

Evaluación mediante Proceso Analítico Jerárquico de diseños conceptuales para el mantenimiento de aires acondicionados del sistema Metrobús del Metro de Caracas

Evaluation using the Analytic Hierarchy Process of a conceptual design for the maintenance of air conditioners in the Metrobús system of the Caracas Metro

Historial del Artículo /
Article History
Recibido / Received:
28-11-2025
Revisado / Revised:
12-12-2025
Aceptado / Accepted:
25-01-2026
publicado en línea /
Published online:
05-03-2026

Pedro Viggiani ^{1,a,*} • Julio Kumquel^{1,a} • Santiago Hernández^{1,a} • Manuel Serafín ^{2,a}

¹Departamento de Ingeniería Mecánica, Vicerrectorado "Luis Caballero Mejías", Universidad Nacional Experimental Politécnica "Antonio José de Sucre" (UNEXPO-LCM), Caracas, Venezuela

²Departamento de Ciencias Básicas, Vicerrectorado "Luis Caballero Mejías", Universidad Nacional Experimental Politécnica "Antonio José de Sucre" (UNEXPO-LCM), Caracas, Venezuela

* ✉ Autor de la Correspondencia / corresponding author: pvgiggiani@unexpo.edu.ve / pedro.viggiani@gmail.com

^a Estos autores contribuyeron por igual en este trabajo / These authors contributed equally to this work

Resumen

En este trabajo se presentan cuatro diseños conceptuales de sistemas para facilitar las labores de mantenimiento de las unidades de aire acondicionado de los autobuses del sistema Metro de Caracas (Metrobús). Se muestran representaciones tridimensionales de cada una de ellas y se explica su funcionamiento, virtudes y defectos de manera detallada. Con la finalidad de elegir la más idónea de estas soluciones se utilizó la metodología del proceso analítico jerárquico (AHP), para lo cual, primero fueron definidos un conjunto de criterios de evaluación, y luego, se determinó mediante juicio de expertos, la importancia relativa de cada uno de ellos respecto a los demás, así como también, la preferencia relativa de cada una de las alternativas conceptuales de diseño con respecto a las restantes. El método de AHP permitió sintetizar las valoraciones emitidas en un ordenamiento de todos los diseños conceptuales, asociados a un factor de ponderación normalizado, que representará la idoneidad de cada solución para la compañía Metro de Caracas.

Palabras clave: Diseño Conceptual; Proceso Analítico Jerárquico; AHP; Mantenimiento; Unidades de Aire Acondicionado; Toma de decisiones.

Abstract

In this work four conceptual designs are presented, designed in order to make easier the maintenance of buses' air conditioning units owned by Metro de Caracas (trade-named as "Metrobús"). Three-dimensional representations of every solution proposed is shown, their operation, attributes and defects are also explained in details. Analytic Hierarchy Process (AHP) was applied in order to select the more suitable solution implying defining several criteria and eliciting experts' judgment to make paired comparison both each criteria and each conceptual solution, the last group by means of the relative importance of each solution relating to each criteria. The AHP's outcome is an ordered array of each conceptual solution proposed by means of the preference synthesized from the experts' judgment.

Keywords: Conceptual Design; Analytic Hierarchy Process; AHP; Maintenance; Air Conditioning Units; Decision Making.

1. Introducción

La Toma de Decisiones Multicriterio (MCDM, Multi-criteria decision making por sus siglas en inglés) es un área de estudio fundamental de la investigación de operaciones contemporánea que permite resolver problemas de optimización del mundo real mediante la evaluación de múltiples alternativas frente a criterios heterogéneos y, que a menudo resultan contradictorios. A diferencia de los enfoques tradicionales centrados en una única función objetivo, el marco MCDM captura las dimensiones críticas de un proyecto para determinar lógicamente la ponderación de las métricas según las preferencias del responsable de la toma de decisiones. En este sentido, [Taherdoost y Madanchian \(2023\)](#) afirman que este enfoque, por una parte, destaca como uno de los más precisos para la toma de decisiones y, por otra, representa una revolución en el campo, al permitir la integración sistemática de factores cualitativos y cuantitativos. De acuerdo con [Mardani et al. \(2015\)](#), esto facilita una clasificación jerárquica que identifique la mejor solución.

Existe una amplia variedad de métodos en esta área, tales como la Solución Combinada de Compromiso (CoCoSo), la Toma de Decisión Interactiva Multicriterio (TODIM), la Evaluación Basada en la Distancia a la Solución Media (EDAS), el Análisis de Valoración de Peso Escalonado (SWARA), la Evaluación Proporcional Compleja (COPRAS), el Método Mejor-Peor (BWM), la Puntuación de Dominancia Mejorada Ganada y Perdida (GLDS), así como la Optimización Multiobjetivo sobre Base en Análisis de Razones (MOORA), la Comparación de Área de Aproximación de Borde Multi-Atributiva (MABAC), la Agregación Múltiple Basada en Doble Normalización (DNMA), la Evaluación de Razón Aditiva (ARAS), el Análisis Comparativo Ideal-Real Multiatributo (MAIRCA), la Evaluación Ponderada del Producto Agregado (WASPAS), así como la Optimización Multiobjetivo mediante Análisis de Razón más la Forma Multiplicativa Completa (MULTIMOORA), la Evaluación Combinativa Basada en Distancias (CODAS), y finalmente el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) ([Moslem, et al. 2023](#)).

Sin embargo, el método de Proceso Analítico Jerárquico (AHP, Analytic Hierarchy Process por sus siglas en inglés) destaca por su capacidad para clasificar alternativas mediante una estructura jerárquica robusta. El mismo fue desarrollado por [Saaty \(Saaty, 1977; Saaty, 1980; Saaty, 1988\)](#), y ha sido extensamente validado en aplicaciones globales debido a su simplicidad, versatilidad y mayor precisión ([Ho, 2008; Khaira, y Dwivedi, 2018; Leal, 2020, Kaushik et al., 2024](#)). Estas aplicaciones van desde bancos, sistemas de fabricación, evaluación de operadores, selección de fármacos, selección de emplazamiento, evaluación de software, evaluación del rendimiento del sitio web, selección de estrategias, selección de proveedores, selección de tecnología de reciclaje, evaluación de competencias de las empresas, selección de armas, selección de métodos de minería subterránea y su evaluación de sostenibilidad, evaluación del desempeño organizativo, reclutamiento de personal, selección de métodos de construcción, selección, evaluación tecnológica, planificación de rutas,

selección de proyectos, valoración de requisitos del cliente, selección energética, evaluación universitaria, estudio de transporte y muchos otros ([Ishizaka y Labib, 2011](#)).

Particularmente en el sector transporte, el método de AHP ha demostrado ser eficaz para abordar: problemas de desarrollo sostenible del transporte urbano, el desarrollo de servicios de transporte público, problemas relacionados con los servicios generales de transporte público, las estrategias de transporte sostenible, los sistemas de transporte, los proyectos de transporte urbano y la movilidad sostenible, logística, planificación del transporte, calidad del servicio de transporte, transporte de mercancías, seguridad vial, transporte ferroviario ([Moslem, et al. 2023](#)).

En cuanto al contexto local, la investigación se desarrolla en la Compañía Anónima Metro de Caracas (CAMETRO) referida en lo sucesivo como Metro de Caracas, compuesto por un sistema de transporte extenso y complejo esencial para la movilidad capitalina de Venezuela. Este sistema está constituido, además de su recurso humano, por una infraestructura fija de estaciones, túneles, vías férreas, estaciones eléctricas, así como también por una infraestructura móvil: trenes, funiculares (Metrocable) y una flota de transporte masivo superficial conocida como Metrobús.

Este último, forma un sistema crítico cuya infraestructura móvil incluye unidades de Metrobús que extienden el alcance del servicio brindado por el sistema al funcionar como enlace para una gran cantidad de personas. Un componente vital de estas unidades es el sistema de aire acondicionado ubicado en el techo, cuya posición actual dificulta el acceso y genera riesgos laborales significativos durante el mantenimiento rutinario. Ante la falta de infraestructura apropiada, el personal debe realizar maniobras peligrosas que comprometen tanto su integridad física como la estructura de los Metrobuses.

Para solventar esta problemática, el presente trabajo aplica el método AHP en la evaluación de cuatro diseños conceptuales de sistemas orientados a facilitar las tareas de mantenimiento, montaje y desmontaje de dichas unidades con el objetivo de optimizar los planes de mantenimiento de la compañía, logrando un ahorro sustancial en horas-hombre y mejorando las condiciones ergonómicas y de seguridad del personal encargado.

2. Proceso Analítico Jerárquico (AHP)

2.1. Definición

El Proceso Analítico Jerárquico (AHP) es un modelo científico y robusto de Toma de Decisiones Multicriterio (MCDM) que sistematiza la resolución de problemas complejos mediante la integración de variables cuantitativas y cualitativas. Su metodología se fundamenta en la descomposición de un problema global en una estructura jerárquica de objetivos, criterios y alternativas, empleando comparaciones por pares

basadas en el juicio de expertos para derivar escalas de prioridad precisas. Al formalizar el pensamiento, este enfoque garantiza un proceso de decisión transparente y sistemático que abarca dimensiones tanto tangibles como intangibles, esta distinción permite al modelo integrar aspectos medibles con percepciones humanas subjetivas (Saaty, 1988, 2008).

2.2. Estructura jerárquica del problema

La base del AHP es la descomposición del problema en una estructura jerárquica que facilita su comprensión y análisis. Esta estructura se organiza de la siguiente manera:

- **Nivel Superior (Objetivo):** Representa el propósito global o la meta final de la decisión.

- **Niveles Intermedios (Criterios y Subcriterios):** Factores sobre los cuales dependen los elementos subsiguientes; pueden ser de naturaleza técnica, económica o social.
- **Nivel Inferior (Alternativas):** El conjunto de acciones o soluciones posibles que serán evaluadas.

2.3. El proceso de comparación por pares

Para derivar las prioridades, el AHP utiliza comparaciones binarias, lo que reduce la carga cognitiva al comparar solo dos elementos simultáneamente con respecto a un criterio superior. Estas comparaciones se realizan mediante la Escala Fundamental de Saaty, una escala de juicios absolutos del 1 al 9.

Tabla 1. Escala Fundamental de Saaty (Saaty, 2008)

Intensidad	Definición	Explicación
1	Igual importancia	Dos actividades contribuyen igual al objetivo.
3	Importancia moderada	La experiencia y el juicio favorecen ligeramente una actividad sobre otra.
5	Importancia fuerte	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente una actividad sobre otra.
7	Importancia muy fuerte	Una actividad es favorecida muy fuertemente; su dominio está demostrado.
9	Importancia extrema	La evidencia que favorece una actividad sobre otra es del mayor orden posible.
2, 4, 6, 8	Valores intermedios	Se utilizan cuando se requiere una solución de compromiso entre dos juicios.
Recíprocos	Si la actividad i tiene un número asignado respecto a j , entonces j tiene el valor recíproco respecto a i .	Refleja la consistencia matemática de la matriz de comparación.

2.4. Análisis de consistencia

Una característica sobresaliente del AHP es su capacidad para medir la inconsistencia en los juicios. Dado que la mente humana puede ser inconsistente al realizar múltiples comparaciones (ej. si A es mejor que B , y B es mejor que C , se esperaría que A fuera mucho mejor que C), el método calcula una Relación de Consistencia (CR).

- El AHP permite un margen de inconsistencia, reconociendo que el conocimiento humano no es absoluto.
- Si la inconsistencia supera el umbral aceptable (generalmente 0,10 o 10%), el método recomienda revisar y mejorar los juicios antes de proceder con la síntesis final.

2.5. Síntesis de prioridades

La fase final consiste en la síntesis, donde las prioridades locales derivadas de las matrices de comparación se multiplican por la prioridad de la categoría de nivel superior en la jerarquía. Este proceso continúa de arriba hacia abajo hasta obtener la prioridad global de cada alternativa. El resultado es un ranking que identifica la alternativa más adecuada según el peso ponderado de todos los criterios evaluados.

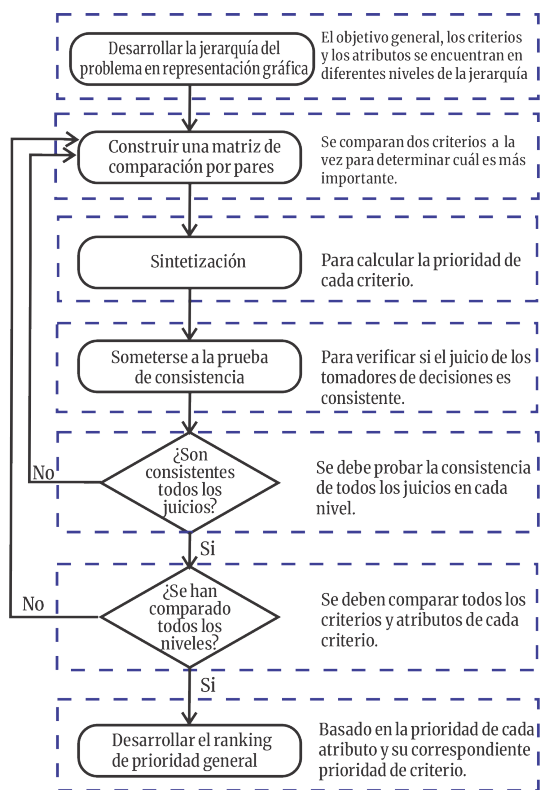
En este sentido Ho (2008), resume el método AHP en tres operaciones principales, incluyendo la construcción de jerarquías, el análisis de prioridades y la verificación de consistencia:

- **Estructuración Jerárquica:** Organiza los elementos del problema en diferentes niveles para facilitar su comprensión y análisis.
- **Comparaciones por Pares:** Evalúa la importancia relativa de dos elementos simultáneamente utilizando una escala numérica, lo que permite integrar el juicio experto y la subjetividad del decisor de manera sistemática.
- **Síntesis Matemática:** Utiliza algoritmos de álgebra lineal para calcular las prioridades relativas y generar un ranking final que identifica la mejor solución de compromiso.

En la [Tabla 2](#), se puede sintetizar el método AHP y en la [Figura 1](#) se presenta un diagrama de flujo propuesto por Ho, et al. (2006), donde captura de manera resumida los pasos iterativos necesarios para pasar de un problema desestructurado a un ranking de prioridades validado del método AHP, desarrollado por Thomas Saaty.

Tabla 2. Resumen de las tres operaciones principales del Proceso Analítico Jerárquico (AHP)

Operación	Acción Clave	Resultado
Jerarquización	Descomponer el problema	Estructura de niveles y atributos.
Priorización	Comparar por pares	Pesos de importancia relativa.
Consistencia	Calcular índice de error	Validación o ajuste de los juicios.

**Figura 1.** Diagrama de flujo de implementación de AHP (Fuente: adaptado y mejorado de Ho et al. (2006))

3. Metodología

Con el uso de técnica como la tormenta de ideas (brainstorming) y la incubación de ideas (Gogus, 2020; Bonnardel y Didier, 2020; Nguyen, 2024; Bennet y Shelley, 2024), y tomando en consideración las restricciones propias del problema (criterios de evaluación, dificultad de acceso, movilidad, entre otros) fueron desarrolladas, de manera esquemática, cada una de las soluciones propuestas para ser utilizadas como sistemas de ayuda en la ejecución de las labores de mantenimiento de las unidades de aire acondicionado de los autobuses de la empresa Metro de Caracas (Metrobús).

Luego, se procedió a la elaboración de la representación gráfica tridimensional de estas soluciones en el software comercial Solidworks®, tal representación pudiese ser considerada como un prototipo virtual, puesto que, las diferentes piezas o partes que conforman cada solución, son ensambladas respetando las leyes de movimiento relativo especificadas en el diseño conceptual, lo que

permitió estudiar el funcionamiento real de la propuesta.

Una vez que los prototipos virtuales fueron terminados, se procedió a la definición de los criterios de evaluación y sus factores de peso, para ser utilizados en la selección de la mejor solución utilizando el método de Proceso Analítico Jerárquico (AHP) de Saaty (Saaty, 1977; Saaty, 1980; Saaty, 2006).

El Método de AHP consiste, esencialmente, en visualizar un problema de gran complejidad como lo es la evaluación de múltiples atributos, con un enfoque más sencillo para el razonamiento humano, esto es mediante la utilización de una serie de comparaciones por pares, que luego, se agrupan en una matriz recíproca positiva de valores numéricos que satisfacen dos posibles restricciones: (i) cuando se compara una alternativa contra sí misma, se le asigna "igual importancia", y (ii) si a la opción i se le asigna un número x al compararla con la opción j , entonces cuando se compare la opción j contra la opción i el valor que se le asignará a dicha comparación es $1/x$ (Díaz Mora, et al. 2009). Una escala que adaptó Coyle, (2004) del trabajo original de Saaty se muestra en la Tabla 1.

Una vez que se establecen todas las comparaciones por pares y se registran en la matriz, se determina el autovector de esta, cuyas componentes serán los pesos relativos para cada una de las opciones. El autovector corresponde a la solución de la siguiente ecuación:

$$Aw = \lambda w \quad (1)$$

Si los juicios expresados en las valoraciones fuesen perfectamente consistentes, el valor numérico del máximo autovalor λ_{max} sería igual al orden de la matriz n (el número de factores a ser comparados).

En cualquier otro caso, el auto valor será mayor ($\lambda_{max} \geq n$), y puede ser determinado un índice de consistencia (IC) empleando la siguiente ecuación:

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

El método concluye con la estimación de la tasa de consistencia (CR, Consistency Ratio, por sus siglas en inglés) que compara los juicios emitidos en la solución de un problema particular, contra una muestra suficientemente grande de juicios aleatorios. La CR se determina dividiendo el índice de consistencia de la matriz de comparación obtenida para el problema en estudio, entre el índice para matrices aleatorias del mismo orden. Si la CR es cero, la matriz de comparación es perfectamente consistente, en todo caso es suficiente si se obtienen valores de CR menores a 0,1 ($CR < 0,1$) (Saaty, 1980).

4. Resultados y Discusión

Esta sección presenta el desarrollo y la evaluación comparativa de las cuatro propuestas de diseño conceptual orientadas a facilitar las labores de mantenimiento en los sistemas de aire acondicionado del sistema Metrobús. Inicialmente, se exponen las características técnicas, ventajas y limitaciones

operativas de cada prototipo virtual generado mediante modelado tridimensional. Posteriormente, se detallan los resultados obtenidos al aplicar la metodología AHP, incluyendo el análisis de las matrices de comparación, la ponderación de criterios y la determinación del índice de consistencia, lo cual permite jerarquizar objetivamente la solución técnica más adecuada para los requerimientos exigidos.

Propuesta de Solución No 1. Plataforma Armable: (ver [Figura 2](#)).

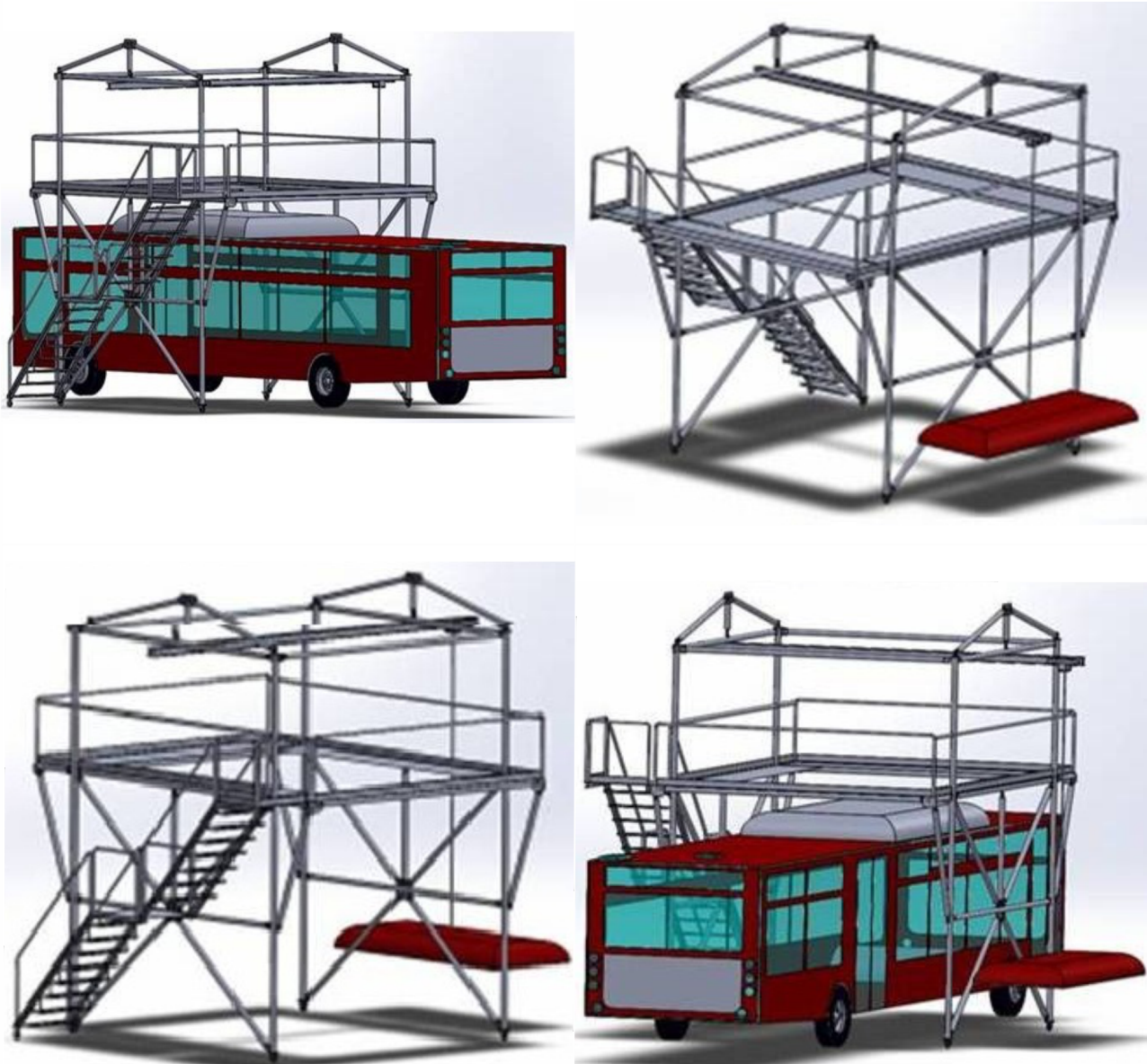


Figura 2. Plataforma Armable.

Esta solución está constituida por una armadura de perfiles tubulares que son apertados en los puntos de unión. En uno de sus lados posee una escalinata para el acceso del personal de mantenimiento, pero que además sirve de contrapeso para las labores de reemplazo de la unidad de aire acondicionado (elemento colgante del lado opuesto a las escaleras). La unidad de aire acondicionado puede ser extraída de la parte superior del Metrobús, por un riel, con la ayuda de un polipasto. Posee también, plataformas en su parte superior, para

que el personal pueda movilizarse y acceder a las distintas partes de la unidad de aire acondicionado. En los apoyos, la estructura posee ruedas, lo que le permite ser trasladada. En resumen, sus ventajas son: estructura ligera, móvil, desmontable, facilidad de traslado entre distintas estaciones de mantenimiento y bajo costo; mientras que sus desventajas son: capacidad para personal limitada debido a su poca rigidez y consumo de tiempo para armado y desarmado.

Propuesta de Solución No 2. Plataforma Pequeña: (ver Figura 3).



Figura 3. Plataforma Pequeña.

Esta solución está constituida por una estructura rígida (no desmontable) que posee una escalera de acceso para el personal de mantenimiento y una plataforma superior con sus respectivas barandas. Uno de los paneles de la plataforma es abatible, con lo cual se logra una estructura más compacta sin evitar el acceso del personal. En los apoyos la estructura posee ruedas que permiten su traslado rápido dentro del área del taller. Posee además un par de patas soporte, también abatibles, para incrementar la estabilidad de la estructura cuando

el personal se encuentra sobre la plataforma realizando las labores de mantenimiento. En síntesis, esta solución tiene como ventajas: una estructura ligera, buena movilidad, estabilidad, facilidad de traslado dentro de las áreas del taller y bajo costo. Sin embargo, también se distinguen como desventajas: la capacidad muy limitada de personal trabajando concurrentemente, por lo cual, sólo puede destinarse a aquellas labores de mantenimiento en las que no se contempla el reemplazo de la unidad de aire acondicionado del autobús.

Propuesta de Solución No 3. Plataforma Tipo Tijera: (ver Figura 4).

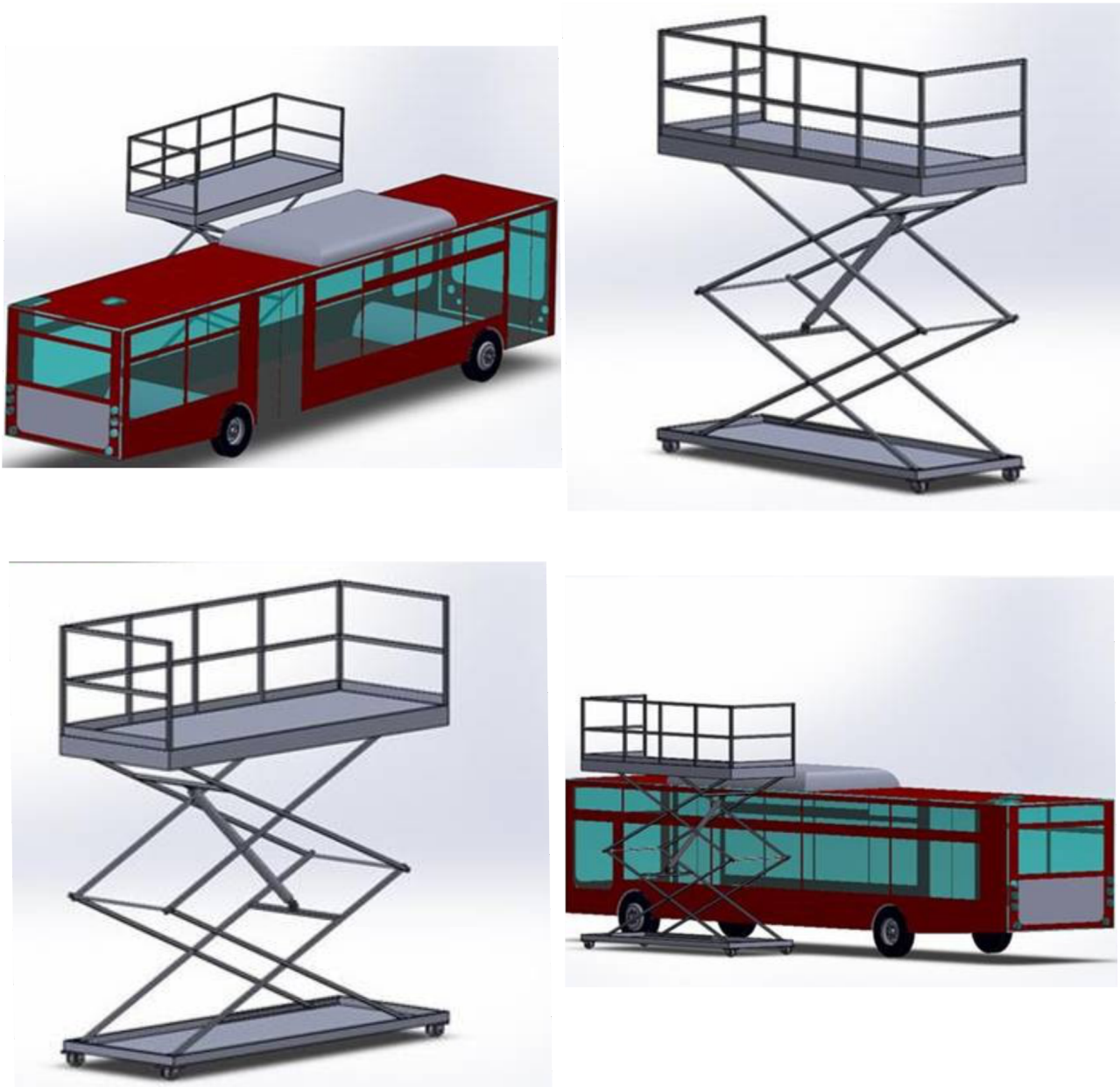


Figura 4. Plataforma Tipo Tijera.

En este diseño, se ha fusionado el concepto de plataforma, con un mecanismo tipo tijera accionado por un cilindro hidráulico, lo cual le otorga a esta estructura la capacidad de ser plegable, de manera que el personal no tiene la necesidad de subir y bajar escaleras, evitando así posibles riesgos de caída, y condiciones inseguras de trabajo, al bajar y subir por las escaleras con piezas y herramientas pesadas. En los apoyos, la estructura posee ruedas que le permiten ser trasladada fácilmente

dentro del área del taller. Esta opción presenta como ventajas: su estructura ligera, móvil, plegable, segura y de fácil traslado dentro del taller, mientras que tiene como desventajas: su limitada capacidad para personal trabajando en forma concurrente, lo que la hace útil sólo para las labores de mantenimiento y no para el reemplazo de la unidad de aire acondicionado, así mismo, el requerir de accionamientos hidráulicos hace que su costo sea moderado.

Propuesta de Solución No 4. Plataforma Robusta: (ver Figura 5).

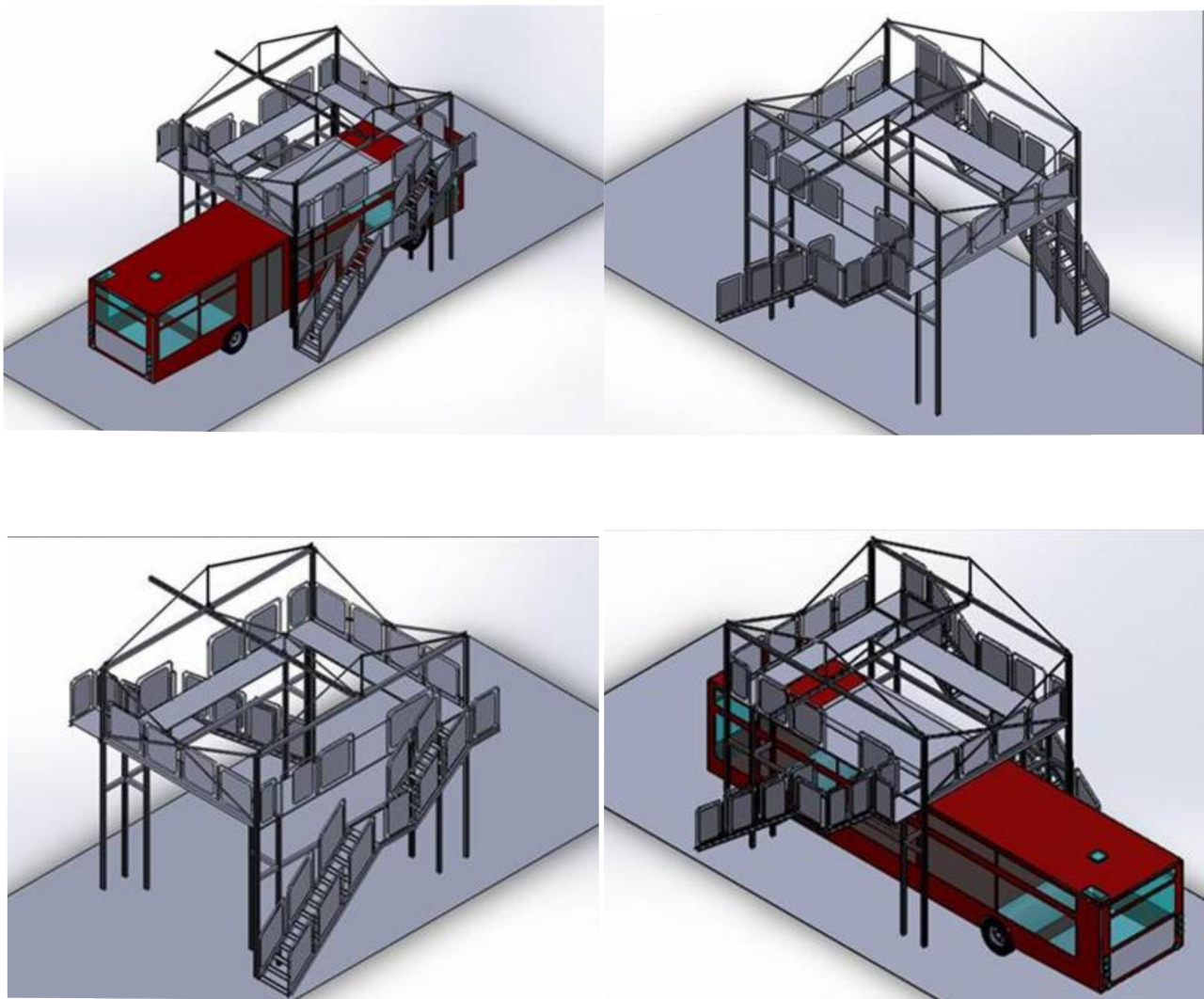


Figura 5. Plataforma Robusta.

Esta solución está constituida por una estructura rígida (no desmontable) que posee escaleras a cada lado para facilitar el acceso del personal de mantenimiento, una plataforma superior con sus barandas y techo (para labores al aire libre). Algunos de los paneles de la plataforma son abatibles, con lo cual se logra el acceso del personal mientras se gana espacio para el montaje y desmontaje de la unidad de aire acondicionado, para lo cual posee un riel en su parte superior que puede ser utilizado en conjunto con un polipasto para la extracción de la unidad. La estructura es fija debido a su peso, lo cual le otorga como ventajas: robustez, alta seguridad y estabilidad, puede albergar muchas personas con comodidad y se pueden realizar todas las operaciones de mantenimiento. Como contrapartida la estructura no puede ser trasladada y es de alto costo.

Para decidir sobre la mejor alternativa se procedió a construir una jerarquía de la decisión a tres niveles

(ver Figura 6), desde la formulación del objetivo que se persigue hasta el análisis de cada una de las alternativas a elegir (en este caso las cuatro propuestas de diseño conceptual ya presentadas). En el segundo nivel (criterios) y tercer nivel (opciones) se compararon por pares entre sí las diferentes alternativas de cada nivel respecto al nivel superior (objetivo para los criterios y cada criterio para las opciones de diseño), obteniendo seis matrices de comparación recíprocas positivas que se muestran en la Figura 6. El procedimiento de síntesis de los juicios de valor, se realizó siguiendo la metodología simplificada propuesta por Coyle (2004), obteniéndose a partir del promedio geométrico normalizado de cada fila seis (auto)vectores de ponderación (uno por cada matriz); cinco de ellos ordenan las opciones de diseño según cada criterio de evaluación, y el vector restante expresa la importancia de cada criterio de evaluación para lograr el objetivo.

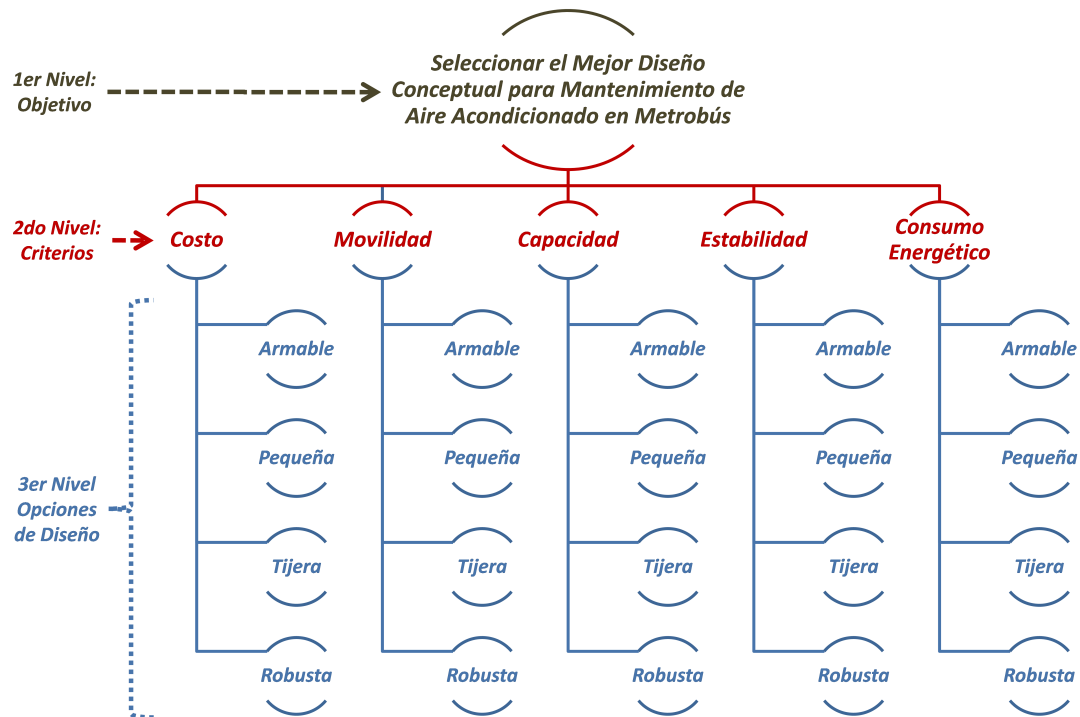


Figura 6. Jerarquía para el Problema de Decisión.

	Costo	Movilidad	Capacidad	Estabilidad	Consumo de Energía	Autovector
Costo	1,000	5,000	7,000	3,000	7,000	0,520
Movilidad	0,200	1,000	3,000	3,000	5,000	0,216
Capacidad	0,143	0,333	1,000	1,000	5,000	0,104
Estabilidad	0,333	0,333	1,000	1,000	5,000	0,124
Consumo de Energía	0,143	0,200	0,200	0,200	1,000	0,036

(a) Evaluación de los Criterios

	Plataforma Armable	Plataforma Pequeña	Plataforma Tijera	Plataforma Robusta	Autovector
Plataforma Armable	1,000	3,000	7,000	9,000	0,581
Plataforma Pequeña	0,333	1,000	3,000	9,000	0,271
Plataforma Tijera	0,143	0,333	1,000	6,000	0,115
Plataforma Robusta	0,111	0,111	0,167	1,000	0,033

(b) Evaluación por Costo

	Plataforma Armable	Plataforma Pequeña	Plataforma Tijera	Plataforma Robusta	Autovector
Plataforma Armable	1,000	7,000	7,000	9,000	0,686
Plataforma Pequeña	0,143	1,000	1,000	5,000	0,138
Plataforma Tijera	0,143	1,000	1,000	5,000	0,138
Plataforma Robusta	0,111	0,200	0,200	1,000	0,039

(c) Evaluación por Movilidad

	Plataforma Armable	Plataforma Pequeña	Plataforma Tijera	Plataforma Robusta	Autovector
Plataforma Armable	1,000	5,000	5,000	0,333	0,265
Plataforma Pequeña	0,200	1,000	1,000	0,111	0,060
Plataforma Tijera	0,200	1,000	1,000	0,111	0,060
Plataforma Robusta	0,300	9,000	9,000	1,000	0,615

(d) Evaluación por Capacidad

	Plataforma Armable	Plataforma Pequeña	Plataforma Tijera	Plataforma Robusta	Autovector
Plataforma Armable	1,000	5,000	5,000	0,333	0,283
Plataforma Pequeña	0,200	1,000	1,000	0,143	0,068
Plataforma Tijera	0,200	1,000	1,000	0,143	0,068
Plataforma Robusta	3,000	7,000	7,000	1,000	0,580

(e) Evaluación por Estabilidad

	Plataforma Armable	Plataforma Pequeña	Plataforma Tijera	Plataforma Robusta	Autovector
Plataforma Armable	1,000	1,000	0,111	1,000	0,083
Plataforma Pequeña	1,000	1,000	0,111	1,000	0,083
Plataforma Tijera	9,000	9,000	1,000	9,000	0,750
Plataforma Robusta	1,000	1,000	0,111	1,000	0,083

(f) Evaluación por Consumo de Energía

Figura 7. Matrices de Evaluación

$$\begin{array}{l}
 \text{Costo} \quad \text{Movilidad} \quad \text{Capacidad} \quad \text{Estabilidad} \quad \text{Consumo de Energía} \\
 \text{Plataforma Armable} \quad \left[\begin{array}{ccccc} 0,581 & 0,686 & 0,265 & 0,283 & 0,083 \\ 0,271 & 0,138 & 0,060 & 0,068 & 0,083 \\ 0,115 & 0,138 & 0,060 & 0,068 & 0,750 \\ 0,033 & 0,039 & 0,615 & 0,580 & 0,083 \end{array} \right] \times \left[\begin{array}{c} 0,520 \\ 0,216 \\ 0,104 \\ 0,124 \\ 0,036 \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} 0,516 \\ 0,189 \\ 0,131 \\ 0,165 \end{array} \right] \quad (3)
 \end{array}$$

La expresión (3) representa el cálculo matricial de la ponderación de las opciones respecto al objetivo, esto permite obtener el ordenamiento final de las opciones de diseño. El cálculo consiste en el producto matricial de la matriz 4×5 que se construye apilando los cinco autovectores columna 4×1 de ponderación de cada criterio (Figura 6, autovectores correspondientes a las matrices de los incisos (b) hasta (f), en ese orden), por el vector columna 5×1 de ponderación de los criterios (Figura 6, inciso (a)), operación de la cual resulta un vector columna 4×1 cuyas componentes corresponden a los valores escalares de ponderación para cada opción de diseño propuesta.

Los cálculos mostrados en la Figura 7 y la expresión (3) determinan que la solución a seleccionar es la plataforma armable, con una marcada supremacía sobre las demás, las cuales, aun cuando guardan una relación de orden entre sí, obtuvieron factores de ponderación muy similares. La menos favorable es la plataforma tijera.

Una de las ventajas de usar AHP es obtener los índices y tasas de consistencia para cada una de las seis matrices, quedando todas dentro del rango aceptable de consistencia como se observa en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros y Valores de la Evaluación de la Consistencia de las Matrices de Juicio.

Matriz	$\bar{\lambda}_{max}$	IC	IC _{aleatorio} *	CR
Evaluación de Criterios	5,404	0,101	1,12	9 %
Evaluación por Costo	4,264	0,088	0,9	10 %
Evaluación por Movilidad	4,236	0,079	0,9	9 %
Evaluación por Capacidad	4,033	0,011	0,9	1 %
Evaluación por Estabilidad	4,073	0,024	0,9	3 %
Evaluación por Consumo de Energía	4,000	0	0,9	0 %

* Índices de Consistencia aleatorios¹

El análisis de consistencia (Tabla 3) revela aspectos interesantes sobre la naturaleza del proceso de decisión. La matriz (completa) de criterios presentó la mayor inconsistencia (CR = 9 %), cercana al límite recomendado por Saaty (1980), lo cual es esperable dado que la priorización de factores como costo, movilidad y estabilidad, implica juicios de valor complejos y potencialmente contradictorios (mejorar un aspecto suele empeorar otro). Por el contrario, los criterios

técnicos como capacidad (CR = 1 %) y estabilidad (CR = 3 %) mostraron una consistencia mucho mayor, reflejando un mayor acuerdo entre los expertos al evaluar aspectos cuantificables del diseño. El caso del consumo de energía (CR = 0 %) es particular: su consistencia perfecta, lejos de ser un indicador de calidad, evidencia su escasa capacidad discriminante, ya que sólo una de las alternativas presenta un consumo significativo. Este hallazgo sugiere que, en futuras iteraciones del diseño, sería conveniente reemplazar este criterio por otros más relevantes, como la ergonomía o la seguridad laboral.

5. Conclusiones

Se muestra en el trabajo como la integración entre las técnicas creativas como la lluvia de ideas, apoyo tecnológico como la visualización y el modelaje tridimensional y métodos formales de apoyo a la toma de decisiones multicriterio, permiten proponer, evaluar y seleccionar diseños adecuados para satisfacer necesidades específicas.

De las cuatro propuestas conceptualizadas y analizadas se determinó que la mejor es la plataforma armable con una ponderación del 51,6 %, mientras que la menos recomendada para el problema planteado es la plataforma tijera con una ponderación del 13,1 %. La ponderación de las opciones plataforma pequeña (18,9 %) y plataforma robusta (16,5 %) es similar y levemente superior a las presentadas por la plataforma tijera (13,1 %). En tal sentido se sugiere, en caso de existir presupuesto excedentario, construir no sólo la plataforma armable sino también la plataforma pequeña (segunda mejor según el análisis), de manera tal que ésta última complementa a la primera en aquellas labores de mantenimiento que no contemplan el reemplazo de las unidades de aire acondicionado.

Las evaluaciones multicriterio a través de juicios por pares han demostrado ser un sistema práctico para obtener una comprensión simple de la simultaneidad de todos los criterios de evaluación y su aplicación arrojó como resultado ordenamientos consistentes de tales juicios de valor. Las evaluaciones más sencillas de realizar fueron aquellas en las que se sopesaron las alternativas de diseño atendiendo a los criterios de estabilidad y capacidad, mientras que los criterios de

1 Los índices de consistencia aleatorios corresponden a los valores promedio de matrices recíprocas positivas de la misma dimensión con la que se hace la comparación cuyas entradas corresponden con valores aleatorios discretos en el intervalo (1,9). Los valores que se reflejan en la Tabla 3 para las matrices 5×5 (1,12) y 4×4 (0,9) los reporta Saaty (1980). De acuerdo con Forman (1990) el valor corresponde al promedio de 500 matrices simuladas calculado en la Escuela de Negocios de Wharton de la Universidad de Pennsylvania.

estimación de costo y movilidad, rindieron evaluaciones menos consistentes, pero siempre dentro de los límites de aceptabilidad. La evaluación de la importancia relativa de los criterios también resultó una tarea compleja, observándose para ella, una tasa de consistencia cercana al límite recomendado por Saaty (10 %).

El orden de importancia obtenido para los criterios fue: costo, movilidad, estabilidad, capacidad y consumo de energía. La distinción del primero y último lugar en el ordenamiento de los criterios quedó establecida en una forma sumamente nítida, y los dos primeros criterios (costo y movilidad) resultaron ser altamente dominantes sobre el resto.

Declaraciones

Aprobación de la autoría

Todos los autores han leído y aprobado la versión final publicada del manuscrito.

Fuente de financiamiento

Esta investigación no recibió ningún tipo de fuente de financiamiento.

Conflicto de Intereses

Los autores declaran no tener ningún tipo conflicto de intereses.

Aprobación ética

Este artículo no involucra a personas ni animales. No se requiere aprobación ética.

Uso de herramientas de IA generativa:

En la presente investigación, se utilizaron herramientas de IA como Gemini en la preparación de este manuscrito para corrección gramatical.

Disponibilidad de los datos

En este tipo de investigación no aplica disponibilidad de datos.

Acceso Abierto

Este artículo está bajo una licencia Creative Commons Atribución - No Comercial - Sin Obra Derivadas 4.0 Internacional, la cual permite cualquier uso no comercial, compartir, distribuir y reproducir en cualquier medio o formato, siempre que se cite adecuadamente al autor o autores originales y la fuente, se proporcione un enlace a la licencia Creative Commons. Esta licencia no permite compartir material adaptado derivado de este artículo o partes del mismo. Para consultar una copia de esta licencia, visite <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>.

Información adicional

- **Versión digital:** El artículo está disponible en Saber UCV: https://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_fiucv/article/view/33414.
- **ORCID de los autores:**
 - Pedro Viggiani: 0009-0002-5574-8019
 - Manuel Serafín: 0000-0003-3754-9964

Referencias

- Bennet, A., Shelley, A., & Dhewa, C. (2024). *Innovative Creativity: Creating with Innovation in Mind*, MQIPress.
- Bonnardel, N., & Didier, J. (2020) Brainstorming variants to favor creative design. *Applied ergonomics*, 83, 102987. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2019.102987>
- Coyle, G. (2004). *Practical strategy: structured tools and techniques*, Harlow: Pearson.
- Díaz Mora, R., Piña, J. G. Serafin P., M. & Ríos D. (2009). Uso de AHP y Conjuntos Difusos para Mejorar la Toma de Decisiones. Caso: Selección de Empresas Contratistas de Construcción en la Administración Pública Venezolana, de Seventh LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI' 2009), San Cristóbal, 2009.
- Forman, E. H. (1990) Random indices for incomplete pairwise comparison matrices. *European Journal of Operational Research*, 48(1), pp. 153-155. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90072-J](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90072-J)
- Gogus, A. (2020) Brainstorming and Invention. In: Carayannis, E.G. (eds) *Encyclopedia of Creativity, Invention, Innovation and Entrepreneurship*. Springer, Cham pp. 204-208. https://doi.org/10.1007/978-3-319-15347-6_348
- Ho, W. (2008). Integrated analytic hierarchy process and its applications-A literature review. *European Journal of operational research*, 186(1), 211-228. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.01.004>
- Ho, W., Dey, P.K. & Higson, H.E. (2006). Multiple criteria decision making techniques in higher education. *International Journal of Educational Management*, 20(5), pp. 319-337. <https://doi.org/10.1108/09513540610676403>
- Ishizaka, A., & Labib, A. (2011). Review of the main developments in the analytic hierarchy process. *Expert systems with applications*, 38(11), pp. 14336-14345. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.04.143>
- Kaushik, S., Joshi, L. K., Pamt, S., Kumar, A., & Ram, M. (2024). Exploring the diverse applications of the analytic hierarchy process: A comprehensive review. *Mathematics in Engineering, Science & Aerospace (MESA)*, 15(2)
- Khaira, A., & Dwivedi, R. K. (2018) A state of the art review of analytical hierarchy process. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 4029-4035. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.663>
- Leal, J. E. (2020). AHP-express: A simplified version of the analytical hierarchy process method. *MethodsX*, 7, 1-11, 100748. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.11.021>
- Mardani, A., Jusoh, A., Nor, K., Khalifah, Z., Zakwan, N., & Valipour, A. (2015). Multiple criteria decision-making techniques and their applications-a review of the literature from 2000 to 2014. *Economic research konomska istraživanja*, 28(1), pp. 516-571. <https://doi.org/10.1080/1331677X.2015.1075139>
- Moslem, S., Saraji, M. K., Mardani, A., Alkharabsheh, A., Duleba, S., & Esztergar-Kiss, D. (2023). A systematic review of analytic hierarchy process applications to solve transportation problems: from 2003 to 2022. *IEEE Access*, 11, 11973-11990. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3234298>
- Nguyen, L. (2024). How to brainstorm. Publifeye.
- Saaty, T. L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15(3), pp. 234-281. [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5)
- Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchic Process*, Nueva York: McGraw-Hill.

- Saaty, T. L. (1988). What is the Analytic Hierarchy Process?. In: Mitra, G., Greenberg, H. J., Lootsma, F. A., Rijkaert, M. J., Zimmermann, H. J. (eds) *Mathematical Models for Decision*, vol 48, pp. 109–121. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-83555-1_5
- Saaty, T. L. (2006). *Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with The Analytic Hierarchy Process*, 2 ed., Pittsburgh, PA: RWS Publications.
- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International journal of services sciences*, 1(1), 83–98. <https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590>
- Taherdoost, H., & Madanchian, M. (2023). Multi-criteria decision making (MCDM) methods and concepts. *Encyclopedia*, 3(1), 77–87. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia3010006>

Nota del editor/Descargo de responsabilidad: La Editorial Innovación Tecnológica (EdIT) mantiene una postura neutral e imparcial respecto a las declaraciones, opiniones y datos contenidos en esta publicación, los cuales son responsabilidad exclusiva de los autores y colaboradores, y no de la Revista de la Facultad de Ingeniería UCV ni de sus editores. Asimismo, la Revista de la Facultad de Ingeniería UCV y sus editores no se hacen responsables por daños a personas o bienes que puedan derivarse del uso o aplicación de ideas, metodologías, métodos, resultados, instrucciones o productos mencionados en este artículo.

Citar este artículo como / Cite this article as:

Viggiani, P., Kumquel, J., Hernández, S. & Serafin, M. (2026). Evaluación mediante Proceso Analítico Jerárquico de diseños conceptuales para el mantenimiento de aires acondicionados del sistema Metrobús del Metro de Caracas. *Rev. Fac. Ing. UCV*, 41(1), 11–22.

Postule su próximo manuscrito en la Revista de la Facultad de Ingeniería UCV y obtenga ventajas competitivas globales:

- ✓ **Envío directo:** proceso simple por correo electrónico
- ✓ **Arbitraje riguroso:** revisión por pares a doble ciego con expertos en el área
- ✓ **Sin costo:** libre de cargo por procesamiento de envío, revisión y publicación
- ✓ **Publicación continua:** los artículos se publican tras su aceptación y maquetación
- ✓ **Acceso abierto:** visibilidad científica sin restricciones
- ✓ **Preservación digital:** respaldo permanente mediante LOCKSS y CLOCKSS
- ✓ **Conectividad global:** integración nativa con ORCID y Google Scholar
- ✓ **Visibilidad académica:** preservación en el Repositorio Institucional Saber UCV
- ✓ **Impacto global:** proyecte su producción científica al mundo

Envíe su manuscrito a:

revistafacingenieria@gmail.com / revistafacingenieria@ucv.ve