
Métodos Multicriterio aplicados a la parte lateral de una estructura autoportante para vehículos livianos

Multi-criteria methods applied to the side of a self-supporting structure for light vehicles

Métodos multicriterios aplicados à parte lateral de uma estrutura autoportante para veículos ligeiros

Rodger Salazar Loor¹, Javier Martínez-Gómez¹⁻², Juan Rocha Hoyos¹ & Edilberto Antonio Llanes-Cedeño¹

¹ Facultad de Arquitectura e Ingeniería, Universidad Internacional SEK, Quito-Ecuador.
Correo: rsalazar.mdm@uisek.edu.ec, javier.martinez@uisek.edu.ec,
carlos.rocha@uisek.edu.ec, antonio.llanes@uisek.edu.ec

² Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables – INER, Quito-Ecuador.

Fecha de recepción: 16 de mayo de 2018.

Fecha de aceptación: 2 de julio de 2019.

RESUMEN

INTRODUCCIÓN. La selección de materiales es una etapa importante en el diseño y desarrollo de productos, mediante la utilización de métodos multicriterio, es posible establecer una metodología de selección confiable, convergiendo en una solución única y fiable. **OBJETIVO.** Aplicar métodos multicriterio para la selección de la parte lateral estructural de un vehículo, para obtener una mayor eficiencia y rendimiento en el aprovechamiento de materiales. **MÉTODOS.** Mediante la metodología de Pareto y métodos multicriterio (TOPSIS, COPRAS, VIKOR, PROMETHEE II), establecer indicadores de resultados confiables para la selección de materiales estructurales en base a la comparación de criterios cuantitativos. **RESULTADOS.** Luego de la comparación de los métodos aplicados, se observa que todos establecen que el material del Acero Martensítico YS1200 es el más adecuado. **DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.** El material determinado tiene gran potencial en la fabricación de estructuras del vehículo, es relativamente económico y ligero, y con la tecnología adecuada es posible su implementación.

Palabras clave: Estructura lateral, método de ponderación, método multicriterio, MCDM.

ABSTRACT

INTRODUCTION. The selection of materials is an important stage in the design and development of products, through the use of multi-criteria methods, it is possible to establish a reliable selection methodology, converging in a unique and reliable solution. **OBJETIVE.** To apply multi-criteria methods for the selection of the structural side part of a vehicle, to obtain greater efficiency and performance in the use of materials. **METHOD.** Using the Pareto methodology and multi-criteria methods (TOPSIS, COPRAS, VIKOR, PROMETHEE II), establish reliable performance indicators for the selection of structural materials based on the comparison of quantitative criteria. **RESULTS.** After the comparison of the applied methods, it is observed that all establish that the material of Martensitic Steel YS1200 is the most suitable. **DISCUSSION AND CONCLUSIONS.** The material determined has great potential in the manufacture of vehicle structures, is relatively inexpensive and light, and with the right technology it is possible to implement it.

Keywords: Lateral structure, weighting method, multi-criteria method, MCDM.

RESUMO

INTRODUÇÃO. A seleção de materiais é uma etapa importante na concepção e desenvolvimento de produtos, através do uso de métodos multicritérios, é possível estabelecer uma metodologia de seleção confiável, convergindo para uma solução única e confiável. **OBJETIVO.** Aplicar métodos multicritério para a seleção do lado estrutural de um veículo, para obter maior eficiência e desempenho no uso de materiais. **MÉTODO.** Mediante a metodologia de Pareto y métodos multicritério (TOPSIS, COPRAS, VIKOR, PROMETHEE II), estabeleceu todos os critérios para a seleção de materiais estruturais baseados na comparação de critérios quantitativos. **RESULTADOS.** Logo da comparação dos métodos aplicados, se observação que todos os elementos que o material do aço Martensítico YS1200 é o mais adequado. **DISCUSSÃO E CONCLUSÕES.** O material ajustado tem um potencial grande no fabricai de estruturas do veículo, o económico em perigo e o ligamento, e o software adequada é possível sua implementação.

Palavras-chave: Estrutura lateral, método de ponderação, método multicritério, MCDM.

INTRODUCCIÓN

Una estructura autoportante, es la configuración del chasis más utilizada para vehículos de pasajeros, su diseño parte del concepto de una estructura metálica envolvente, constituida por la unión de elementos de diferentes formas y espesores, formando una caja resistente que se soporte a sí misma y a los elementos mecánicos fijados sobre [1].

En Ecuador, se está implementando el cambio de la matriz productiva, la cual tiene como principal fundamento la sustitución de importaciones y la elaboración de productos con las normas de calidad vigentes, aprovechando los convenios firmados por el Ecuador para su respectiva comercialización en el país y en países de la región a corto plazo [2].

La estructura autoportante, está diseñada para absorber los esfuerzos debidos a la conducción (aceleración, desaceleración, trazado de curvas, variables aerodinámicas), además de absorber la energía por deformación en caso de un

Rodger-Salazar, Javier-Martínez, Juan-Rocha, Edilberto-Llanes. Métodos Multicriterio aplicados a la parte lateral de una estructura autoportante para vehículos livianos

Julio – Diciembre 2019

<http://dx.doi.org/10.33210/ca.v8i2.172>

accidente [3]. En respuesta a una colisión, el chasis se deforma creando “zonas de deformación” diseñadas para plegarse sobre sí mismas, proporcionando así un tiempo prolongado de desaceleración y absorción de energía, asegurando la vida de los ocupantes [4].

Entre los elementos más utilizados por los fabricantes de automóviles para el chasis, se encuentran el acero y el aluminio, debido a sus propiedades de resistencia y peso respectivamente. Sin embargo, la primaria utilización de un material sobre otro puede llegar a un desbalance, impidiendo conseguir este objetivo. Por lo que actualmente se utilizan diferentes aleaciones de materiales o combinaciones entre ellos, de manera que se obtengan alternativas de diseño eficientes, económicas y adaptables para el vehículo.

Por lo expuesto anteriormente, el objetivo general del trabajo es determinar el material adecuado para la sección lateral de la estructura autoportante usando métodos y herramientas que garanticen una valoración objetiva y precisa en la toma de decisiones.

MÉTODO

Definición de criterios involucrados

En primera instancia, se deben definir los requerimientos de diseño y aplicación del material, se considera que uno de los objetivos primordiales es la reducción de peso del conjunto estructural lateral, así como del precio del mismo. Dentro de los parámetros técnicos se consideran el límite elástico, resistencia a la rotura, y el porcentaje de elongación del material.

Estos criterios, se ordenan u optimizan en función de tipo de influencia que tengan sobre el caso de estudio, analizando individualmente cada uno de estos, se tiene que: ya que el peso va directamente relacionado con la densidad del material, que es una característica propia del mismo y mientras mayor sea en comparación de otro material más pesado será, es necesario que este valor sea mínimo.

El precio del material, depende de muchos factores, como la disponibilidad, el volumen de compra, volatilidad del mercado, etc., pero en general existen mercados de valores que tasan de forma estimada el costo de cada material, se debe buscar el precio más cómodo sin descuidar los requerimientos técnicos.

El límite elástico, debe mantenerse en márgenes altos, lo suficiente como para resistir la carga impacto sin alcanzar una deformación que afecte la integridad de los ocupantes. La resistencia a la rotura, debe ser lo más alta posible, evitando que el material falle, mientras que el porcentaje de elongación debe ser un valor relativamente bajo, en vista que se desea alcanzar una deformación admisible pero que no supere el espacio de los ocupantes, en la tabla 1 se muestra los objetivos de maximización y minimización de criterios.

Tabla 1. Importancia de criterios definidos

D	P	ME	EF	EU	E
Mínimo	Mínimo	Máximo	Máximo	Máximo	Mínimo
↓	↓	↑	↑	↑	↓

Clave. D: densidad en kg. P: precio en \$/kg. ME: módulo elástico en GPa. EF: esfuerzo a la fluencia en MPa. EU: Esfuerzo último en MPa. E: elongación en porcentaje.

Modelos de optimización

Para el proceso de optimización de selección de materiales, se utilizan un conjunto de valores sujetos a sistemas de ecuaciones denominados índices de materiales, estos índices lo que hacen es relacionar diferentes variables de manera independiente mediante ecuaciones con el fin de lograr un objetivo en concreto, que puede ser buscar el máximo o mínimo valor de un conjunto de alternativas.

Para el caso propuesto, se considera la reducción de masa [5], como un factor importante para la optimización del segmento estructural, por lo que se establece una relación de masas, como se indica en la ecuación (1).

$$m_1 = m_2 = \rho V = AL_o\rho \quad (1)$$

Donde, m_1 y m_2 representan la masa del material en función de requerimientos geométricos, A es el área de la sección transversal del elemento estructural, L_o es la longitud del elemento y ρ es la densidad del material. La resistencia de un material viene definida por la ecuación (2).

$$\sigma_y = \frac{F}{A} \quad (2)$$

Donde, σ_y representa el límite elástico del material, F es una fuerza aplicada determinada. Despejando y reemplazando el valor de área de la ecuación (2) en (1), se obtiene una ecuación (3) que optimiza la masa en función de la resistencia.

$$m_1 = FL_o \left(\frac{\rho}{\sigma_y} \right) \quad (3)$$

Donde, FL_o corresponde a los requerimientos funcionales del material y ρ/σ_y es el índice de material para optimizar el comportamiento de resistencia máxima. Nuevamente minimizando la masa, al considerar un elemento lineal tipo viga, se considera que posee un constante de rigidez que viene definida por la ecuación (4).

$$S = \frac{EA}{L}$$

Donde, S representa la constante de rigidez del elemento y E es el módulo de Young. Reemplazando el área de la ecuación (4) en (1), se obtiene una ecuación (5) que optimiza la masa en función del límite elástico.

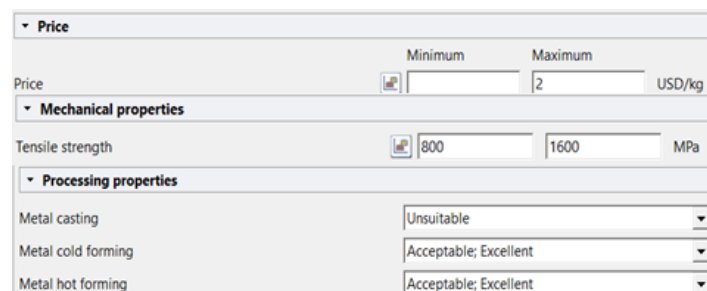
$$m_2 = SL^2 \frac{\rho}{E} \quad (5)$$

Donde, SL^2 corresponde a los requerimientos funcionales del material y ρ/E es el índice de material para optimizar el comportamiento de deformación máxima.

Preselección de materiales

Para la selección preliminar de una serie de materiales adecuados para el diseño de una estructura autoportante, se empleó la utilización del software CES Edupack, el cual posee una enorme librería de materiales, además de incluir herramientas de comparación y revisión de potenciales materiales a considerar [6].

Dentro de las herramientas del software, se encuentra la opción *limite*, la cual permite establecer valores límites para reducir la cantidad de materiales a considerar a un número finito de opciones considerables, tal como se observa en la Figura 1, se considera que dentro del valor de costo el material debe encontrarse por debajo de 2 USD/kg, debe poseer un valor alto de resistencia por lo que se asignaron valores entre 800-1600 MPa, y debe tener una buena adaptabilidad en el proceso de conformado.



	Minimum	Maximum	
Price		2	USD/kg
Mechanical properties			
Tensile strength	800	1600	MPa
Processing properties			
Metal casting	Unsuitable		
Metal cold forming	Acceptable; Excellent		
Metal hot forming	Acceptable; Excellent		

Figura 1. Limitantes escogidas para la selección de materiales

Luego, se procede a generar un gráfico de las alternativas en función de la minimización de masa, las fórmulas descritas anteriormente se ingresan dentro de una interfaz de valoración que se encarga de realizar el cálculo de las masas en función de los índices de material, se presentan una serie de alternativas representadas por burbujas, en total se obtuvieron 100 materiales de un total de 3078.

Sin embargo, esta cantidad todavía es excesiva para realizar una valoración por lo que se utiliza el método de Pareto, para seleccionar los valores más cercanos a las abscisas de las masas, estos son los valores más pequeños de masa en comparación a otras alternativas, la línea de color marrón que cruza a través de las

burbujas establece las alternativas más adecuadas para la reducción de peso de los elementos, esto se observa en la Figura 2.

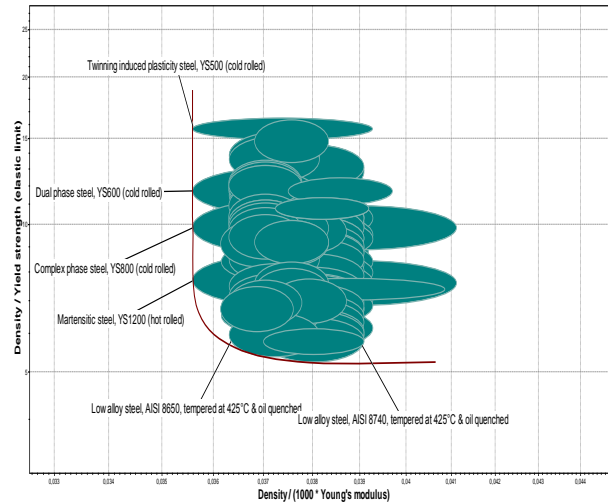


Figura 2. Aplicación de Pareto en selección de materiales

Estas alternativas son posibles soluciones potenciales para este caso de estudio, en la Tabla 2 y 3 se observan cada uno de los materiales y sus propiedades, además se ha colocado un código de identificación a cada uno de estos, para simplificar y facilitar el empleo de los mismos dentro de los métodos multicriterio.

Tabla 2. Criterios determinados con sus respectivos valores para cada material

P	ME	EF	EU	E
1,325	210,5	500,5	981,5	55,0
0,645	210,5	675,0	1055,0	13,5
1,265	210,5	800,0	1090,0	10,0
0,780	210,5	1025,0	1300,0	5,5
0,735	211,0	1325,0	1450,0	12,0
0,745	206,5	1360,0	1435,0	13,0

Clave. P: precio en \$/kg. ME: módulo elástico en GPa. EF: esfuerzo a la fluencia en MPa. EU: Esfuerzo último en MPa. E: elongación en porcentaje.

Tabla 3. Materiales candidatos obtenidos en CES Edupack

Mat	Cod
Acero con Plasticidad Inducida por Maclado, TS500 (laminado en frío)	F1
Acero de fase doble, YS600 (laminado en frío)	F2
Acero de fase compleja, YS800 (laminado en frío)	F3
Acero martensítico, YS1200 (laminado en caliente)	F4

Rodger-Salazar, Javier-Martínez, Juan-Rocha, Edilberto-Llanes. Métodos Multicriterio aplicados a la parte lateral de una estructura autoportante para vehículos livianos
Julio – Diciembre 2019

Acero de baja aleación, AISI 8650, templado a 425°C y enfriado en aceite. F5

Acero de baja aleación, AISI 8740, templado a 425°C y enfriado en aceite. F6

Clave. Mat: material. Cod: código de material.

Métodos de ponderación

Aplicando técnicas de ponderaciones de criterios se asignan valores a diferentes criterios para indicar la importancia relativa en un método de toma de decisiones, además de que estos valores se utilizan de forma subsecuente durante el procesamiento y desarrollo de los métodos [7].

Método de entropía

Se empleó el método de Entropía, el cual se define como una medida de incertidumbre en la información formulada usando teorías de probabilidad, teniendo una distribución amplia de datos representaría más incertidumbre que lo que representarían valores picos o máximos [8]. A continuación, se detallan los pasos para la aplicación del método de entropía [9].

Paso 1: Construcción de la matriz de decisión.

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

Donde, x_{mn} corresponde a los valores de la matriz de decisión.

Paso 2: Normalización de matriz de decisión, se emplea la Ecuación (6).

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (6)$$

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{m1} & p_{m2} & \cdots & p_{mn} \end{bmatrix}$$

Donde, p_{ij} corresponde a los valores de la matriz normalizada m es al número de criterios evaluados.

Paso 3: Cálculo de valor de entropía, se utiliza la Ecuación (7) y (8).

$$k = \frac{1}{\ln m} \quad (7)$$

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad (8)$$

Donde, k es una constante que garantiza que $0 \leq e_j \leq 1$ y e_j es el valor de la entropía.

Paso 4: Cálculo del grado de divergencia, se emplea la ecuación (9).

$$d_j = 1 - e_j \quad (9)$$

Donde, d_j es el grado de divergencia.

Paso 5: Obtención de los pesos para criterio, mediante la Ecuación (10).

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^m d_j} \quad (10)$$

Donde, w_j es el peso de cada criterio.

Métodos Multicriterio

Existen diferentes tipos de métodos multicriterio, cada uno posee diferentes cualidades en cuanto el procedimiento y aplicación, sin embargo, el punto de convergencia hacia una solución numérica fiable se mantiene en casi la mayoría de estos, existen diferentes variaciones o combinaciones de métodos, se emplearon cuatro métodos: TOPSIS, COPRAS, VIKOR y PROMETHEE II. A continuación, se detallan cada uno de estos:

TOPSIS

Es una técnica que permite evaluar el rendimiento de alternativas, utilizando como concepto el maximizar la distancia de soluciones ideales negativas y minimizar la distancia de soluciones ideales positivas, de manera que es posible encontrar soluciones aceptables mediante la discretización de variables [10]. A continuación, se detallan los pasos empleados para el desarrollo del método TOPSIS.

Paso 1: Matriz de Decisión Normalizada, se emplean las Ecuaciones (11) y (12) que corresponden a la maximización y minimización de criterios respectivamente.

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m a_{ij}^2}} \quad (11)$$

$$r_{ij} = 1 - \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m a_{ij}^2}}$$

$$R_{ij} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix}$$

Donde, a_{ij} corresponde a los valores de la matriz de decisión, r_{ij} corresponde a los valores de la matriz normalizada.

Paso 2: Construcción de la matriz estandarizada de pesos, se emplea la Ecuación (13).

$$v_{ij} = w_n r_{mn} \quad (13)$$

$$V_{ij} = \begin{bmatrix} w_1 r_{11} & w_2 r_{12} & \cdots & w_n r_{1n} \\ w_1 r_{21} & w_2 r_{22} & \cdots & w_n r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_1 r_{m1} & w_2 r_{m2} & \cdots & w_n r_{mn} \end{bmatrix}$$

Donde, w_n es el peso de cada criterio, V_{ij} es la matriz estandarizada de pesos y v_{ij} es el valor normalizado de cada elemento individual.

Paso 3: Determinación de soluciones positivas y negativas ideales, se emplean las Ecuaciones (14) y (15).

$$A^* = \left\{ \max_i v_{ij} \mid j \in J, (\min_i v_{ij} \mid j \in J') \right\} = \{v_1^*, v_2^*, \dots, v_n^*\} \quad (14)$$

$$A^- = \left\{ \max_i v_{ij} \mid j \in J, (\min_i v_{ij} \mid j \in J') \right\} = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-\} \quad (15)$$

Donde, A^* y A^- corresponden a los valores positivos y negativos ideales respectivamente.

Paso 4: Cálculo de diferencias entre mediciones, se emplean las Ecuaciones (16) y (17).

$$S_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^*)^2} \quad (16)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (17)$$

Donde: S_i^* y S_i^- son las separaciones positivas y negativas respectivamente.

Paso 5: Cálculo de la proximidad a la solución ideal, se utilizan la Ecuación (18).

$$(18)$$

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^*}$$

Donde, C_i^* es el coeficiente de proximidad relativo que representa un conjunto de soluciones, estas se ordenan de menor a mayor.

COPRAS

Este método considera y evalúa el rendimiento de las alternativas con respecto a los diferentes criterios y también las ponderaciones de criterios correspondientes. Este método selecciona la mejor decisión teniendo en cuenta tanto la solución ideal como la solución anti-ideal [11]. A continuación, se detallan los pasos empleados para el desarrollo del método COPRAS.

Paso 1: Matriz de Decisión Normalizada, se emplea la Ecuación (19).

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^m a_{ij}} \quad (19)$$

Donde, a_{ij} corresponden a los valores de la matriz de decisión y r_{ij} corresponden a los valores de la matriz normalizada.

Paso 2: Construcción de matriz estandarizada de pesos. Similar al aplicado en el método TOPSIS, mediante la Ecuación (12).

$$V_{ij} = \begin{bmatrix} w_1 r_{11} & w_2 r_{12} & \cdots & w_n r_{1n} \\ w_1 r_{21} & w_2 r_{22} & \cdots & w_n r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_1 r_{m1} & w_2 r_{m2} & \cdots & w_n r_{mn} \end{bmatrix}$$

Paso 3: Determinación de valores de pesos normalizadas para criterios beneficiosos y no beneficiosos, mediante las Ecuaciones (20) y (21).

$$S_{+i} = \sum_{j=1}^m y_{+ij} \quad (20)$$

Donde, y_{+ij} corresponde a un valor para un criterio beneficioso, S_{+i} corresponde a la suma de los valores de y_{+i} .

$$S_{-i} = \sum_{j=1}^m y_{-ij} \quad (21)$$

Donde, y_{-ij} corresponde a un valor para un criterio no beneficioso y S_{-i} corresponde a la suma de los valores de y_{-i} .

Paso 4: Obtención de la prioridad relativa de las alternativas, se emplea la Ecuación (22).

$$Q_i = S_{+i} + \frac{\sum_{j=1}^m S_{-i}}{S_{-i} \sum_{j=1}^m \frac{1}{S_{-i}}} \quad (22)$$

Donde, Q_i corresponde a un valor para un criterio no beneficioso, cuanto mayor es el valor del Q_i , mayor es la prioridad de la alternativa.

Paso 5: Determinar el nivel de rendimiento, se utiliza la Ecuación (23).

$$U_i = \frac{Q_i}{Q_{max}} * 100 \quad (23)$$

Donde, U_i representa un conjunto de soluciones aceptables, estas se ordenan de mayor a menor.

PROMETHEE II

Está basado en la función de preferencia que puede utilizarse eficazmente para un conjunto finito de alternativas de clasificación y selección sobre la base de algunos criterios mutuamente independientes y contradictorios, utilizando la comparación por pares de alternativas se consideran las desviaciones que muestran las alternativas según cada criterio [12]. A continuación, se detallan los pasos empleados para el desarrollo del método PROMETHEE II.

Paso 1: Matriz de Decisión Normalizada, se emplean las Ecuaciones (24) y (25), que corresponden a la maximización y minimización de criterios respectivamente.

$$r_{ij} = \frac{a_{ij} - \min(a_{ij})}{\max(a_{ij}) - \min(a_{ij})} \quad (24)$$

$$r_{ij} = \frac{\max(a_{ij}) - a_{ij}}{\max(a_{ij}) - \min(a_{ij})} \quad (25)$$

Donde, a_{ij} corresponde a los valores de la matriz de decisión, así como sus respectivos valores máximos y mínimos y r_{ij} corresponden a los valores de la matriz normalizada.

Paso 2: Cálculo para funciones preferenciales, se emplean las Ecuaciones (26) y (27).

$$\text{Si } R_{ij} \leq R_{i'j} \text{ entonces} \quad (26)$$

$$p_j(i, i') = 0$$

$$\text{Si } R_{ij} > R_{i'j} \text{ entonces} \quad (27)$$

$$p_j(i, i') = R_{ij} - R_{i'j}$$

Donde, $p_j(i, i')$ representa las funciones de preferencia que permiten localizar las desviaciones de valores más pequeñas y detectar las aproximaciones a soluciones aceptables.

Paso 3: Cálculo de funciones agregadas de preferencia, se usa la Ecuación (28).

$$\Pi(i, i') = \left[\frac{\sum_{j=1}^m W_j * P_j(i, i')}{\sum_{j=1}^m W_j} \right] \quad (28)$$

Paso 4: Determinación de flujos de entrada y salida, se utilizan las Ecuaciones (29) y (30).

$$\phi^+(i) = \frac{1}{n-1} \sum_{i'=1}^n \Pi(i, i') \quad (29)$$

$$\phi^-(i) = \frac{1}{n-1} \sum_{i'=1}^n \Pi(i, i') \quad (30)$$

Donde, $\phi^+(i)$ y $\phi^-(i)$ son los flujos de entrada y salida respectivamente, estos expresan cuan dominante es una alternativa con respecto a otra.

Paso 5: Determinación de flujo neto, se emplea la Ecuación (31).

$$\phi(i) = \phi^+(i) - \phi^-(i) \quad (31)$$

Donde, $\phi(i)$ es el flujo neto, expresa las mejores alternativas. Se ordenan de mayor a menor.

VIKOR

El principio fundamental de este método es centrarse en la clasificación y selección de una serie de alternativas en presencia de criterios contradictorios, la cual puede realizarse comparando la medida de proximidad con las alternativas ideales [13]. A continuación, se detallan los pasos empleados para el desarrollo del método VIKOR.

Paso 1: Matriz de Decisión Normalizada, se emplean la Ecuaciones (11) y (12) de manera similar al método TOPSIS.

Paso 2: Construcción de matriz estandarizada de pesos. Se utiliza la Ecuación (13), similar al método TOPSIS.

Paso 3: Cálculo de indicadores de soluciones positivas y negativos ideales, estos son similares al método TOPSIS, pero varía la forma y consideración. Se emplean las Ecuaciones (32) y (33).

$$A^* = \left\{ \max_i f_{ij} \mid j \in J, (\min_i f_{ij} \mid j \in J') \right\} = \{f_1^{max}, f_2^{max}, \dots, f_n^{max}\} \quad (32)$$

$$A^- = \left\{ \max_i f_{ij} \mid j \in J, (\min_i f_{ij} \mid j \in J') \right\} = \{f_1^{min}, f_2^{min}, \dots, f_n^{min}\} \quad (33)$$

Donde, A^* y A^- son los indicadores de soluciones positivas y negativas respectivamente, estos expresan la importancia del valor de un criterio con respecto a otro.

Paso 4: Cálculo de indicadores de medición. Se utilizan las ecuaciones (34) y (35).

$$U_i = \sum_{j=1}^n \frac{W_j(f_j^{max} - f_{ij})}{(f_j^{max} - f_j^{min})} \quad (34)$$

$$R_i = \max_j \left[\frac{W_j(f_j^{max} - f_{ij})}{(f_j^{max} - f_j^{min})} \right] \quad (35)$$

Donde, U_i y R_i son indicadores de medición.

Paso 5: Cálculo de soluciones óptimas. Se utiliza la Ecuación (36).

$$V_i = \frac{\alpha(U_i - U_{min})}{(U_{max} - U_{min})} + \frac{(1 - \alpha)(R_i - R_{min})}{(R_{max} - R_{min})} \quad (36)$$

Donde, α representa una constante de correlación, generalmente se emplea un valor de 0,5, además se determinan los valores máximos y mínimos de las Ecuaciones (34) y (35), V_i representa el conjunto de soluciones obtenidos, estos se ordenan de mayor a menor.

RESULTADOS

Para el desarrollo del método de ponderación, se empleó el método de entropía, en el que se consideraron criterios como densidad que influye en el peso del material, precio, modulo elástico y elongación del material, de manera que sea relativamente deformable, esfuerzo a la fluencia y esfuerzo último que sean altos para soportar las condiciones de impacto.

Como se indica en la Tabla 2, los valores de densidad son iguales para todas las alternativas, por lo que se considera que todos los materiales cumplen con el requisito de ligereza, y se descarta del análisis multicriterio. En la tabla 4, 5 y 6 se

observa la matriz de decisión estándar, normalizada, y factores determinantes para determinar los criterios más relevantes.

Tabla 4. Matriz de Decisión (Entropía)

Cod	P	ME	EF	EU	E
F1	1,325	210,5	500,5	981,5	55,0
F2	0,645	210,5	675,0	1055,0	13,5
F3	1,265	210,5	800,0	1090,0	10,0
F4	0,780	210,5	1025,0	1300,0	5,5
F5	0,735	211,0	1325,0	1450,0	12,0
F6	0,745	206,5	1360,0	1435,0	13,0

Clave. Cod: código de material. P: precio en \$/kg. ME: módulo elástico en GPa. EF: esfuerzo a la fluencia en MPa. EU: Esfuerzo último en MPa. E: elongación en porcentaje.

Tabla 5. Matriz Normalizada (Entropía)

Cod	P	ME	EF	EU	E
F1	0,2411	0,1671	0,0880	0,1342	0,5046
F2	0,1174	0,1671	0,1187	0,1443	0,1239
F3	0,2302	0,1671	0,1407	0,1491	0,0917
F4	0,1419	0,1671	0,1803	0,1778	0,0505
F5	0,1338	0,1675	0,2330	0,1983	0,1101
F6	0,1356	0,1640	0,2392	0,1963	0,1193

Clave. Cod: código de material. P: precio en \$/kg. ME: módulo elástico en GPa. EF: esfuerzo a la fluencia en MPa. EU: Esfuerzo último en MPa. E: elongación en porcentaje.

Tabla 6. Cálculo de valores E_j , D_j y W_j (Entropía)

Fac	P	ME	EF	EU	E
E_j	0,9765	1,0000	0,9674	0,9935	0,8205
D_j	0,0235	0,0000	0,0326	0,0065	0,1795
W_j	0,0970	0,0001	0,1347	0,0267	0,7415

Clave. Fac: Factores determinados en ponderación (entropía, divergencia, pesos). P: precio en \$/kg. ME: módulo elástico en GPa. EF: esfuerzo a la fluencia en MPa. EU: Esfuerzo último en MPa. E: elongación en porcentaje.

Para el valor w_j correspondiente a cada uno de los pesos para cada criterio, se determinó que el atributo más importante es el de elongación, debido a que es el mayor de todos los considerados, siguiéndole el esfuerzo a la fluencia, precio, esfuerzo último y modulo elástico.

Un aspecto interesante a observar, es que, al comparar los valores iniciales de los criterios, en especial de aquellos valores que posean una distancia relativamente

alta entre cada una de las alternativas, se les da un nivel de importancia mucho mayor, esto se debe al dinamismo y fluctuación que posee cada criterio, no tendría mucho sentido evaluar una condición casi idéntica a otra, cuando existe mayor imprecisión e incertidumbre en las opciones restantes. Esto explicaría la tendencia que existe en los resultados obtenidos a converger hacia las alternativas mencionadas en el apartado anterior.

Para el desarrollo de los métodos multicriterio se emplearon cada uno de los pasos mencionados dentro de la metodología, para el método TOPSIS se emplearon las ecuaciones (11) y (12) para determinar la matriz normalizada como se observa en la Tabla 7, la ecuación (13) para determinar la matriz estandarizada de pesos como se muestra en la Tabla 8, las ecuaciones (14) y (15) para determinar las soluciones ideales y no ideales como se indica en la Tabla 9, las ecuaciones (16) y (17) para establecer los índices de separación como se ve en la Tabla 10 y la ecuación (18) para determinar los coeficientes de proximidad de cada alternativa, obteniéndose que el mejor material corresponde al acero martensítico.

Tabla 7. Matriz Normalizada (TOPSIS y VIKOR)

Cod	P	ME	EF	EU	E
F1	0,4338	0,4094	0,2043	0,3251	0,0897
F2	0,7244	0,4094	0,2755	0,3494	0,7766
F3	0,4594	0,4094	0,3265	0,3610	0,8345
F4	0,6667	0,4094	0,4184	0,4306	0,9090
F5	0,6859	0,4103	0,5408	0,4802	0,8014
F6	0,6816	0,4016	0,5551	0,4753	0,7848

Clave. Cod: código de material. P: precio en \$/kg. ME: módulo elástico en GPa. EF: esfuerzo a la fluencia en MPa. EU: Esfuerzo último en MPa. E: elongación en porcentaje.

Tabla 8. Matriz estandarizada de pesos obtenidos (TOPSIS y VIKOR)

Cod	P	ME	EF	EU	E
F1	0,0421	0,00002547	0,0275	0,0087	0,0665
F2	0,0703	0,00002547	0,0371	0,0093	0,5758
F3	0,0446	0,00002547	0,0440	0,0097	0,6187
F4	0,0647	0,00002547	0,0564	0,0115	0,6740
F5	0,0665	0,00002553	0,0729	0,0128	0,5942
F6	0,0661	0,00002499	0,0748	0,0127	0,5819

Clave. Cod: código de material. P: precio en \$/kg. ME: módulo elástico en GPa. EF: esfuerzo a la fluencia en MPa. EU: Esfuerzo último en MPa. E: elongación en porcentaje.

Tabla 9. Solución ideal positivas y negativas (TOPSIS y VIKOR)

A [*]	0,0421	0,00002553	0,0748	0,0128	0,6740
A ⁻	0,0703	0,00002499	0,0275	0,0087	0,0665

Clave. A^{*}: soluciones ideales. A⁻: soluciones no ideales.

Tabla 10. Distancias entre soluciones positivas y negativas ideales (TOPSIS)

Cod	S_i^+	S_i^-
F1	0,6093	0,0282
F2	0,1089	0,5094
F3	0,0634	0,5531
F4	0,0292	0,6082
F5	0,0835	0,5297
F6	0,0951	0,5176

Clave. Cod: código de material. S_i^+ : mediciones positivas, S_i^- : mediciones negativas.

En el método COPRAS se empleó la Ecuación (19) para determinar la matriz normalizada, tal como se describe en la Tabla 12, se empleó la Ecuación (12) para obtener la matriz estandarizada de pesos, como se observa en la Tabla 13, se utiliza las Ecuaciones (20) y (21) para determinar los valores normalizados de beneficio y costo, tal como se muestra en la Tabla 14, se usa la Ecuación (22) para obtener las alternativas prioritarias, se puede ver en la Tabla 15, y se emplea la Ecuación (23) para obtener el nivel de rendimiento de cada alternativa, como se observa en la Tabla 16 encontrándose que el Acero martensítico es la mejor opción.

Tabla 11. Proximidad relativa a solución ideal y ranking (TOPSIS)

Cod	C_i^*	Ranking
F1	0,0442	6
F2	0,8238	5
F3	0,8972	2
F4	0,9542	1
F5	0,8639	3
F6	0,8448	4

Clave. Cod: código de material. C_i^* : proximidad Ideal. Ranking: posición de alternativas.

Tabla 12. Matriz normalizada de decisión (COPRAS)

Cod	P	ME	EF	EU	E
F1	0,2411	0,1671	0,0880	0,1342	0,5046
F2	0,1174	0,1671	0,1187	0,1443	0,1239
F3	0,2302	0,1671	0,1407	0,1491	0,0917
F4	0,1419	0,1671	0,1803	0,1778	0,0505
F5	0,1338	0,1675	0,2330	0,1983	0,1101
F6	0,1356	0,1640	0,2392	0,1963	0,1193

Clave. Cod: código de material. P: precio en \$/kg. ME: módulo elástico en GPa. EF: esfuerzo a la fluencia en MPa. EU: Esfuerzo último en MPa. E: elongación en porcentaje.

Tabla 132. Matriz estandarizada de pesos obtenidos (COPRAS)

Cod	P	ME	EF	EU	E
F1	0,0234	0,00001040	0,0119	0,0036	0,3741
F2	0,0114	0,00001040	0,0160	0,0039	0,0918
F3	0,0223	0,00001040	0,0190	0,0040	0,0680
F4	0,0138	0,00001040	0,0243	0,0048	0,0374
F5	0,0130	0,00001042	0,0314	0,0053	0,0816
F6	0,0131	0,00001020	0,0322	0,0052	0,0884

Clave. Cod: código de material. P: precio en \$/kg. ME: módulo elástico en GPa. EF: esfuerzo a la fluencia en MPa. EU: Esfuerzo último en MPa. E: elongación en porcentaje.

Tabla 14. Sumatoria de pesos obtenidos de criterios beneficiosos y no beneficiosos (COPRAS)

S ₊₁	S ₊₂	S ₊₃	S ₊₄	S ₊₅	S ₊₆
0,0155	0,0199	0,0230	0,0291	0,0367	0,0375
S ₋₁	S ₋₂	S ₋₃	S ₋₄	S ₋₅	S ₋₆
0,3975	0,1032	0,0904	0,0512	0,0946	0,1016

Clave. S_{+i}: sumatorio de criterios beneficiosos. S_{-i}: sumatorio de criterios no beneficiosos.

Tabla 15. Prioridades relativas de cada alternativa (COPRAS)

Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	Q ₅	Q ₆
0,0488	0,1483	0,1697	0,2882	0,1769	0,1680

Clave. Q_i: Criterios prioritarios.

Tabla 163. Proximidad relativa a solución ideal y ranking (COPRAS)

Cod	U _i	Ranking
F1	16,94	6
F2	51,48	5
F3	58,90	3
F4	100,00	1
F5	61,39	2
F6	58,31	4

Clave. Cod: código de material. U_i: nivel de rendimiento. Ranking: posición de alternativas.

En el método PROMETHEE II, se emplearon las Ecuaciones (24) y (25), para determinar la matriz normalizada, tal como se indica en la Tabla 17, se empleó las Ecuaciones (26) y (27) para obtener las funciones de preferencia, como se observa en la Tabla 18, se utiliza la Ecuación (28) para determinar los valores de las funciones agregadas, tal como se muestra en la Tabla 19, se usa las Ecuaciones (29), (30) y (31) para obtener los valores de flujos de entrada, salida y valor neto de cada alternativa,

como se observa en la Tabla 20, encontrándose que el Acero martensítico es la mejor alternativa para este método.

Tabla 47. Matriz normalizada de decisión (PROMETHEE II)

Cod	P	ME	EF	EU	E
F1	0,0000	0,8889	0,0000	0,0000	0,0000
F2	1,0000	0,8889	0,2030	0,1569	0,8384
F3	0,0882	0,8889	0,3485	0,2316	0,9091
F4	0,8015	0,8889	0,6102	0,6798	1,0000
F5	0,8676	1,0000	0,9593	1,0000	0,8687
F6	0,8529	0,0000	1,0000	0,9680	0,8485

Clave. Cod: código de material. P: precio en \$/kg. ME: módulo elástico en GPa. EF: esfuerzo a la fluencia en MPa. EU: Esfuerzo último en MPa. E: elongación en porcentaje.

Tabla 58. Matriz de funciones de preferencia o pares (PROMETHEE II)

Pares	P	ME	EF	EU	E
P ₁ (1,2)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
P ₁ (1,3)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
P ₁ (1,4)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
P ₁ (1,5)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
P ₁ (1,6)	0,0000	0,8889	0,0000	0,0000	0,0000
P ₂ (2,1)	1,0000	0,0000	0,2030	0,1569	0,8384
P ₂ (2,3)	0,9118	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
P ₂ (2,4)	0,1985	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
P ₂ (2,5)	0,1324	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
P ₂ (2,6)	0,1471	0,8889	0,0000	0,0000	0,0000
P ₃ (3,1)	0,0882	0,0000	0,3485	0,2316	0,9091
P ₃ (3,2)	0,0000	0,0000	0,1454	0,0747	0,0707
P ₃ (3,4)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
P ₃ (3,5)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0404
P ₃ (3,6)	0,0000	0,8889	0,0000	0,0000	0,0606
P ₄ (4,1)	0,8015	0,0000	0,6102	0,6798	1,0000
P ₄ (4,2)	0,0000	0,0000	0,4072	0,5229	0,1616
P ₄ (4,3)	0,7132	0,0000	0,2618	0,4482	0,0909
P ₄ (4,5)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,1313
P ₄ (4,6)	0,0000	0,8889	0,0000	0,0000	0,1515
P ₅ (5,1)	0,8676	0,1111	0,9593	1,0000	0,8687
P ₅ (5,2)	0,0000	0,1111	0,7563	0,8431	0,0303
P ₅ (5,3)	0,7794	0,1111	0,6108	0,7684	0,0000
P ₅ (5,4)	0,0662	0,1111	0,3490	0,3202	0,0000
P ₅ (5,6)	0,0147	1,0000	0,0000	0,0320	0,0202
P ₆ (6,1)	0,8529	0,0000	1,0000	0,9680	0,8485
P ₆ (6,2)	0,0000	0,0000	0,7970	0,8111	0,0101

$P_6(6,3)$	0,7647	0,0000	0,6515	0,7364	0,0000
$P_6(6,4)$	0,0515	0,0000	0,3898	0,2882	0,0000
$P_6(6,5)$	0,0000	0,0000	0,0407	0,0000	0,0000

Clave. Pares: comparación de un material con otro. P: precio en \$/kg. ME: módulo elástico en GPa. EF: esfuerzo a la fluencia en MPa. EU: Esfuerzo último en MPa. E: elongación en porcentaje.

Tabla 69. Matriz de funciones agregadas o pares (PROMETHEE II)

Cod	P	ME	EF	EU	E
F1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001
F2	0,0000	0,0884	0,0193	0,0128	0,0143
F3	0,0740	0,0000	0,0000	0,0300	0,0450
F4	0,1887	0,1838	0,0000	0,0974	0,1124
F5	0,1469	0,1785	0,0620	0,0000	0,0173
F6	0,1366	0,1817	0,0652	0,0055	0

Clave. Cod: código de material. P: precio en \$/kg. ME: módulo elástico en GPa. EF: esfuerzo a la fluencia en MPa. EU: Esfuerzo último en MPa. E: elongación en porcentaje.

Tabla 20. Determinación de Flujos de entrada, salida, y valor neto (PROMETHEE II)

Cod	ϕ^+	ϕ^-	$\phi(i)$	Ranking
Acero con Plasticidad Inducida	0,00001	0,8325	-0,8324	6
Acero de fase doble	0,1770	0,1092	0,0678	4
Acero de fase compleja	0,1769	0,1265	0,0505	5
Acero martensítico	0,3004	0,0293	0,2711	1
Acero de baja aleación, AISI 8650	0,2578	0,0291	0,2287	2
Acero de baja aleación, AISI 8740	0,2523	0,0378	0,2145	3

Clave. Cod: código de material. ϕ^+ : flujo de entrada. ϕ^- : flujo de salida. $\phi(i)$: flujo neto. Ranking: posición de alternativas.

Mientras que en el método VIKOR, se aplica la misma metodología del TOPSIS hasta el Paso 3, por lo que los valores obtenidos para la matriz normalizada y ponderada, así como los valores ideales y anti-ideales son los indicados en las Tablas 7, 8 y 9, luego se aplican las Ecuaciones (34), (35) y (36) para determinar los indicadores de mediciones y condiciones de solución, tal como se muestra en la Tabla 21, obteniéndose que el mejor material a seleccionar corresponde al Acero Martensítico.

Tabla 21. Determinación de indicadores de medición (VIKOR)

U_i	R_i	V_i
0,9030	0,7415	1,0000
0,3468	0,1198	0,1678
0,1843	0,0878	0,0373

0,1388	0,0777	0,0000
0,1870	0,0974	0,0463
0,1960	0,1123	0,0635

Clave. U_i y R_i : constantes de medición. V_i : soluciones óptimas.

Como se muestra en la Tabla 22, todos los materiales que se sitúan en la posición 1 para los métodos multicriterio descritos, convergen a una solución única, tal como se indica para el material de Acero martensítico como el más óptimo para el diseño del segmento lateral estructural de los vehículos livianos. Mientras que los aceros de fase compleja y de baja aleación 8650 se mantienen en la posición 2 en el 50% de los métodos empleados, el resto de materiales difieren de una u otra manera en cada método por lo que no presenta estabilidad en el índice de respuesta y aceptación.

Tabla 22. Resultados obtenidos en Métodos Multicriterio

Mat	Ranking			
	TOPSIS	COPRAS	VIKOR	PROMETHEE II
Acero con Plasticidad Inducida	6	6	6	6
Acero de fase doble	5	5	5	4
Acero de fase compleja	2	3	2	5
Acero martensítico	1	1	1	1
Acero de baja aleación 8650	3	2	3	2
Acero de baja aleación 8740	4	4	4	3

Clave. Mat: material. Ranking: posición de métodos multicriterio aplicados.

En la Figura 3 se muestra el ranking de cada material en función de cada método multicriterio aplicado, es fácilmente identificable como anteriormente se mencionó, que el mejor material corresponde al acero martensítico, mientras que el acero de plasticidad inducida se coloca al final del ranking de posiciones siendo este el peor, y para el resto de materiales existen diferentes variaciones dependiendo del método utilizado.

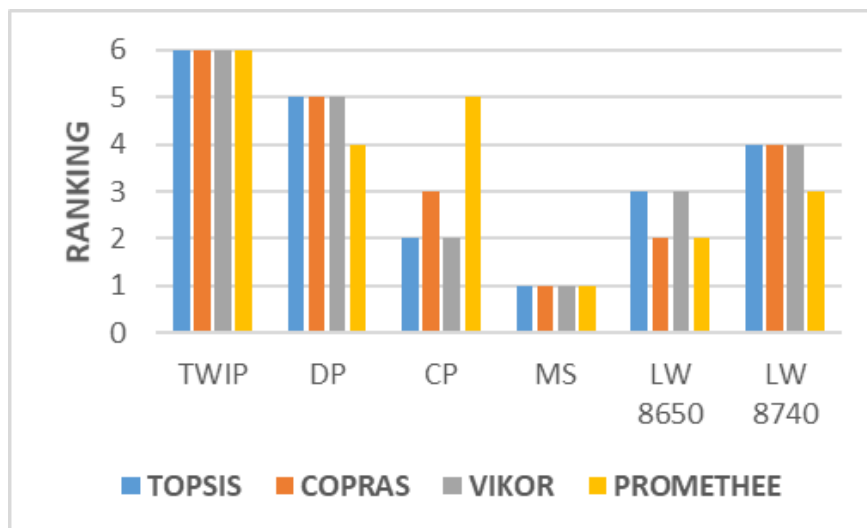


Figura 3. Comparación de Métodos Multicriterio

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los métodos de análisis multicriterio, son una importante herramienta para determinar e identificar la mejor alternativa en un conjunto de materiales, pueden adaptarse a diferentes condiciones y acercamientos en las diversas ramas de la ciencia, ingeniería y gestión de procesos [14].

Se han empleado métodos como el TOPSIS y PROMETHEE, para la implementación de componentes de la industria automotriz tales como: parachoques, palanca de frenos, cajas de cambio empleando materiales con base de fibras [15], para la manufactura de paneles de instrumentos de los vehículos aplicando el método VIKOR empleando materiales plásticos y compuestos [16], obteniendo soluciones aceptables para cada caso de aplicación mencionado.

En la actualidad, la mayor cantidad de fabricantes de componentes automotrices consideran todos los aspectos mecánicos, de manufactura y entorno que permitan minimizar las afectaciones que puedan provocar consecuencias en la productividad y calidad de sus productos [17], por lo que el empleo de herramientas como el análisis multicriterio, en el desarrollo de un producto, influye de manera positiva en los resultados y requerimientos deseados.

Mediante la metodología aplicada, se determinó que en la aplicación de métodos multicriterio al segmento estructural lateral de un vehículo, el material más apropiado es el acero martensítico. Esto se debe a la aplicación del método de ponderación de entropía como sistema de control de decisión, permitiendo aproximar valores de estimación entre cada criterio empleado a rangos admisibles a un conjunto de soluciones aceptables, obteniéndose una valoración unánime hacia el material indicado.

Los aceros martensíticos, pueden ser una opción aceptable en la construcción de segmentos estructurales en vehículos livianos, tal como lo indica [18], donde

aplicando el método multicriterio denominado AHP basado en la valoración y juicio humano, se determinó que más del 60% de elementos del vehículo de los segmentos exteriores de las puertas, son los más adecuados para garantizar la seguridad de los ocupantes y mejorar la eficiencia del vehículo durante la conducción.

Se han empleado aceros con base martensítica para la construcción del Audi TT [19], obteniendo un ahorro de peso en materiales ligeros, con gran resistencia ante cargas axiales. A pesar de tener un gran potencial, cabe mencionar en términos de fabricación, para los procesos de unión y maquinado de este material se deben emplear tecnologías especiales para la obtención de piezas [20].

De manera que se puede establecer que la posibilidad de inclusión del acero martensítico contribuiría significativamente en la reducción de peso y resistencia estructural de los vehículos, mejorando la eficiencia de estos durante la conducción, siempre y cuando se emplee el tipo de tecnologías adecuadas para el procesamiento de piezas y elementos de refuerzo.

FUENTES DE FINANCIAMIENTO

La investigación no fue financiada.

DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

APORTE DEL ARTÍCULO EN LA LINEA DE INVESTIGACIÓN

Este artículo presenta la aplicación de métodos de análisis multicriterio, que se utilizaron para determinar el material apropiado para el segmento estructural de los vehículos ligeros. Se presenta la comparación de alternativas de solución, demostrando que son una herramienta eficaz en la selección de materiales, independientemente del tipo de aplicación.

DECLARACIÓN DE CONTRIBUCIÓN DE CADA AUTOR

Para el desarrollo de este artículo Rodger Salazar Loor realizó el cálculo, análisis e interpretación de cada uno de los métodos multicriterio descritos, así como la escritura del manuscrito. Juan Rocha Hoyos contribuyó con la investigación de la metodología de los métodos multicriterio. Javier Martínez Gómez se encargó de la revisión de cada uno de los métodos empleados, así como del manuscrito final y Edilberto Llanes Cedeño contribuyó en el papel de tutor.

REFERENCIAS

- [1] E. Águeda, J.L. García, T. Gómez, J.M. Navarro y J.G. Gracia. Elementos estructurales del vehículo, Madrid: Paraninfo, 2016.
- [2] T. D. Porras Blas, "Análisis de las importaciones de partes y piezas automotrices desde el Perú". Tesis, Universidad de Guayaquil Facultad de Ciencias Administrativas, Guayaquil, 2017.
- [3] G. Vizán, Elementos estructurales del vehículo, Madrid: Editex, 2014.
- [4] J. Kershaw y K. VanGelder, Automotive Steering and Suspension, Burlington: Jones & Bartlett, 2017.
- [5] M. Ashby, Materials Selection in Mechanical Design, Kidlington, Oxford: Elsevier, 2011.
- [6] CES-EDUPACK, Software para selección de materiales, 2013.
- [7] N.H. Zardari, K. Ahmed, S.M. Shirazi, Z.B. Yusop. Weighting methods and their effects on multi-criteria decision making model outcomes in water resources management, Malaysia: Springer briefs in water science and technology, 2015.
- [8] B. Yilmaz y N.B. Harmancioglu, "Multi-criteria decision making for water resource management", WATER SA, p. 566, 2010.
- [9] Y. A. Kemal Vatansever, "Performance evaluation of websites using entropy and grey relational analysis methods: The case of airline companies", Decision Science Letters, pp. 122-123, 2017.
- [10] M. Faris y M.S. Salit, Materials Selection for Natural Fiber Composites, United Kingdom: Elsevier, 2017.
- [11] P. Chatterjee, Applications of preference ranking-based methods for decision-making in manufacturing environment, India: Jadavpur University, 2013.
- [12] P. Chatterjee y S. Chakraborty, "Investigating the Effect of Normalization Norms in Flexible Manufacturing System Selection Using Multi-Criteria Decision-Making Methods", Journal of Engineering Science and Technology Review, pp. 1-10, 2014.
- [13] N. Yalçın y U. Ünlü, "A multi-criteria performance analysis of Initial Public Offering (IPO) firms using CRITIC and VIKOR methods", TEDE, vol. 24, no. 2, pp. 534–560, Mar. 2017.

- [14] J. Martínez y R. A. Narváez, "Use of Multicriteria Decision Making (MCDM) Methods for Biomass Selection Aimed to Fischer Tropsch Processes ", *Avances en Ciencias e Ingenierías*, Volume 34, no. 6, pp. 1-8, 2016.
- [15] M. Noryani, S. M. Sapuan, M. T. Mastura, " Multi-criteria decision-making tools for material selection of natural fibre composites: A review ", *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, Volume 12, no 1, pp. 1-24, 2018.
- [16] R. J. Girubha y S. Vinodh, " Application of fuzzy VIKOR and environmental impact analysis for material selection of an automotive component ", *Materials and Design*, Volume 37, pp. 478-486, 2012.
- [17] A. Mayyas, "Expert system based approach for material selection of automobile body-in-white structural panels using numerical ranking and sustainability indices" *Clemson University*, pp. 1-220, 2012.
- [18] A. Mayyas, Q. Shen, M. Abdelhamid, D. Shan, A. Qattawi, M. Omar, "Using Quality Function Deployment and Analytical Hierarchy Process for material selection of Body-In-White", *Materials & Design*, Volume 32, no. 5, pp. 2771–2782, Jan. 2011.
- [19] G. Seehafer, "The body structure of the new Audi TT", *ATZ worldwide*, pp. 7–8, 2014.
- [20] V. Bhushan, V. Sulepeth, S. Yadav, "A review on Body in White solutions for improving lightweight automotive structures", *International Conference on New Era in Technologies, Science and Role of Management*, pp.170-175, 2018.

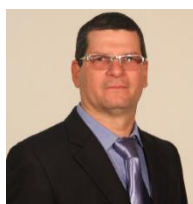
NOTA BIOGRÁFICA



Rodger Benjamín Salazar Loor. **ORCID ID** <https://orcid.org/0000-0001-9406-9452>
Obtuvo el título de Ingeniero Mecánico en la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Ecuador en 2015. Sus intereses de investigación son el Diseño mecánico, el modelado paramétrico y los métodos de análisis numéricos.



Javier Martínez Gómez. **ORCID ID** <https://orcid.org/0000-0001-8807-7595>. Nació en Madrid, España en 1983. Ha recibido su título de Ingeniero Industrial de la Universidad Carlos III de Madrid en 2008; de Master en Ciencia e Ingeniería de Materiales de la Universidad Carlos III de Madrid en 2010; y su título de Doctor en Ciencia de la Ingeniería de Materiales de la Universidad Carlos III de Madrid en 2013, Sus campos de investigación están relacionados con Menaje para cocinas para inducción y materiales para paredes en reactores de Fusión. Actualmente trabaja como Investigador Postdoc Prometeo en el Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables, INER.



Edilberto Antonio Llanes Cedeño. **ORCID ID** <https://orcid.org/0000-0001-6739-7661>, graduado de Ingeniero Mecánico Automotriz y Master en Eficiencia Energética por la Universidad de Cienfuegos – Cuba, graduado de Doctor en Ciencia por la Universidad Politécnica de Madrid – España. Con 10 años de experiencia profesional en el área de transporte automotor y con más de 15 años en la docencia. Ha sido profesor en varias universidades: Universidad de Granma – Cuba, Universidad de Zambeze – Mozambique, profesor invitado en la Universidad SEK Chile y actualmente profesor en la Universidad Internacional SEK – Ecuador. Es autor de varias obras científicas.



Juan Carlos Rocha-Hoyos. **ORCID ID** <https://orcid.org/0000-0003-2322-5459>, nació en Quito – Ecuador en 1984. Es Ingeniero Automotriz de la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, Magister de Sistemas Automotrices en la Escuela Politécnica Nacional. Temas de investigación: elementos de sistemas automotrices, motores y sus emisiones, además de la electrónica automotriz. Ha trabajado como profesor en la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE durante 7 años y actualmente docente e investigador en la Universidad Internacional SEK. También es un investigador agregado nacional acreditado.



Esta obra está sujeta a la Licencia Reconocimiento-SinObraDerivada 4.0 Internacional de Creative Commons. Para ver una copia de esta licencia, visite <http://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/> o envíe una carta Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA.