activo se detenga debido a una falla. Al finalizar el ranking de alternativas, se realizó un análisis de sensibilidad para probar la estabilidad de las decisiones ante cambios en los pesos atribuidos a los criterios, como se muestra en la figura 5.

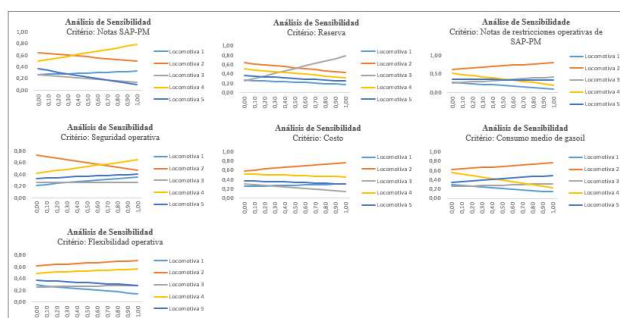


Figura 5 – Análisis de sensibilidad de los criterios  
Fuente: Elaboración propia (2024)

En la Figura 5 se observa que la locomotora 2 presenta una marcada sensibilidad a criterios de coste, consumo medio de gasóleo y flexibilidad

operativa. La locomotora 4 se ve impactada por las Notas SAP-PM y los criterios de seguridad operativa, lo que indica que la posición de las locomotoras 2 y 4 en el ranking cambia significativamente a medida que varía el peso de los criterios indicados. La sensibilidad acentuada puede reflejar una característica fuerte o una debilidad de la locomotora en relación al criterio analizado.

#### 4. Resultados y Discusiones

Esta sección tiene como objetivo presentar los datos recopilados, así como discusiones de los resultados del análisis de contenido extraídos del portafolio de artículos seleccionados para lectura, reuniones con expertos y gerentes de mantenimiento.

##### 4.1 Resultados encontrados a partir da leitura dos artigos

- La priorización de activos en la gestión del mantenimiento se orienta actualmente a: identificar la criticidad, el impacto de las averías y optimizar los recursos, proporcionando una gestión eficiente y estratégica. Normalmente se aplican software o herramientas como Criticality Matrix, RIME Matrix y Criticality Analysis para clasificar los activos teniendo en cuenta su relevancia en relación con la contribución operativa y los riesgos. Estos enfoques evalúan criterios como la recurrencia de fallas (repetitividad), el costo de mantenimiento y el impacto en la producción para indicar prioridades. Métodos como el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) incluyen análisis predictivo y monitoreo continuo apoyado en tecnologías IoT, mejorando la efectividad de la gestión. Estos sistemas permiten intervenciones predictivas y

preventivas, reduciendo costos y aumentando la confiabilidad operativa.

- La aplicación de métodos de soporte a la decisión multicriterio (MCDA) en la gestión del mantenimiento está guiada por la necesidad de evaluar y priorizar alternativas en entornos complejos y dinámicos, que involucran múltiples criterios e intereses diferentes. Los métodos MCDA como AHP (Analytic Hierarchy Process) y PROMETHEE II se utilizan para jerarquizar decisiones, equilibrar factores cualitativos y cuantitativos, optimizando recursos. Se utilizan herramientas computacionales y sistemas basados en IoT para integrar estos métodos, brindando soporte analítico para la toma de decisiones. Además, los avances recientes en blockchain y modelos digitales descentralizados demuestran el potencial de integrar MCDA con otras tecnologías emergentes para mejorar la trazabilidad y confiabilidad de los sistemas de mantenimiento.

#### 4.2 Métodos MCDA

Al evaluar el portafolio de artículos científicos a partir de la combinación de palabras clave con operadores booleanos (MCDM O Análisis de Decisión Multicriterio) Y (Gestión de Activos Y Estrategia de Mantenimiento), se encontraron los métodos MCDA más discutidos por los autores. Los resultados se describen en la tabla 11.

AHP	CARPITELLA, S., KRATOCHVÍL, V. E PIŠTĚK, M. (2024); HOOMAN MOSTOFI CAMARE, D.E.L. (2015); MATHEW, M., CHAKRABORTTY, R.K. E RYAN, M.J. (2022); MOSSISA, S.T., ZHONGWEI, S., TSEGAYE, W.H. E TEKLEMARIAM, E.A. (2023); ORTIZ-BARRIOS, M., BORREGO-AREYANES, A.A., GÓMEZ-VILLAR, I.D., FELICE, F.D., PETRILLO, A., GUL, M. E YUCESAN, M. (2021); REZVANI, S.M.H.S., SILVA, M.J.F. E DE
-----	---

	ALMEIDA, N.M. (2024); V.K. CHAWLA, D., PRIYANSHI GUPTA, A. E SHAIVI NAAZ, V.K. (2021); DA SILVA, S.E., FÁVERO, L.P., MOREIRA, M.Á.L. E DOS SANTOS, M. (2020); DE PAULA VIDAL, G.H., CAIADO, R.G.G., SCAVARDA, L.F., IVSON, P. E GARZA-REYES, J.A. (2022)
ANP	CHEMWENO, P., PINTELON, L., HORENBEEK, A.V. E MUCHIRI, P. (2023); GONZALEZ-URANGO, H., MU, E., UJWARY-GIL, A. E FLOREK-PASZKOWSKA, A. (2024); MILENKOVIĆ, M., DE YUSO, A.M., REALPE, G.L., MUNOZ, M.R. E SAAVEDRA, L. (2024); REEM AHMED A FUZHAN NASIRI A, T. (2021); SHEIKHALISHAHI, M., KARIMI, M. E RAGHEBI, R. (2022)
TOPSIS	GORSKI, E.G., DE FREITAS ROCHA LOURES, E., SANTOS, E.A.P., KONDO, R.E. E MARTINS, G.R.D.N. (2014); MATHEW, M., CHAKRABORTTY, R.K. E RYAN, M.J. (2022); ORTIZ-BARRIOS, M., BORREGO-AREYANES, A.A., GÓMEZ-VILLAR, I.D., FELICE, F.D., PETRILLO, A., GUL, M. E YUCESAN, M. (2021); TURAN, H.H., JALALVAND, F., KAHAGALAGE, S. E SAWAH, S.E. (2021)

Tabla 11 – Métodos MCDA discutidos por los autores  
Fuente: Elaboración propia (2024)

La Tabla 11 presenta los principales métodos ADMC, indicando que el método AHP es el método ADMC más mencionado por los autores entre otros métodos, siendo mencionado en 9 artículos del portafolio. Los artículos indican que AHP se ha aplicado ampliamente en varias áreas, incluida la estrategia de mantenimiento, la gestión de riesgos y seguridad, la planificación, la infraestructura, la sostenibilidad, el medio ambiente y el desarrollo urbano e inmobiliario. Sin embargo, existen desafíos para aplicar el método, como la complejidad computacional, la subjetividad y los sesgos en las evaluaciones y la necesidad de coherencia y validación de los resultados. Estas características apuntan a la versatilidad del método para diferentes contextos de toma de decisiones, pero resaltan la relevancia

de estrategias para mitigar estas limitaciones, optimizando su aplicación.

### 4.3 Criterios para la priorización de activos en la gestión del mantenimiento

Existe una variedad de criterios a considerar en el proceso de toma de decisiones para priorizar activos; esta sección presentará los criterios identificados en el portafolio de artículos. Los resultados obtenidos se describen en la tabla 12.

Criterios	Subcriterios	Autores
Técnicos	Fiabilidad, disponibilidad, rendimiento operativo, historial de fallos.	SYED, Z.; LAWRYSHYN, Y. (2020); AHMED, R.; ZAYED, T. (2021); SHEIKHALISHAHI, M. et al. (2019); VIDAL, G. H. P. et al. (2022); HU, H. et al. (2020); RAMOS-SALGADO, C. et al. (2021); DERAK, M. et al. (2023); NASRFARD, F. et al. (2022); CRIVELLARI, A. et al. (2021); VILARINHO, H. et al. (2023); YOUSAF, A. et al. (2024); HUANG, Y. et al. (2023); FILOSA, C. et al. (2024); MISHRA, R. et al. (2024); EINABADI, B. et al. (2023)
Económico y Financiero	Costo del ciclo de vida (LCC), costo de mantenimiento y operación, retorno de la inversión (ROI)	VIDAL, G. H. P. et al. (2022); AHMED, R.; ZAYED, T. (2021); PETCHROMPO, S.; PARLIKAD, A.K. (2019); HUANG, Y. et al. (2023); SYED, Z. et al. (2020); MISHRA, R. et al. (2024); CRIVELLARI, A. et al. (2021); FILOSA, C. et al. (2024);

		RAMOS-SALGADO, C. et al. (2021); DERAK, M. et al. (2023); NASRFARD, F. et al. (2022); HU, H. et al. (2020); EINABADI, B. et al. (2023)
Medioambiente e y Sostenibilidad	Eficiencia energética, impacto ambiental, cumplimiento normativo	SHEIKHALISHAHI, M. et al. (2019); SYED, Z.; LAWRYSHYN, Y. (2020); AHMED, R.; ZAYED, T. (2021); MISHRA, R. et al. (2024); CRIVELLARI, A. et al. (2021); VILARINHO, H. et al. (2023); HUANG, Y. et al. (2023); DERAK, M. et al. (2023); EINABADI, B. et al. (2023); HU, H. et al. (2020)
Riesgo y seguridad	Análisis de riesgos, seguridad operativa, impacto en sistemas críticos.	SYED, Z.; LAWRYSHYN, Y. (2020); VIDAL, G. H. P. et al. (2022); SHEIKHALISHAHI, M. et al. (2019); YOUSAF, A. et al. (2024); HU, H. et al. (2020); RAMOS-SALGADO, C. et al. (2021); DERAK, M. et al. (2023); EINABADI, B. et al. (2023); CRIVELLARI, A. et al. (2021); HUANG, Y. et al. (2023); MISHRA, R. et al. (2024); FILOSA, C. et al. (2024); NASRFARD, F. et al. (2022)
Organizacional y Estratégico	Criticidad operativa, flexibilidad y redundancia, alineación estratégica.	AHMED, R.; ZAYED, T. (2021); PETCHROMPO, S.; PARLIKAD, A.K. (2019); VIDAL, G. H. P. et al. (2022);



		CRIVELLARI, A. et al. (2021); FILOSA, C. et al. (2024); HUANG, Y. et al. (2023); MISHRA, R. et al. (2024); RAMOS-SALGADO, C. et al. (2021); DERAK, M. et al. (2023); EINABADI, B. et al. (2023)
--	--	---

Tabla 12 – Criterios para priorizar activos en la gestión de mantenimiento

Fuente: Elaboración propia (2024)

De acuerdo con la tabla 12, los criterios mencionados fueron criterios técnicos, mencionados en 15 artículos; los criterios económicos y financieros, mencionados en 14 artículos; criterios ambientales y de sostenibilidad, mencionados en 10 artículos; los criterios de riesgo y seguridad, mencionados en 13 artículos; y el criterio organizativo y estratégico, mencionado en 11 artículos. Los beneficios de considerar múltiples criterios en el proceso de toma de decisiones incluyen mejorar la confiabilidad y disponibilidad operativa, reducir los costos del ciclo de vida de los activos, maximizar el retorno de la inversión y la eficiencia energética. Este enfoque también fortalece la planificación estratégica, alineando las decisiones con los objetivos organizacionales y promoviendo una mayor competitividad y sostenibilidad en el sector ferroviario. Sin embargo, como indican los estudios, este proceso puede requerir un gran volumen de datos, herramientas analíticas avanzadas y elevadas inversiones iniciales, lo que implica altos costos y más tiempo para el análisis. Además, es fundamental mantener criterios y parámetros constantemente actualizados para dar cabida a variaciones operativas o tecnológicas, aunque esto pueda incrementar la carga administrativa y dificultar la estandarización de decisiones a lo largo del tiempo. La implementación de métodos híbridos enfrenta desafíos adicionales, como limitaciones

tecnológicas y analíticas, así como costos significativos. Según Vidal et al. (2022), los métodos híbridos demandan infraestructura tecnológica avanzada y capacitación especializada, lo que representa barreras financieras para organizaciones con recursos limitados. Einabadi y otros. (2023) destaca que las limitaciones tecnológicas están relacionadas con la dependencia de modelos computacionales complejos y software especializado, requiriendo una infraestructura robusta para su aplicación.

## 5. Conclusión

Esta investigación propuso un enfoque híbrido para el apoyo a la toma de decisiones multicriterio, combinando los métodos AHP y TOPSIS, orientado a priorizar los activos ferroviarios en la gestión del mantenimiento. La combinación de estos métodos permite superar los desafíos asociados a la toma de decisiones en entornos operativos complejos, con foco en confiabilidad, costo y disponibilidad. El modelo propuesto demostró efectividad al integrar criterios objetivos y subjetivos, alineándose con la realidad operacional de los ferrocarriles. La aplicación de la metodología RCM fue decisiva en la identificación de sistemas críticos, mientras que el uso integrado de AHP y TOPSIS permitió priorizar criterios y jerarquizar alternativas de forma coherente y eficiente. Desde un punto de vista académico, la investigación contribuye a abordar las lagunas existentes en la literatura sobre métodos híbridos aplicados a la gestión del mantenimiento ferroviario, consolidando una propuesta que pueda ser adaptada a otros sectores industriales. En el contexto corporativo, la metodología ofrece una herramienta práctica para promover decisiones informadas, alineadas con objetivos estratégicos y sostenibles, fortaleciendo la transparencia y la planificación de largo plazo. Si bien los resultados demuestran la robustez del modelo, cabe destacar el potencial de mejora con la adopción de tecnologías como Big Data y Machine Learning, que pueden ampliar la

capacidad de análisis predictivo y adaptación a escenarios dinámicos. También se recomienda que el modelo se aplique a otros segmentos del sector ferroviario para probar su aplicabilidad en diferentes contextos operativos. Se concluye que el uso de métodos híbridos MCDA en la priorización de activos ferroviarios en la gestión del mantenimiento representa una solución eficiente, capaz de enfrentar los desafíos del sector y contribuir a la eficiencia y sostenibilidad de las operaciones de forma práctica y replicable.

## 6. Expresiones de gratitud

Al CNPq por el apoyo financiero para hacer posible la publicación de este trabajo.

## Referencias

- [1] A Crivellari, S Bonvicini, A Tugnoli, V Cozzani. Multi-target Inherent Safety Indices for the Early Design of Offshore Oil&Gas Facilities. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.10.010>. Acesso em: 05 dez. 2024.
- [2] AMARAL, Celso Peck. Como a Gestão de Ativos Reflete na Gestão da Manutenção Tradicional. *Estratégia*, Curitiba, 19 de julho de 2022. Disponível em: <https://apeck.com.br/como-a-gestao-de-ativos-reflete-na-gestao-da-manutencao-tradicional/>. Acesso em: 24 jun. 2024.
- [3] ANTT (Agência Nacional de Transportes Terrestres) – Acidentes Ferroviários, 2024. Disponível em: <https://dados.antt.gov.br/dataset/relatorio-de-acompanhamento-de-acidentes-ferroviarios-raaf>. Acesso em: 05 jul. 2024
- [4] Awais Yousaf Ahmed Amro, P.T.H. M. J.. Cyber risk assessment of cyber-enabled autonomous cargo vessel. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2024.100695>. Acesso em: 20 dez. 2024.
- [5] Carpitella, S., Kratochvíl, V. and Pištěk, M.. Multi-criteria decision making beyond consistency: An alternative to AHP for real-world industrial problems. *Computers & Industrial Engineering*, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110661>. Acesso em: 20 dez. 2024.
- [6] Chemweno, P., Pintelon, L., Horenbeek, A.V. and Muchiri, P.. ESG disclosure and technological innovation capabilities of the Chinese listed companies. *International Journal of Production Economics*, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.03.017>. Acesso em: 20 dez. 2024.
- [7] Chin, H.H., Varbanov, P.S., Klemeš, J.J., Benjamin, M.F.D. and Tan, R.R.. Asset maintenance optimisation approaches in the chemical and process industries - A review. *Chemical Engineering Research and Design*, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2020.09.034>. Acesso em: 20 dez. 2024.
- [8] Da Silva, S.E., Fávero, L.P., Moreira, M.Â.L. and dos Santos, M.. Proposal of a diversified investment portfolio in stocks: An approach to AHP-Gaussian method. *Procedia Computer Science*, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.07.056>. Acesso em: 17 dez. 2024.
- [9] De Paula Vidal, G.H., Caiado, R.G.G., Scavarda, L.F., Ivson, P. and Garza-Reyes, J.A.. Decision support framework for inventory management combining fuzzy multicriteria methods, genetic algorithm, and artificial neural network. *Computers & Industrial Engineering*, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108777>. Acesso em: 03 dez. 2024.

[10] Derak, M., Silva, E., Climent-Gil, E., Bonet, A., López, G. and Cortina-Segarra, J.. Multicriteria analysis of critical areas for restoration in a semiarid landscape: A comparison between stakeholder groups. *Journal of Environmental Management*, 2021. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117545>.

Acesso em: 12 dez. 2024.

[11] DeWitt, NT, & Jones, JJB (2009). *Asset Maintenance Management: A Guide to Decision Making and Planning*. McGraw-Hill Education.

[12] Einabadi, B., Mahmoodjanloo, M., Baboli, A. and Rother, E.. Dynamic predictive and preventive maintenance planning with failure risk and opportunistic grouping considerations: A case study in the automotive industry. *Journal of Manufacturing Systems*, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.06.012>.

Acesso em: 02 dez. 2024.

[13] Filosa, C., Jovanovic, M., Agostini, L. and Nosella, A.. Pivoting B2B Platform Business Models: From Platform Experimentation to Multi-Platform Integration to Ecosystem Envelopment. *International Journal of Production Economics*, 2024. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2024.109466>.

Acesso em: 18 dez. 2024.

[14] Gonzalez-Urango, H., Mu, E., Ujwary-Gil, A. and Florek-Paszowska, A.. Analytic network process in economics, finance and management: Contingency factors, current trends and further research. *Expert Systems with Applications*, 2024. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121415>.

Acesso em: 08 dez. 2024.

[15] Gorski, E.G., de Freitas Rocha Loures, E., Santos, E.A.P., Kondo, R.E. and Martins, G.R.D.N.. A decision support system for stock investment recommendations using collective wisdom. *Journal of Industrial Information*

Integration, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jii.2021.100278>. Acesso em: 14 dez. 2024.

[16] Hooman Mostofi Camare, D.E.L.. Adaptation analysis for environmental change in coastal communities. *Socio-Economic Planning Sciences*, 2015. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.seps.2015.06.003>.

Acesso em: 20 dez. 2024.

[17] KING, T.M., CROWLEY-SWEET, D. Best practice for data quality enables asset management for rail. *IET Conference Publications*, 2014. Disponível em: <https://digital-library.theiet.org/doi/10.1049/cp.2014.1036?doi=10.1049%2Fcp.2014.1036>. Acesso em: 05 jul. 2024

[18] Mathew, M., Chakraborty, R.K. and Ryan, M.J.. Selection of an Optimal Maintenance Strategy Under Uncertain Conditions: An Interval Type-2 Fuzzy AHP-TOPSIS Method. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2022. Disponível em: 10.1109/TEM.2020.2977141. Acesso em: 10 dez. 2024.

[19] Milenković, M., de Yuso, A.M., Realpe, G.L., Munoz, M.R. and Saavedra, L.. A holistic approach to introducing a light electric freight vehicle (LEFV) system in a historic urban environment: The case of Quito. *Research in Transportation Business & Management*, 2024. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2024.101157>.

Acesso em: 18 dez. 2024.

[20] Mishra, R., Singh, R.K., Daim, T.U., Wamba, S.F. and Song, M.. Integrated usage of artificial intelligence, blockchain and the internet of things in logistics for decarbonization through paradox lens. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2024.103684>. Acesso em: 09 dez. 2024.

[21] Mosissa, S.T., Zhongwei, S., Tsegaye, W.H. and Teklemariam, E.A.. Prioritization of green infrastructure planning principles using analytic hierarchy process: The case of Addis Ababa. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.127965>. Acesso em: 09 dez. 2024.

[22] Nasrfard, F., Mohammadi, M. and Rastegar, M.. Probabilistic optimization of preventive maintenance inspection rates by considering correlations among maintenance costs, duration, and states transition probabilities. *Computers & Industrial Engineering*, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108619>. Acesso em: 10 dez. 2024.

[23] Ortiz-Barrios, M., Borrego-Areyanes, A.A., Gómez-Villar, I.D., Felice, F.D., Petrillo, A., Gul, M. and Yucesan, M.. A multiple criteria decision-making approach for increasing the preparedness level of sales departments against COVID-19 and future pandemics: A real-world case. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102411>. Acesso em: 20 dez. 2024.

[24] PAGANI, Regina Negri; KOVALESKI, João Luiz; RESENDE, Luis Mauricio Martins de; SALVATORI, Ricardo; LIMA, Daniel Vieira. *Methodi Ordinatio 2.0: Revisited under statistical estimation, and presenting FInder and RankIn. Quality & Quantity*, v. 57, n. 5, p. 4563-4602, 2023.

[25] PAGANI, Regina Negri; KOVALESKI, João Luiz; RESENDE, Luis Mauricio. *Methodi Ordinatio: a proposed methodology to select rank relevant scientific papers encompassing the impact factor, number of citation, and year of publication. Scientometrics*, v. 105, n. 3, p.2109-2135, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11192-015-1744-x>. Acesso em: 28 set. 2024.

[26] POLIMAC, V.; POLIMAC, J. *Holistic approach to asset management with new ISO 55000*. IET Conference Publications, 2015. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7885365>. Acesso em: 12 jan. 2025.

[27] Ramos-Salgado, C., Muñozuri, J., Aparicio-Ruiz, P. and Onieva, L.. A decision support system to design water supply and sewer pipes replacement intervention programs. *Reliability Engineering & System Safety*, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.107967>. Acesso em: 20 dez. 2024.

[28] Reem Ahmed a Fuzhan Nasiri a, T.. A novel Neutrosophic-based machine learning approach for maintenance prioritization in healthcare facilities. *Journal of Building Engineering*, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102480>. Acesso em: 19 dez. 2024.

[29] Rezvani, S.M.H.S., Silva, M.J.F. and de Almeida, N.M.. NETOBRA: Boosting Urban Resilience through a digital platform for the construction ecosystem. *Procedia Structural Integrity*, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.02.010>. Acesso em: 08 dez. 2024.

[30] Sanyapong Petchrompo, A.K.P.. A review of asset management literature on multi-asset systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.res.2018.09.009>. Acesso em: 19 dez. 2024.

[31] Sheikhalishahi, M., Karimi, M. and Raghebi, R.. Combinatorial optimization of petrochemical plants by asset integrity management indicators. *Process Safety and Environmental Protection*, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.05.017>. Acesso em: 18 dez. 2024.

[32] V.K. Chawla, D., Priyanshi Gupta, A. and Shaivi Naaz, V.k.. Evaluation of green operations management by fuzzy analytical hierarchy process. *Materials Today: Proceedings*, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.200>. Acesso em: 01 dez. 2024.

[33] Vilarinho, H., D’Inverno, G., Nóvoa, H. and Camanho, A.S.. Performance analytics for regulation in retail water utilities: Guiding asset management by identifying peers and targets. *Utilities Policy*, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jup.2023.101559>. Acesso em: 10 dez. 2024.

[34] Zaki Syed, Y.L.. Multi-criteria decision-making considering risk and uncertainty in physical asset management. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104064>. Acesso em: 13 dez. 2024.

[35] ZHANG, L.; CHEN, Y. AHP-TOPSIS as a preferred approach in multi-criteria decision making. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, v. 29, n. 1, p. 130-145, 2021.

### Hojas de vida:

Francirlei Barbosa: Soy ingeniero de producción con más de 10 años de experiencia en gestión de activos con foco en confiabilidad, planificación y control de mantenimiento (PCM) en las industrias multinacionales de alimentación, almacenamiento, ferrocarriles, logística y movilidad urbana. Actualmente soy especialista en Estrategia de Mantenimiento en Rumo, el mayor operador ferroviario de América Latina, donde trabajo en ingeniería de locomotoras con foco en la definición de estrategias de mantenimiento y simulaciones.

Flavio Trojan: Es Doctor en Ingeniería de Producción por la UFPE – Universidad Federal de

Pernambuco – PPGEP (2012). Máster en Ingeniería de Producción por la UTFPR - PPGEP (2006), Especialización en Gestión Industrial por el CEFET-PR (2004), Licenciatura en Ciencias Económicas por la Universidad Estatal de Ponta Grossa - UEPG (2001), Licenciatura en Tecnología Electrónica (Automatización Industrial) por el CEFET-PR (2003). Es profesor de los cursos de pregrado en Ingeniería Electrónica y Tecnología de Automatización Industrial de la UTFPR. Profesor colaborador del Programa de Postgrado en Ingeniería de Producción (PPGEP - Campus Ponta Grossa) y profesor permanente del Programa de Postgrado en Ingeniería de Producción y Sistemas (PPGEPS - Campus Pato Branco). Trabajó como mantenedor del Sistema de Automatización de la Compañía de Saneamiento de Paraná (2001-2008) y fue Profesor Colaborador de la Universidad Estadual de Ponta Grossa - UEPG (2007). Tiene experiencia en el área de Ingeniería de Producción con los temas: Investigación Operacional, Soporte a la Decisión y Decisión Multicriterio e Ingeniería Eléctrica, con énfasis en Automatización Industrial, actuando principalmente en los siguientes temas: Informática Industrial, Automatización, Sistemas de Supervisión, Control de Procesos, Saneamiento Básico, Gestión del Mantenimiento, Tecnología de la Información y también experiencia en Economía con los temas: Crecimiento Económico Brasileño, Economía Matemática y Estadística Económica.

Nombre: Francirlei Barbosa

Teléfono:

- Celular: +55 21 96741-9826
- Curitiba – PR, Brasil