



Innovación en materiales compuestos: integración de ceb/atp-evoh/fibra natural mediante QFD y TRIZ

Innovation Composite Materials: Integration of SBR/ATP-EVOH/Natural Fiber Through QFD and TRIZ

María Leonor Méndez Hernández¹, Daniel Angeles-Herrera^{2*} Lidilia Cruz Rivero³

¹TecNM/Instituto Tecnológico de Cerro Azul, Carr. Tuxpan - Tampico Km. 60, Lomas Verdes, 92519, Cerro Azul, Ver.

^{2,3}TecNM/Campus Tantoyuca, Desviación Lindero Tametate S/N, La Morita, 92100 Tantoyuca, Ver.

*Autor de correspondencia: dangelesh0600@egresado.ipn.mx

Recibido Cinco de abril 2024; recibido en forma revisada 10 de junio 2024; aceptado 15 de noviembre 2024

RESUMEN

La industria de materiales compuestos se enfrenta a desafíos constantes para desarrollar productos que cumplan con exigencias técnicas y ambientales, de igual manera que sean sostenibles y de alto rendimiento, es por ello que resulta atractivo el desarrollo de mezclas innovadoras que combinan caucho de estireno – butadieno (CEB), almidón termoplástico (ATP), etileno – vinil alcohol (EVOH) y fibra natural. Estas mezclas prometen mejorar sus propiedades mecánicas y reducir el impacto ambiental. En este trabajo de investigación se utiliza como refuerzo una fibra natural altamente fibrosa que proviene y se cultiva en el municipio de Tantoyuca, Veracruz. La investigación se estructuró en cuatro fases principales de la metodología de Despliegue de la Función de Calidad (QFD) y la Teoría de Solución de Problemas Inventivos (TRIZ) para optimizar las formulaciones y satisfacer los requisitos del mercado, primeramente se utilizó el QFD para identificar las necesidades del cliente y los parámetros críticos de calidad, la metodología TRIZ fue útil para optimizar la formulación de mezclas

preliminares de CEB, ATP-EVOH y fibra natural, con el propósito de resolver conflictos técnicos y mejorar las propiedades del material, finalmente se realizaron análisis mediante pruebas fisicoquímicas y mecánicas. El crítico de calidad con mayor importancia que se contempla es la (resistencia del material) y para lograr una mejora, se refuerza con un Masterbatch CEB/ATP-EVOH. Como método complemento la teoría de resolución de problemas de inventiva, arroja que el parámetro fue traducido a los 39 parámetros como parámetro A:26 cantidad de sustancia (fibra natural), sin embargo, se ve perjudicada el parámetro B:16 la durabilidad de un objeto sin movimiento (mezclas). Se concluye que se logra mejorar la resistencia, el comportamiento térmico y las propiedades de barrera de las mezclas CEB/ATP-EVOH/Fibra natural.

Palabras Clave: CEB/ATP-EVOH, Fibra Natural, TRIZ, QFD

ABSTRACT

The composite materials industry faces constant challenges to develop products that meet technical and environmental requirements, as well as being sustainable and high-performance, which is why the development of innovative mixtures that combine styrene-butadiene rubber (SBR), thermoplastic starch (TPS), ethylene-vinyl alcohol (EVOH) and natural fiber is attractive. These mixtures promise to improve their mechanical properties and reduce environmental impact. In this research work, a highly fibrous natural fiber that comes from and is grown in the municipality of Tantoyuca, Veracruz, is used as reinforcement. The research was structured in four main phases of the Quality Function Deployment (QFD) methodology and the Inventive Problem-Solving Theory (TRIZ) to optimize the formulations and meet the market requirements. Firstly, QFD was used to identify the customer needs and critical quality parameters. The TRIZ methodology was useful to optimize the formulation of preliminary mixtures of SBR, ATP-EVOH and natural fiber, with the purpose of solving technical conflicts and improving the properties of the material. Finally, analyses were carried out using physicochemical and mechanical tests. The most important quality critical factor that is considered is (material resistance) and to achieve an improvement, it is reinforced with a SBR/ATP-EVOH Masterbatch. As a complementary method, the inventive problem-solving theory shows that the parameter was translated into 39 parameters as parameter A:26 quantity of substance (natural fiber), however, parameter B:16 the durability of a non-moving object (mixtures) is impaired. It is concluded that the resistance, thermal behavior and barrier properties of SBR/ATP-EVOH/Natural Fiber blends are improved.

Keywords: CEB/TPS-EVOH, Natural Fiber, TRIZ, QFD

INTRODUCCIÓN

El Agave Angustifolia Haw, utilizado como fibra natural, es conocido comúnmente como “agave espadín” o “maguey” es una planta de la cual se aprovechan sus hojas, tallo, flores y frutos, es fundamental en la producción de mezcal y juega un papel crucial en la cultura y economía de México. (Hernández, 2019, Castillo, 2020), tradicionalmente las fibras de *A. Angustifolia* se utilizan para elaborar artesanías y productos de uso común, destacando Tantoyuca, Veracruz, donde un gran número de comunidades indígenas se dedican al cultivo de esta fibra natural (Figura 1). Recientemente la investigación se ha enfocado en el desarrollo de materiales compuestos para mitigar la contaminación ambiental por plásticos (Meraz, *et al.* 2020; Cruz, *et al.*, 2022), por lo que se ha planteado la oportunidad de utilizar la fibra natural de *A. Angustifolia* por su versatilidad y sustentabilidad, que es renovable, biodegradable y que posee muy buenas características específicas (Pathan, Y. *et al.*, 2023) para ser mezclado con plásticos y obtener materiales parcialmente biodegradables, amigables con el

medio ambiente y con ello promover una economía más circular y sostenible. Para tal propósito, se requiere identificar un método estructurado y priorizar los atributos de la tecnología con el objetivo de familiarizarse con los problemas ambientales, en el diseño de soluciones naturales o ecológicas (Castro, *et al.*, 2022). El desarrollo de un producto inicia con las expectativas del cliente y concluye con la salida de un producto acabado, para lograr ese objetivo se utiliza el QFD (Montesinos, 2022, Kusuma, 2023). En el contexto de los materiales biodegradables, el QFD permite identificar y priorizar las características técnicas críticas que aseguran que el producto final cumpla con las expectativas del mercado y los objetivos de sostenibilidad (Liu, *et al.*, 2021). El desarrollo de la metodología QFD, permite obtener un crítico de calidad el cual puede ser traducido a los 39 parámetros de la metodología TRIZ como (Parámetro de mejora) y (Parámetro que empeora), y construyendo después la matriz de contradicciones, con ello analizar los principios recomendados y dar

solución al problema de inventiva, fundamentalmente la teoría de resolución de problemas hace referencia los 40 principios de inventiva. (Nikulin *et al.*, 2017). El QFD identifica y cuantifica los parámetros de ingeniería y TRIZ, logrando dar soluciones a los problemas de inventiva (Naveiro, *et al.*, 2018) promoviendo conjuntamente la evolución de un sistema tecnológico, donde la Casa de la Calidad (HoQ) es una herramienta que identifica la relación entre los requerimientos del cliente (RC) y las interacciones entre los requisitos técnicos (RT) que el producto a mejorar debe de contemplar en la etapa de diseño. Este trabajo muestra la relación existente entre ambas herramientas, ya que la secuencia de su desarrollo se complementa de una manera congruente, concreta y óptima para poder dar solución al rediseño del material CEB/ATP-EVOH mezclado con fibra natural.

METODOLOGÍA

En la primera fase, se identificaron las necesidades del cliente y los parámetros críticos de calidad utilizando QFD, la segunda fase involucró la

formulación de mezclas preliminares de CEB/ATP-EVOH y fibra *A. Angustifolia* y en la tercera fase, se aplicaron principios de TRIZ para resolver conflictos y mejorar las propiedades del material. A través del QFD se gestiona y se rediseña la mezcla CEB/ATP-EVOH con fibra de *A. Angustifolia* con el objetivo de transformar los RC en parámetros de calidad. Los RC son: resistencia (mecánica, térmica y a la humedad), fibra natural, material -no toxico, biodegradable, tiempo de degradación corto, textura estética, olor y color neutro, semillas -frutas-arboles integradas en la mezcla. Una vez analizados los RC se transforman a RT que resultan ser: Fibra de *A. Angustifolia* (FA.A), desfibrado manual (FA.A), corte de (FA.A) 1 cm., trituración de (FA.A) de 1 cm a 5 mm., compactación de (FA.A) con ATP, CEB/ATP-EVOH reforzado con (FA.A), obtención del compuesto, función para un solo uso, tamaño de 2 a 3mm. Teniendo los datos anteriores RC y RT y con las matrices QUES y COMOS, se construye la HoQ. Se agrupan por afinidad de los QUES.

Tabla 1 Clasificación por afinidad de los QUEs.

	Importancia de los QUEs	Material compostable actual fabricado a base de <i>A. Angustifolia</i>	Competidor 1	Competidor 2	Valor objetivo	Valor de mejora	Importancia general	Porcentaje de importancia
Resistente	7	1	4	4	5	1.8	12.6	17.8
Neutralidad térmica	2	1	4	4	5	1.8	3.6	5.1
Aislamiento de humedad	4	1	4	4	5	1.8	7.2	10.2
Fibras vegetales	5	14	4	4	4	1	5	7.1
Material compuesto no tóxico	7	4	3	3	4	1	7	9.9
Biodegradable	8	2	4	4	4	1.4	11.2	15.8
Tiempo de degradación corto	8	2	3	3	4	1.4	11.2	15.8
Textura estética	1	0	4	4	5	2	2	2.8
Olor neutro	4	4	4	4	5	1.2	4.8	6.8
Color natural (Beige)	3	4	1	1	4	1	3	4.2
Semillas de plantas, frutas y árboles integrados en la composición de la mezcla	2	0	0	0	3	1.6	3.2	4.5

Tabla 3 Relación entre los CTQ

RELACION ENTRE LOS CTQ	Método manual de desfilado de hojas <i>A. Angustifolia</i>	Fibra de <i>A. Angustifolia</i>	Corte de la fibra a un tamaño de 1 cm	Trituración de fibra de <i>A. Angustifolia</i> de 1 cm a un tamaño de 5 mm	Compactación de microfibras mediante el uso de un material compuesto de fibra <i>A. Angustifolia</i>	Polímero CEB/ATP-EVOH reforzado con mezcla compuesta de fibra <i>A. Angustifolia</i>	Proceso de formación del material compuesto	Función para un solo uso	Tamaño de semillas de 2 a 3 mm integrados en mezcla resultante
Método manual de desfilado de hojas de <i>A. Angustifolia</i>	+	+	+	+	+				
Fibra de <i>A. Angustifolia</i>		+	+	+	+				
Corte de la fibra a un tamaño de 1 cm			+	+	+				
Trituración de fibra de <i>A. Angustifolia</i> de 1 cm a un tamaño de 5 mm				+	+				
Compactación de microfibras mediante el uso de un material compuesto de fibra <i>A. Angustifolia</i>					+				
Polímero CEB/ATP-EVOH reforzado con mezcla compuesta de fibra <i>A. Angustifolia</i>						+			
Proceso de formación del material compuesto							+		
Función para un solo uso								+	
Tamaño de semillas de 2 a 3 mm integrados en mezcla resultante									+

Se realiza la matriz de relación (Tabla 4) que está en el centro del QFD, donde se muestra la relación de los QUEs demandados por el grupo de interés con los COMOs. El grado de relación entre los QUEs y los COMOs, se describe por medio de los símbolos, Fuerte (●): 9, Moderable (○): 3, Débil (○): 1, Valor 0: ninguna relación, y con ello se construye la Tabla 4.

Tabla 4 Matriz de relación entre los QUEs y los COMOs.

MATRIZ DE RELACIÓN	Método manual de desfilado de hojas <i>A. Angustifolia</i>	Fibra de <i>A. Angustifolia</i>	Corte de la fibra a un tamaño de 1 cm	Trituración de fibra de <i>A. Angustifolia</i> de 1 cm a un tamaño de 5 mm	Compactación de microfibras mediante el uso de un material compuesto de fibra <i>A. Angustifolia</i>	Polímero CEB/ATP-EVOH reforzado con mezcla compuesta de fibra <i>A. Angustifolia</i>	Proceso de formación del material compuesto	Función para un solo uso	Tamaño de semillas de 2 a 3 mm integrados en mezcla resultante
Resistente	○	●	●	●	●	●	●		
Neutralidad térmica	▽	●	●	●	●	●	●		
Aislamiento de humedad	▽	●	●	●	●	●	●		
Fibras vegetales	○	●				●			○
Material compuesto no tóxico		●				●			○
Biodegradable	▽	●				●	○	○	▽
Tiempo de degradación corto		●			●	●	○	○	
Textura estética			●	●			●		
Olor neutro	▽	●			●	●			
Color natural (beige)	●	●			●	●			
Semillas de plantas, frutas y árboles integrados en la composición de la mezcla					○	○	●		

Se realiza la tabla de relación, colocando símbolos descritos en la tabla 4, los cuales indican el grado de relación que existe y con ello se obtiene la importancia de los COMOs (Tabla 5).

La simbología para denotar la dirección de mejora de los COMOs es de la siguiente manera, Maximizar: (↑) “a mayor es mejor”, Objetivo: (x) “controlar”, Minimizar: (↓) “a menor es mejor” y se construye la Tabla 2.

Tabla 2 Clasificación de los COMOs.

COMOs	Fibra <i>A. Angustifolia</i> (F.A.A)	Desfilado manual (F.A.A)	Corte de (F.A.A) 1 cm	Trituración de (F.A.A) de 1 cm a 5 mm	Compactación de (F.A.A) con ATP	CEB/ATP-EVOH reforzado con (F.A.A)	Obtención del compuesto	Función para un solo uso	Tamaño de 2 a 3 mm
Dirección de mejora	x	x	↓	↓	x	x	x	x	x

Posteriormente se establece por símbolos el grado de relación entre cada CTQ tal como se muestra a continuación: Sinergia (+): Representa a los CTQ analizados están relacionados, valor (+1), Compromete (-): Indica que la relación de los CTQ es inversamente proporcional, valor (-1), Valor en 0: a menor es mejor. En la Tabla 3 se muestra la relación existente entre cada CTQ, usando la simbología antes descrita.

Tabla 5 Importancia de los COMOs.

COMOs	Fibra <i>A. Angustifolia</i> (F.A.A)	Desfibrado manual (F.A.A)	Corte de (F.A.A) 1 cm	Trituración de (F.A.A) de 1 cm a 5 mm	Compactación de (F.A.A) con ATP	CEB/ATP-EVOH reforzado con (F.A.A)	Obtención del compuesto	Función para un solo uso	Tamaño de 2 a 3 mm
Importancia de los COMOs	833.9	150.5	322.9	322.9	552.5	847.5	425.5	47.5	107.3
Porcentaje de importancia de los COMOs	22.9	4.1	8.9	8.9	15.2	23.3	12.6	1.3	2.9

Tabla 6 Matriz de contradicciones.

		PARÁMETRO QUE EMPEORA										Durabilidad de un objeto sin movimiento	
		11	12	13	14	15	16	17	18	19			
PARÁMETRO DE MEJOR	23	3		2	35	28	27, 16, 18	21		35	18, 24		
		36, 37	29	14, 30	28, 31	27, 3		36, 39	1				
	10	35, 3, 5	40	40	18	38	31	6, 13	5				
	24					10	10		19				
Cantidad de sustancia	25	37	4	35	3, 28	10, 28	28, 20, 10	35	1	35	38, 19		
		36, 4	17	3, 22, 5	18	18		16	29, 21	19, 21			
	10		15	14	3	3, 35, 31	18	17	18	34			
	36, 14	35	2, 17	35, 34	35, 10		3	29, 16					
26	3	14	40	10	40		17, 39		18				
	27	10	35			2	34, 27, 6			21	11, 27		
		24, 35	1, 16		11	35, 3		40	3	11			
	19	11		28	25		35, 10	32, 13	19				
	28	6	6	32	28	28	10, 26, 24	6					
28, 32	28, 32	35, 13	6, 32	6, 32	24	19, 28		6	3				
29	3	32	32	3	3		19	1, 32	6, 32				
	35	30, 40	18	27	27, 40		26	32	2				
PRINCIPIO DE INVENTIVA													

PRINCIPIOS DE INVENTIVA

Para complementar el resultado de la tabla 6, se utiliza la metodología TRIZ con los datos obtenidos en desarrollo del QFD. Tomando del QFD, el valor crítico de calidad RESISTENCIA (17.8), traduciendo el crítico de calidad a uno de los 39 parámetros que integra la metodología TRIZ, que hace referencia a un parámetro de mejora (parámetro A) siendo 26 (cantidad de sustancia). Sin embargo, al hacer una mejora en la cantidad de sustancia con el propósito de lograr mayor resistencia, se ve perjudicada la **durabilidad** de esta, analizando los 39 parámetros de la metodología TRIZ, se identifica que el parámetro que se perjudica es el 16 (**durabilidad de un objeto sin movimiento**). Al hacer la intersección en la matriz de contradicciones entre el parámetro que se mejora y el parámetro que empeora, se encuentra que el principio óptimo a implementar es 35

(Transformación de los estados físicos y químicos de un objeto).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se observa que la aplicación conjunta de las metodologías QFD y TRIZ, permitió establecer una relación clara entre ambas, facilitando la identificación de mejoras críticas en el diseño del producto. El análisis de QFD identificó como crítico de calidad el atributo “Resistencia”. Al aplicar la metodología TRIZ, este crítico de calidad tradujo a uno de los 39 parámetros de ingeniería **Parámetro A:26, Cantidad de sustancia**, se evaluó cuál de los 39 parámetros se vería afectado al implementar la mejora, identificándose el **Parámetro B: 16, Durabilidad de un objeto sin movimiento**. Esto sugiere que, al reducir la cantidad de sustancia en el producto, la durabilidad también sería impactada, lo que lleva a un balance entre ambos aspectos para mejorar el diseño.

CONCLUSIONES

Para mejorar las propiedades de la mezcla, es fundamental aumentar su resistencia mecánica, por

lo que se ha seleccionado el compuesto **CEB/ATP-EVOH** como refuerzo, que también ofrece propiedades adicionales como la **resistencia térmica** y la **resistencia a la humedad**. Al mejorar la resistencia térmica, el material se vuelve más estable frente a cambios de temperatura, lo que extiende su vida útil en aplicaciones exigentes. Este doble beneficio convierte al compuesto en una solución integral para mejorar tanto el desempeño como la durabilidad del material, respondiendo a las necesidades específicas de su uso en diversas aplicaciones industriales.

BIBLIOGRAFÍA

Castillo, J. *et al.* (2020). La fibra de henequén (*Agave fourcroydes*) como una opción para materiales compuestos amigables con el medio ambiente. *Desde el Herbario CICY* 12, 99-105. Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.,
http://www.cicy.mx/sitios/desde_herbario/ISSN:2395-8790

- Castro, L., Espitia, E. (2022). Estado de progreso en el desarrollo de proyectos software apoyado por Semat y QFD. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 30 (4), 719-732.
- Cruz, L., Méndez, L., Estévez, I., Angeles, D. (2022). Obtención de compuestos como alternativa sustentable a partir de copolímero Estireno – Butadieno, utilizando como refuerzo mezcla de ATP-EVOH/Fibra de coco (*Cocos Nucifera*), Clave 14355.22-PD, Tecnológico Nacional de México, Convocatoria 2022 “Proyectos de Investigación Científica, Desarrollo Tecnológico e Innovación, para los Institutos Tecnológicos Federales, Descentralizados y Centros”.
- Hernández, E. *et al.* (2019). Caracterización morfológica de *Agave angustifolia* y su conservación en Guerrero, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10 (3), 01 de abril – 15 de mayo.
- Kusuma, H. (2023). Sugarcane bagasse as an environmentally friendly composite material. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-03764-2>
- Liu, H.-C., Wu, S.-M., Wang, Z.-L., & Li, X.-Y. (2021). A new method for Quality Function Deployment with extended prospect theory under hesitant linguistic environment. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 68. <https://doi.org/10.1109/TEM.2018.2864103>
- Meraz, J., Cruz, L., Méndez, L., Rivera, J., Angeles, D., y Ramírez, C. (2020). Development of a composite from TPS–EVOH–SBR reinforced with coconut fiber. *Sustainability*, 12 (7838). <https://doi.org/10.3390/su12197838>.
- Montesinos-González, S. (2022). Mejora continua de un posgrado en México aplicando el QFD. *DYNA*, 89(222), 106-114.
- Naveiro, R. M., & Oliveira, V. M. (2018). QFD and TRIZ integration in product development: A model for systematic optimization of engineering requirements. *Production*, 28, e20170093. <https://doi.org/10.1590/0103-6513.20170093>

Nikulin Chandia C., Viveros P., Dorochesi M.,
Crespo Márquez A., y Lay Bobadilla P.F.
(2017). Metodología para el análisis de
problemas y limitaciones en emprendimientos
universitarios. *Innovar*, 27(63), 91-106.
<https://doi.org/10.15446/innovar.v26n63.60669>.

Pathan, Y., Veeresh Kumar G. B. (2023). Potential
of *Agave angustifolia* marginata for composite
and textile applications – A new source of
natural fibre. *Industrial Crops and Products*,
203, 117213,
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117213>

.