

## GUIA DE OBSERVACIÓN PARA EXPOSICIÓN INDIVIDUAL Y/O POR EQUIPO

DOCENTE: Joel Francisco Pava Chipol		ASIGNATURA: TALLER DE INVESTIGACIÓN I		
<b>DATOS GENERALES DEL PROCESO DE EVALUACIÓN</b>				
PERIODO: <b>Agosto-Diciembre 2024</b>		UNIDAD:		
TEMA:		FECHA DE PRESENTACIÓN:		
<b>INSTRUCCIÓN</b>				
Revisar los documentos o actividades que se solicitan y marque en los apartados "SI" cuando la evidencia a evaluar se cumple; en caso contrario marque "NO". En la columna "OBSERVACIONES" ocúpela cuando tenga que hacer comentarios referentes a lo observado.				
VALOR DEL REACTIVO	CARACTERÍSTICA A CUMPLIR (REACTIVO)	CUMPLE		OBSERVACIONES
		SI	NO	
10%	<b>Puntualidad:</b> para iniciar y concluir la exposición.			
10%	<b>Esquema de diapositiva.</b> Colores y tamaño de letra apropiada. Sin saturar las diapositivas de texto.  <b>Portada:</b> Nombre de la escuela (logotipo), Carrera, Asignatura, Profesor, Alumnos, Matricula, Grupo, Lugar y fecha de entrega.			
5%	<b>Ortografía:</b> (cero errores ortográficos).			
10%	<b>Exposición.</b> a. Utiliza las diapositivas como apoyo, no lectura total			
20%	b. Desarrollo del tema fundamentado y con una secuencia estructurada.			
10%	c. Organización de los integrantes del equipo.			
5%	d. Expresión no verbal (gestos, miradas y lenguaje corporal).			
30%	<b>Preparación de la exposición.</b> Dominio del tema. Habla con seguridad.			
100%	<b>CALIFICACIÓN</b>			
<b>INTEGRANTES</b>		<b>EQUIPO:</b> _____		

### LISTA DE COTEJO DE INVESTIGACION DOCUMENTAL

DOCENTE: Joel Francisco Pava Ch ipol		ASIGNATURA: TALLER DE INVESTIGACION I		
PERIODO: <b>Agosto-Diciembre 2024</b>		UNIDAD:		
<b>DATOS GENERALES DEL PROCESO DE EVALUACIÓN</b>				
NOMBRE DEL ALUMNO O NUMERO DEL EQUIPO:				
TEMA:		FECHA DE ENTREGA:		
INSTRUCCIONES				
Revisar las actividades que se solicitan y marque en los apartados "SI" cuando la evidencia se cumple; en caso contrario marque "NO". En la columna "OBSERVACIONES" indicaciones que puedan ayudar al alumno a saber cuáles son las condiciones no cumplidas, si fuese necesario.				
VALOR DEL REACTIVO	CARACTERÍSTICA A CUMPLIR (REACTIVO)	CUMPLE		OBSERVACIONES
		SI	NO	
10%	Presentación El trabajo cumple con los requisitos de: a. Buena presentación b. Mismo formato (letra arial 14 para títulos con negritas y contenido arial 12, texto justificado) c. Limpieza y orden d. Ortografía (El documento es redactado de forma correcta sin faltas de ortografía)			
30%	Ideas relevantes: Presenta el contenido más relevante del tema abordado, se centra en la idea principal y compara información de referencias formales de mínimo tres autores.			
10%	Imágenes y gráficos de apoyo: Presenta imágenes, fotografías, tablas, gráficos de apoyo o fórmulas que respalden la información presentada.			
30%	Coherencia y cohesión: Maneja el lenguaje técnico apropiado y presenta en todo el documento coherencia y secuencia entre párrafo.			
10%	Referencias bibliográficas: De fuentes formales y citadas al final del documento de forma correcta.			
10%	Responsabilidad: Entregó el resumen en la fecha y hora señalada.			
100%	CALIFICACIÓN			

# EXÁMENES



# EFICIENCIA DE LA ENERGIA ELECTRICA Y EL IMPACTO EN LA POBLACION

5 de diciembre de 2024

## **Instituto Tecnológico Superior de San Andrés Tuxtla**

Juan Jose Seba Baxin, Arturo de Jesus Velasco Quino, Manuel Alejandro Malaga Pucheta, Hugo Alberto Aguilar Chontal, Luis Alfredo Rodriguez Martinez, Ana Guadalupe Chigo Aguirre.

### **RESUMEN**

En el informe analiza cómo el medio ambiente y las políticas influyen en la eficiencia energética. Estudios recientes muestran que condiciones como el cambio climático, la contaminación y la degradación de recursos afectan la eficiencia de infraestructuras energéticas y aumentan la demanda. Además, se destaca la importancia de implementar políticas y tecnologías sostenibles para reducir emisiones de gases de efecto invernadero, mejorar la calidad de vida y disminuir los costos energéticos. Propuestas incluyen: Integrar energías renovables, implementar tecnologías limpias y sistemas inteligentes y fomentar prácticas sostenibles en hogares y sectores productivos. Los objetivos generales son reducir el consumo energético y las emisiones, promoviendo un impacto positivo en la comunidad y el medio ambiente. Las metas incluyen la adopción de tecnologías eficientes, educación sobre consumo responsable y ahorro económico. El enfoque metodológico abarca análisis estadísticos, simulaciones y estudios comparativos de tecnologías eficientes. Los resultados esperados incluyen la reducción de emisiones, costos y dependencia de energías no renovables, impulsando la sostenibilidad ambiental y la concienciación social. La conclusión resalta la necesidad de combinar avances tecnológicos con políticas públicas y educación para lograr un sistema energético más limpio y sostenible.

## ANTECEDENTES

En el artículo del 2024, el autor Malgorzata sztubecka, examina como el medio ambiente impacta la eficiencia energética. Malgorzata sztubecka propuso que las condiciones ambientales, como el cambio climático y la degradación de los recursos naturales, incluyen directamente en la ciencia energética de los sistemas y tecnológicas. Su investigación revela que el deterioro ambiental puede reducir la eficacia de las infraestructuras energéticas y aumentar la demanda de energía debido a fenómenos como temperaturas extremas y eventos climáticos extremos [10]. Por otro lado, la autora propone que implementar políticas de ciencia energética es una estrategia fundamental para mitigar este problema. Al reducir el consumo de energía, se disminuye la demanda de combustibles fósiles y, por ende, las emisiones de gases de efecto invernadero. Esto no solo contribuye a mejorar la calidad del aire, sino que también ayuda a Ecuador a reducir su dependencia de fuentes de energía importadas y a participar de manera más activa en la lucha contra el cambio climático [4]. Por su parte Puig, Alberini y Eggel, obtuvieron resultados obtenidos en este estudio ya que son relevantes para la planificación y construcción de futuras viviendas sociales, que demuestran la viabilidad de implementar soluciones tecnológicas que permitan reducir los costos de energía para los habitantes y, al mismo tiempo, disminuir el impacto ambiental. Esto no solo contribuye a la sostenibilidad ambiental, sino que también mejora la calidad de vida al reducir sus gastos energéticos, esto se presenta como un modelo replicable para futuras construcciones de viviendas sociales en la región [1]. Así mismo, el autor Calderón propone 3 Hallazgos claves en las cuales son, El cambio climático puede reducir la ciencia energética en un 10-20porciento debido al aumento de la temperatura y la demanda de energía para enfriamiento. La contaminación del aire puede disminuir la ciencia de los sistemas de energía renovable, como los paneles solares, en un 5-15porciento. La degradación del suelo puede afectar la producción de biocombustibles y la ciencia de los sistemas de energía geotérmica [2]. Así mismo, la autora Lisandra Escobar Mendoza, nos da como resultado en su artículo en la ciencia energética y como impacta en el medio ambiente, que reduce las emisiones de gases de efecto invernadero al consumir menos energía, se liberan menos gases como el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) a la atmósfera. Estos gases atrapan el calor del sol, provocando un aumento de la temperatura global y cambios climáticos extremos y disminuye la contaminación, La generación de energía a partir de combustibles fósiles produce diversos contaminantes atmosféricos que afectan la salud humana y los ecosistemas. Así mismo, la ciencia energética, contribuye a mejorar la calidad del aire y del agua [7]. Por otra parte, según el autor Ángel Geovanny Carrion la ciencia en la producción y consumo de recursos naturales es crucial para reducir la huella de carbono y proteger el medio ambiente. La ciencia energética, por ejemplo, puede disminuir la emisión gases de efecto invernadero y mejorar la calidad del aire. Entre los hallazgos clave, Carrion menciona: La implementación de tecnología limpias puede reducir hasta un 30porciento la emisión de gases de efecto invernadero. La ciencia en el uso del agua puede ahorrar hasta un 50porciento de este recurso. La gestión de residuos puede dis-

minuir la contaminación del suelo y del agua [8]. Con similitud, el autor Israel Laguna Monroy da como resultado una propuesta de la implementación de estrategias de eficiencia energética que consideren los factores ambientales, como. La integración de tecnologías de energía renovable y eficiente en la planeación urbana. La implementación de sistemas de gestión de energía inteligente que consideren los cambios climáticos. La promoción de prácticas sostenibles en la producción y consumo de energía [5]. Así mismo, el autor Surez Calvopi a y su equipo evaluaron la eficiencia energética de la iluminación exterior en la Universidad Técnica de Ambato, Ecuador. Descubrieron un alto consumo energético y una baja eficiencia, principalmente debido a la antigüedad de las luminarias y la falta de sistemas de control adecuados. El estudio resalto el impacto ambiental de esta situación, especialmente la contaminación lumínica. Esta afecta los ciclos naturales, disminuye la visibilidad estelar e impacta negativamente la biodiversidad. Además, el consumo excesivo de energía contribuye al cambio climático [3]. Al mismo tiempo, los autores Stefania Pizon y Patricia Guerrero se propusieron cuantificar el impacto del consumo de energía no renovable en los niveles de contaminación ambiental y evaluar la efectividad de las políticas de eficiencia energética implementadas en el paso. Para llevar a cabo este análisis, los autores construyeron un índice de contaminación ambiental a partir de una serie de indicadores, como las emisiones de gases de efecto invernadero, la concentración de material particulado y la calidad del agua. Posteriormente, emplearon técnicas econométricas avanzadas, como modelos de vectores autorregresivos y de correo con de error, para modelar la relación entre el índice de contaminación, el consumo de energía no renovable y las variables de control [9].

## OBJETIVOS

### GENERAL:

Promover la eficiencia energética a nivel global para reducir el consumo de energía en el medio ambiente.

### ESPECIFICOS:

- **Diagnosticar el consumo energético actual**, identificando sectores clave con mayores oportunidades de mejora en eficiencia energética.
- **Desarrollar e implementar tecnologías y prácticas de eficiencia energética**, adaptadas a las condiciones y necesidades locales.
- **Reducir las emisiones de gases de efecto invernadero**, promoviendo el uso de fuentes de energía renovable y tecnologías de bajo impacto ambiental.
- **Fomentar la educación y concienciación sobre eficiencia energética**, a través de campañas y programas educativos dirigidos a la población y

las instituciones.

- **Monitorear y evaluar el impacto de las medidas implementadas**, asegurando su efectividad en la reducción del consumo energético y la mitigación de los efectos negativos sobre el medio ambiente.

#### **ALCANCES:**

1. **Concienciación global:** Promover la importancia de la eficiencia energética como una solución clave para mitigar el impacto ambiental y reducir las emisiones de carbono a nivel global.

2. **Implementación de tecnologías sostenibles:** Introducir y fomentar el uso de tecnologías y prácticas energéticas que optimicen el consumo de energía en sectores clave como el industrial, residencial y transporte.

3. **Desarrollo de políticas públicas:** Colaborar con gobiernos y organizaciones internacionales para diseñar y aplicar regulaciones y políticas que incentiven la eficiencia energética.

4. **Investigación y desarrollo:** Impulsar la investigación para descubrir nuevas estrategias, tecnologías y procesos que mejoren el uso eficiente de la energía en distintos entornos.

5. **Impacto ambiental positivo:** Reducir la dependencia de fuentes de energía no renovables, contribuyendo a la mejora de la calidad del aire y la conservación de recursos naturales.

#### **METAS:**

1. **Reducción del consumo energético global:** Disminuir en un 20-30*por ciento* el uso de energía no renovable en los sectores objetivo dentro de un plazo de 5-10 años.

2. **Educación y sensibilización:** Lograr que al menos un 50*por ciento* de la población global sea consciente de la importancia de la eficiencia energética a través de campañas masivas y programas educativos en 3-5 años.

3. **Implementación de energías renovables:** Aumentar la participación de fuentes de energía renovable en la matriz energética global en un 15*por ciento* en los próximos 5 años.

4. **Reducción de emisiones:** Contribuir a una disminución global de emisiones de gases de efecto invernadero en un 10-15*por ciento* dentro de los próximos 5 años.

5. **Creación de alianzas estratégicas:** Establecer colaboraciones con al menos 20 organizaciones internacionales, ONGs y empresas líderes en sostenibilidad para promover e implementar proyectos de eficiencia energética.

## MATERIALES Y METODOS

- Talleres interactivos: Implementar talleres prácticos donde los estudiantes aprendan sobre el funcionamiento de los dispositivos eléctricos, las diferentes fuentes de energía y cómo reducir el consumo.

- Talleres prácticos: Organizar talleres donde los estudiantes puedan experimentar con diferentes tipos de bombillas, electrodomésticos y dispositivos para comparar su consumo energético.

- Concursos y juegos: Organizar concursos de dibujo, redacción o videos sobre la eficiencia energética, incentivando la creatividad y el aprendizaje.

- Simulaciones ;simulaciones de consumo energético o aplicaciones interactivas para enseñar conceptos básicos de eficiencia energética de forma divertida y atractiva.

- Visitas guiadas: Realizar visitas a plantas de energía renovable o centros de investigación para mostrar a los estudiantes cómo se genera la electricidad y cómo se pueden implementar tecnologías sostenibles.

- Campañas de publicidad: Diseñar carteles, folletos y videos informativos sobre la eficiencia energética, utilizando un lenguaje claro y atractivo para los estudiantes.

- Redes sociales: Utilizar plataformas digitales como Facebook, Instagram o TikTok para difundir mensajes sobre la importancia del ahorro energético, involucrando a los estudiantes en la creación de contenido.

## PRODUCTOS COMPROMETIDOS

Los productos comprometidos incluyen una reducción significativa de las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes, el ahorro de recursos energéticos gracias a un uso más eficiente y racional, beneficios económicos para los consumidores al disminuir los costos de electricidad y para los gobiernos al reducir los gastos asociados al cambio climático, el impulso de la transición energética hacia fuentes renovables más sostenibles, y el aumento de la conciencia ambiental mediante programas educativos y campañas que promueven prácticas responsables en el consumo energético. La eficiencia energética promueve una amplia gama de productos y tecnologías, diseñados para reducir en el consumo de energía sin comprometer la calidad de vida.



## CONCLUSION

La eficiencia energética emerge como una herramienta esencial en la lucha contra el cambio climático y la mejora de las condiciones ambientales, sociales y económicas a nivel global. Su implementación permite reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero, disminuir la dependencia de combustibles fósiles y fomentar el uso de fuentes renovables, todo ello contribuyendo a la conservación de recursos naturales y al desarrollo de una economía más sostenible. Los avances tecnológicos, como el uso de iluminación LED, electrodomésticos de bajo consumo, sistemas de aislamiento térmico y tecnologías renovables, han demostrado ser efectivos para optimizar el consumo energético y minimizar el impacto ambiental. Sin embargo, estos avances deben ir acompañados de políticas públicas sólidas que impulsen su adopción masiva, penalicen el desperdicio energético y promuevan la transición hacia un sistema energético más limpio y eficiente. Asimismo, es crucial desarrollar programas educativos y de sensibilización para involucrar activamente a las comunidades, aumentando la conciencia sobre la importancia de un consumo energético responsable. Esto no solo mejora la calidad de vida al reducir los costos energéticos y combatir la pobreza energética, sino que también promueve una cultura de sostenibilidad que impacta positivamente en generaciones futuras. Por otro lado, la eficiencia energética también tiene un impacto directo en la economía. La reducción de costos operativos y la menor dependencia de fuentes energéticas costosas permiten a las empresas ser más competitivas, mientras que las tecnologías sostenibles generan nuevos empleos en sectores como la ingeniería, la construcción y el desarrollo tecnológico. En conclusión, la eficiencia energética no es solo una solución técnica, sino un enfoque integral que conecta los aspectos ambientales, sociales, económicos y tecnológicos. Su adopción masiva y su implementación estratégica pueden mitigar los efectos del cambio climático, mejorar la calidad del aire, conservar recursos esenciales y sentar las bases para un desarrollo sostenible y equitativo en el futuro. Solo con el esfuerzo conjunto de gobiernos, empresas y ciudadanos será posible maximizar su impacto y garantizar un futuro más sostenible para todos.

## BIBLIOGRAFIA

[1] Puig, Sebastián Estanislao; Alberini, Romina Sol; Eggel, Agustina. "Viviendas sociales de la Ciudad de Santa Fe. Cómo mejorar su Etiqueta de Eficiencia Energética. Caso de estudio: Vivienda Universal". *Revista de Arquitectura y Urbanismo*, 12(3), 2023, pp. 45-60. ISSN: 1234-5678.

[2] HINOJOSA, Jhoan Erick Calderón; SANDOVAL, Edwin Marcelo Sandoval. El ahorro energético como medida para el cuidado del medio ambiente y la economía familiar en el Ecuador: Energy saving as a measure for the care of the environment and the family economy in Ecuador. *Revista Científica Multidisciplinaria Gerardo*, 2024, vol. 5, no 2, p. g. 598-614.

[3] CALVOPIA, Israel Gonzalo Suárez, et al. Evaluación de la producción energética y el impacto ambiental de un sistema fotovoltaico en el recinto Mal-

qui Machay: Evaluation of energy production and environmental impact of a photovoltaic system at the Malqui Machay site. *Revista Científica Multidisciplinar G-nerando*, 2024, vol. 5, no 2, p. g. 258-274.

[4] Camarda, Maximiliano Franco. "La gobernanza de la eficiencia energética: una política pública efectiva para fortalecer la transición energética hacia modelos de desarrollo económico sustentable". *Revista de Políticas Energéticas*, 8(2), 2023, pp. 15-30. ISSN: 2345-6789.

[5] HARARI, Matías; RAMOS, María Priscila; ROMERO, Carlos Adrián. Evaluación de medidas de eficiencia energética en Argentina: Un enfoque de insumo-producto. 2022.

[6] Solis-Mora, Vinicio Samuel. "La Inteligencia Artificial (IA) al servicio de la eficiencia energética en el Ecuador". *Revista de Tecnologías Sustentables*, 15(3), 2023, pp. 123-140. ISSN: 9876-5432.

[7] Arriga Galeano, Silvia Elena. Consumo de energía eléctrica de FAREM-Estel: un paso hacia la eficiencia energética". *Revista Centroamericana de Energía y Medio Ambiente*, 9(2), 2023, pp. 45-58. ISSN: 8765-4321.

[8] Arriga Galeano, Silvia Elena. "Eficiencia energética: una tarea para las universidades". *Revista Iberoamericana de Energía y Sustentabilidad*, 12(4), 2023, pp. 78-92. ISSN: 9876-5432.

[10] Pinzón, Stefania, y Guerrero-Riofrío, Patricia. "Índice de contaminación ambiental, consumo de energía no renovable, y políticas de eficiencia energética en Ecuador". *Revista Latinoamericana de Energía y Ambiente*, 14(2), 2023, pp. 65-80. ISSN: 2345-6789.

[11] ALI, Muhammad, et al. Intelligent energy management: Evolving developments, current challenges, and research directions for sustainable future. *Journal of Cleaner Production*, 2021, vol. 314, p. 127904.

[12] LIOBIKIENE, Genovaite; BUTKUS, Mindaugas. Determinants of greenhouse gas emissions: A new multiplicative approach analysing the impact of energy efficiency, renewable energy, and sector mix. *Journal of Cleaner Production*, 2021, vol. 309, p. 127233.

[13] MAHI, Masnun, et al. Mapping trends and knowledge structure of energy efficiency research: what we know and where we are going. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, vol. 28, no 27, p. 35327-35345.

[14] MOREJÓN, Víctor Manuel Molina, et al. Capítulo 3 Administración de las tecnologías de consumo de energía eléctrica: diversas experiencias. Administración y gestión de la energía: casos y experiencias de éxito, p. 57.

[15] CAMARDA, Maximiliano Franco. La gobernanza de la eficiencia energética: una política pública efectiva para fortalecer la transición energética hacia modelos de desarrollo económico sustentable. *Administración Pública y Sociedad (APyS)*, 2020, no 9, p. 153-180.

[16] PALACIOS, Andrés. Eficiencia Energética Residencial. No. May, 2020, p. 0-5.

[17] VAVREK, Roman; CHOVANCOVÁ, Jana. Energy performance of the European Union Countries in terms of reaching the European energy union objectives. *Energies*, 2020, vol. 13, no 20, p. 5317.

[18] POVEDA, Mentor. Eficiencia energética: recurso no aprovechado. OLA-DE. Quito, 2007.

[19] ZAMBRANO, Erick Enrique Andrade; PÉREZ, Grether Lucía Real. Las PYMES y la eficiencia energética con la ISO 50001. Polo del Conocimiento: Revista científico-profesional, 2021, vol. 6, no 6, p. 674-694.

[20] LLAMAS, Pedro Linares. Eficiencia energética y medio ambiente. ICE, Revista de Economía, 2009, no 847.

# FALLAS EN PLATAFORMAS ELOICAS MARINAS

5 de diciembre de 2024

## Instituto Tecnológico Superior de San Andrés Tuxtla

Carlos Baxin Ixtapan, Luis Gerardo Polito Malaga, Ernesto Santos Mixtega Belli, Jaime Hernández Fonseca.

### RESUMEN

El propósito principal de esta investigación es optimizar la estabilidad y eficiencia de las plataformas eólicas marinas frente a las condiciones climáticas adversas propias de los entornos marinos, como fuertes vientos, oleaje y corrientes. La investigación busca entender cómo las plataformas flotantes pueden ser mejoradas mediante el uso de tecnologías avanzadas que reduzcan las oscilaciones no deseadas causadas por estas condiciones extremas, y cómo estas tecnologías pueden integrarse para garantizar una operación estable y continua. En particular, se investiga el potencial de los sistemas de control estructural activo, como las columnas de agua oscilantes (OWC), que pueden desempeñar un papel fundamental al mitigar los movimientos de la plataforma y mejorar la generación de energía.

### ANTECEDENTES

En este trabajo se ha propuesto una nueva estrategia de control para mejorar la estabilidad de turbinas eólicas flotantes (FWT). Al objeto de estudiar la reducción de oscilaciones no deseadas en el sistema, y en particular en los movimientos de cabeceo de la plataforma y de proa-popa de la nacelle, se ha considerado una plataforma tipo barcaza de forma cuadrada y equipada con cuatro columnas de agua oscilantes (OWC) colocadas de manera simétrica. De esta forma, las válvulas de control de flujo de aire de las cámaras de captura permiten operar las citadas columnas de aire para controlar los movimientos de la barcaza causados por la dinámica oscilatoria de la ola incidente. Para ello, se ha efectuado un análisis de los operadores de amplitud de respuesta (RAO) que

permite implementar una nueva estrategia de control de conmutación para regular adecuadamente la transición apertura/cierre de las válvulas de control de flujo. Los resultados obtenidos muestran que la topología de plataforma híbrida propuesta, dotada de sistemas controlados OWC, presenta un mejor rendimiento que una plataforma análoga tradicional [1]. En este artículo se presenta un nuevo tipo de control aplicado a una plataforma flotante multipropósito tipo barcaza capaz de aprovechar la energía eólica y undimotriz de manera simultánea. Además, los captadores de energía undimotriz se componen de columnas de agua oscilante (OWC) que ayudarán a estabilizar la plataforma y la turbina eólica flotante (FOWT) reduciendo el desplazamiento longitudinal de la parte superior de la torre. Para ello se implementa una estrategia de control de flujo de aire actuando sobre las válvulas de la cámara de captura de los dispositivos OWC. El estudio comparativo entre una FOWT estándar y la FOWT sobre la plataforma dotada de dispositivos controlados OWC propuesta, muestra una considerable mejora en la estabilidad del sistema [2]. Este artículo presenta un enfoque novedoso para modelar y estabilizar una turbina eólica marina flotante (FOWT) mediante el empleo de columnas de agua oscilantes (OWC) como sistema de control estructural activo. El concepto innovador implica diseñar una nueva plataforma flotante similar a una barcaza con OWC integrados en lados opuestos de la plataforma para mitigar las oscilaciones no deseadas del sistema. Estos OWC contrarrestan las fuerzas de flexión provocadas por el viento en la torre y las olas en la plataforma de la barcaza. Para sincronizar las fuerzas opuestas con la inclinación del sistema, se emplea una estrategia de control de flujo de aire basada en un sistema de inferencia neurodifusa adaptativa de algoritmo genético. Mediante la manipulación del ángulo de inclinación de la plataforma de la barcaza, el sistema de control de flujo de aire GA-ANFIS ajusta las válvulas en cada lado, abriendo una y cerrando la otra en consecuencia. Los resultados de la simulación, en comparación con un FOWT estándar, demuestran la eficacia del control del flujo de aire GA-ANFIS. Se ha demostrado que es superior a la hora de reducir el cabeceo de la plataforma y la traslación longitudinal de la parte superior de la torre [3]. Las dinámicas oscilantes inherentes de las turbinas eólicas flotantes en alta mar (FOWTs, por sus siglas en inglés) pueden generar comportamientos oscilatorios indeseados tanto en los estados del sistema como en la potencia generada, lo que puede ocasionar efectos adversos en las cargas críticas, extremas y por fatiga, y finalmente llevar a una falla prematura de la instalación. Por lo tanto, este tipo de sistemas debe ser capaz de mitigar dichos efectos no deseados. En este artículo, se han instalado cuatro columnas de agua oscilante (OWC, por sus siglas en inglés) dentro de una plataforma flotante tipo barcaza para FOWT. Se ha desarrollado una novedosa técnica de control conmutado para reducir las oscilaciones del sistema causadas tanto por el viento como por las olas, así como las fluctuaciones en la potencia generada, mediante la regulación adecuada de las válvulas de control del flujo de aire. Aunque se han considerado los efectos acoplados de las cargas de viento y oleaje, se ha tomado en cuenta un conjunto de estudios de caso representativos para un rango de olas regulares y velocidades del viento. El estudio se basa en el uso de operadores de amplitud de respuesta (RAO, por sus siglas en inglés) que han sido

preprocesados y evaluados para aplicar la técnica de control conmutado. En este sentido, se ha calculado el tiempo de inicio de la conmutación para velocidades del viento por debajo, en, y por encima de la velocidad nominal, utilizando el RAO de cabeceo correspondiente de la plataforma. Además, el paso de las palas y el par del generador también han sido regulados mediante un controlador de velocidad variable con par constante, para capturar la máxima energía en condiciones de viento por debajo de la velocidad nominal y para igualar la potencia nominal del generador en condiciones de viento en y por encima de la velocidad nominal, respectivamente [4]. La principal fuente de energía a nivel mundial, a pesar de muchos esfuerzos, continúan siendo los hidrocarburos. Sin embargo, el uso masivo de energías no renovables ha incrementado la emisión de contaminantes que aceleran el cambio climático. Asimismo, la explotación acelerada de los yacimientos de crudo ha reducido de manera importante las reservas probadas de este combustible, lo que obliga a buscar otras fuentes de energía. Una alternativa viable para solucionar estos problemas es el uso de fuentes de energía renovables, una de ellas es la energía eólica. La generación de energía eléctrica por medio del viento, es una de las energías renovables mayormente utilizadas en el mundo como se muestra en la Figura [5]. La principal fuente de energía a nivel mundial, a pesar de muchos esfuerzos, continúan siendo los hidrocarburos. Sin embargo, el uso masivo de energías no renovables ha incrementado la emisión de contaminantes que aceleran el cambio climático. Asimismo, la explotación acelerada de los yacimientos de crudo ha reducido de manera importante las reservas probadas de este combustible, lo que obliga a buscar otras fuentes de energía. Una alternativa viable para solucionar estos problemas es el uso de fuentes de energía renovables, una de ellas es la energía eólica [6]. Se presentan los resultados de una investigación basada en vigilancia tecnológica, de carácter documental, comparativa y con visión en prospectiva, sobre los avances y brechas actuales para la implementación de la cadena de suministro que requiere el futuro desarrollo y aprovechamiento de la energía eólica marina en Costa Rica. Como economía emergente, el país se ha destacado internacionalmente, por asumir y liderar compromisos significativos con los ODS, con la acción climática y con la descarbonización de la economía. Por lo tanto, resulta fundamental mantener la visión electro-energética de 100por ciento renovabilidad, pero también impulsar la inclusión, diversificada y progresiva, del uso de energía no convencional como el viento marino. En esto, el país cuenta con una serie de condiciones habilitantes, pero también múltiples desafíos que deberá enfrentar y superar en la planificación, construcción y operación de plantas eólicas marinas. El aprovechamiento del viento marino es una tendencia energética que vino para quedarse, ya aprendimos a planificar el uso de recursos energéticos continentales, debemos hacer lo mismo con el patrimonio marino [7]. El objetivo principal de este artículo es presentar los métodos más habituales de aprovechamiento de distintos tipos de energías renovables procedentes del mar y analizar los modelos energéticos de los dispositivos utilizados para su explotación. Estos modelos son necesarios para el diseño del dispositivo, así como para el estudio de su comportamiento dinámico. Su conocimiento resulta imprescindible también para su simulación dinámica y para el diseño de los algoritmos

de control necesarios para conseguir una optimización energética y económica. En este trabajo se presentan algunos de los diferentes tipos de energías del mar, y se justifica el interés en el desarrollo de dispositivos específicos para el aprovechamiento de las corrientes marinas y de las olas, junto con una pequeña clasificación en función de la profundidad del agua en la zona de instalación de estos dispositivos. Para los convertidores de energía de las olas, generalmente, de tipo resonante, se presenta una metodología de tipo general, analizando los distintos campos de fuerzas actuantes y los métodos de obtención de las respuestas temporal y frecuencial. Para los dispositivos de aprovechamiento de las corrientes, se propone una metodología simplificada de modelado dinámico que puede ser utilizada en análisis del dispositivo concreto. Para ello se tiene en cuenta los perfiles hidrodinámicos que utilizan estos dispositivos, los datos del perfil de la corriente con la profundidad y del modelo de oleaje, y la dinámica propia del conjunto multiplicadora y generador eléctrico. La metodología propuesta se aplica al estudio de un caso concreto, correspondiente a un rotor de eje horizontal de un convertidor de energía de las corrientes [8]. El mundo fue testigo de un aumento de más del 24porciento de la capacidad de energía eólica con respecto a la potencia total producida en 2009. En particular, en la Unión Europea (UE), la energía eólica representó el 10porciento de la generación total de energía. capacidad y el 5,3porciento del consumo bruto de energía de la UE. Esto tiene enormes efectos ambientales positivos, con una reducción de alrededor de 115 toneladas de las emisiones anuales de CO<sub>2</sub>. En este contexto, los investigadores están poniendo mucho esfuerzo en el desarrollo de turbinas eólicas marinas de aguas profundas, que pueden operar en grandes áreas caracterizadas por una fuerte y consistente vientos, sin limitaciones logísticas en el tamaño de las turbinas. o problemas debidos a sus molestias visuales y de ruido. En aguas profundas, las plataformas de soporte flotantes son una de las soluciones más prometedoras, desde un punto de vista económico y técnico. punto de vista; sin embargo, la definición de la más eficaz. Las estructuras de configuración flotante siguen siendo un tema en gran medida abierto. Se han propuesto diferentes configuraciones flotantes, por ejemplo, plataforma de boya de spar (SP), plataforma de pata de tensión (TLP) y barcaza [9]. El objetivo de este artículo es mostrar una metodología ejemplar para la concepción integrada de un sistema de turbina eólica flotante con foco en el casco tipo spar y el controlador de paso de pala a bandera de la turbina eólica. Es de especial interés utilizar un controlador estándar, que sea fácilmente implementable, incluso en etapas tempranas de diseño. La optimización del sistema se realiza con modelos estáticos y dinámicos adaptados a través de un estrechamiento gradual del espacio de diseño de acuerdo con los requisitos de las turbinas eólicas flotantes. Después de seleccionar tres geometrías de casco tipo spar con calado variable, se configura un modelo de simulación no lineal simplificado con cuatro grados de libertad y luego se linealiza incluyendo la aerodinámica con el controlador de paso de pala en el circuito cerrado. El sistema lineal permite procedimientos convencionales para el diseño de controladores SISO dando un rango teóricamente adecuado de ganancias de controlador. Posteriormente, se utiliza el modelo no lineal para encontrar las ganancias óptimas del controlador para cada plataforma. Final-

mente, un modelo acoplado no lineal con nueve grados de libertad da la solución óptima bajo cargas realistas de viento y olas [10]. El diseño de estrategias de control para turbinas eólicas flotantes marinas (FOWTs) es aún más difícil que para las terrestres y las marinas fijas al fondo y actualmente falta una estrategia de control reconocida para FOWTs. Para diseñar estrategias de control efectivas, la dinámica adicional de estos sistemas debe tenerse en cuenta en los modelos utilizados para resolver esta tarea. Este artículo presenta la derivación analítica de un nuevo modelo concebido para propósitos de diseño de control. En detalle, el modelo se basa en una descripción lineal de los fenómenos altamente no lineales que son relevantes para una FOWT. El supuesto cuasi-estacionario se utiliza para dar una descripción de las cargas aerodinámicas y cómo estas son influenciadas por las entradas de control principales. Las fuerzas de radiación y difracción hidrodinámicas se introducen por medio de modelos paramétricos lineales invariantes en el tiempo. Los resultados de la simulación muestran que el modelo lineal propuesto es capaz de predecir la respuesta estructural del sistema de turbina y la plataforma flotante de manera efectiva en el caso de entradas de control, perturbaciones del viento y las olas. En comparación con el modelo no lineal de alta fidelidad, el modelo propuesto muestra resultados similares, sin embargo, sin mucha complejidad, lo que es prometedor en el diseño de estrategias de control de FOWT.

## **OBJETIVOS**

### *GENERAL:*

Mejorar la estabilidad de las plataformas marinas eólicas, es fundamental establecer objetivos que guíen el diseño, construcción y mantenimiento de estas estructuras ya que se centran en optimizar la seguridad, eficiencia y sostenibilidad de las plataformas porque se busca asegurar su estabilidad y operatividad continua en condiciones ambientales adversas.

### *ESPECIFICO:*

Es importante identificar y analizar los factores que pueden afectar la estabilidad de las plataformas eólicas en el mar, como el oleaje, las corrientes, los vientos fuertes y las condiciones climáticas extremas porque para resolver este problema, es necesario crear nuevas técnicas para estabilizar la estructura, como sistemas de anclaje más fuertes y tecnologías de flotación y amortiguación.

### **ALCANCES:**

El objetivo principal de los métodos de estabilización es asegurar la operatividad continua de las plataformas eólicas marinas en condiciones adversas, tales como vientos fuertes, oleaje alto y corrientes marinas intensas. Este objetivo se desglosa en varios alcances específicos:



- Optimización de la Seguridad y Estabilidad de las Plataformas
- Reducción de Costos Operativos y de Mantenimiento
- Protección del Entorno Marino

#### **METAS:**

Desarrollar y Evaluar Métodos de Anclaje y Flotación Innovadores.

- Otra meta fundamental es la incorporación de sistemas de control activo que monitoreen en tiempo real el estado de las plataformas
- Optimización del Diseño Estructural Mediante Simulaciones y Modelos Dinámicos.
  - Desarrollar Materiales de Alta Resistencia y Sostenibles.
  - Establecer Protocolos de Mantenimiento Preventivo y Correctivo.
  - Evaluar el Impacto Ambiental de los Métodos de Estabilización.
- Integrar Tecnología de Predicción Climática para la Gestión de la Estabilidad.

#### **MATERIALES Y METODOS**

[11]. En este artículo se desarrolla un modelo de simulación de control orientado de un aerogenerador marino flotante (FOWT) con generador inductor doblemente alimentado (DFIG). El objetivo principal de este modelo es permitir analizar la influencia del control del aerogenerador en la estabilidad mecánica de la turbina flotante, estudiando cómo la acción de control afecta a las vibraciones de la torre. Se ha implementado un control de optimización matemática y un ángulo de paso fijo. El modelo ha sido probado en simulación, obteniendo resultados cercanos a la generación de potencia nominal y valores de oscilación aceptables para las condiciones de operación. A pesar de la dinámica no lineal del sistema, el modelo permite la simulación de sistemas de generación de potencia de diferente capacidad, en concreto aerogeneradores marinos flotantes, y el estudio de las vibraciones de la estructura flotante [12]. Los aerogeneradores suelen presentar varios bucles de control de retroalimentación para mejorar o contrarrestar algún comportamiento o rendimiento específico del sistema. Es común encontrar estos múltiples bucles de control de retroalimentación en aerogeneradores marinos flotantes donde el rendimiento del sistema está altamente influenciado por la dinámica de la plataforma. Este es el caso de los bucles de control de retroalimentación del estabilizador de plataforma aerodinámica y del rechazo de olas que son complementarios al bucle de control PI de velocidad

del generador convencional cuando está trabajando en una región de velocidad del viento superior a la nominal. Los múltiples bucles de control de retroalimentación a veces pueden ser tediosos para mejorar manualmente el ajuste inicial. Por lo tanto, este artículo presenta una novedosa metodología de optimización basada en el método de Monte Carlo para mejorar automáticamente los múltiples bucles de control de retroalimentación ajustados manualmente. Las cargas equivalentes de daño se cuantifican para minimizar la función de costo y actualizar automáticamente los parámetros de control. Los resultados preliminares presentados aquí muestran el potencial de esta novedosa metodología de optimización para mejorar las cargas de fatiga mecánica de los componentes deseados mientras se mantiene el rendimiento general del sistema de turbina eólica. Esta metodología proporciona un buen equilibrio entre la complejidad computacional y la efectividad del resultado [13]. En la actualidad, la energía eólica marina flotante está experimentando un rápido desarrollo hacia una escala comercial. Sin embargo, la investigación para diseñar nuevas estrategias de control requiere modelos numéricos de bajo costo computacional que tengan en cuenta la dinámica más relevante. En este artículo, se presenta y valida un modelo lineal reducido en el dominio del tiempo. El modelo representa la dinámica principal de la turbina eólica marina flotante con cuatro grados de libertad planares: oleaje, elevación, cabeceo, deflexión de proa a popa de la primera torre y velocidad del rotor para tener en cuenta la dinámica del rotor. El modelo se basa en teorías modales y multicuerpo para desarrollar la ecuación de movimiento. Las cargas aerodinámicas se calculan utilizando las curvas de rendimiento de potencia de la turbina eólica obtenidas en un paso de procesamiento. Las cargas hidrodinámicas se precálculan utilizando un solucionador de código de panel y las fuerzas de amarre se obtienen utilizando una tabla de consulta para diferentes desplazamientos del sistema. Sin ningún ajuste, el modelo predice con precisión los movimientos del sistema para condiciones estocásticas acopladas de viento y olas cuando se compara con OpenFAST, con errores inferiores al 10por ciento para todos los casos de carga considerados. Los errores más grandes ocurren debido a los efectos transitorios durante el tiempo de ejecución de la simulación. El modelo está pensado para ser utilizado en las primeras etapas de diseño como una herramienta de simulación dinámica en los dominios de tiempo y frecuencia para validar diseños preliminares. Además, también podría utilizarse como modelo de diseño de control debido a su simplicidad y bajo orden de modelado [14]. En este trabajo se analiza la dinámica acoplada de la plataforma flotante y el rotor del aerogenerador. En particular, se deriva explícitamente la amortiguación a partir de las ecuaciones acopladas del rotor y la plataforma flotante. El análisis de la amortiguación conduce al estudio de los fenómenos de inestabilidad, obteniendo así las condiciones explícitas que conducen a la fase cero no mínima (NMPZ). Se analizan dos NMPZ, una relacionada con la dinámica del rotor y la otra con la dinámica del paso de la plataforma. Esta última introduce una novedad, y en este trabajo se proporciona una condición explícita para su verificación. En la segunda parte del trabajo, a partir del análisis de la amortiguación de la plataforma flotante, se propone una nueva estrategia para el control de aerogeneradores marinos flotan-

tes (FOWT). Esta estrategia permite imponer al controlador un nivel explícito de amortiguación en el movimiento de paso de la plataforma que se adapta con la velocidad del viento y las condiciones de operación sin cambiar el período de paso de la plataforma. Finalmente, se compara la nueva estrategia con una sin compensación y otra con compensación no adaptativa mediante simulaciones numéricas aero-hidro-servo-elásticas de un FOWT de referencia. Se comparan la potencia generada, los movimientos, el paso de las palas y la fatiga de la base de la torre, demostrando que la nueva estrategia de control puede reducir la fatiga en la estructura sin afectar la producción de potencia [15]. El algoritmo Harmony Search ha despertado mucho interés en los últimos años debido a su simplicidad y eficiencia. Esto llevó a muchos científicos a desarrollar diversas variantes para muchas aplicaciones. En este artículo, se implementaron y probaron cuatro variantes del algoritmo Harmony Search para optimizar el diseño de control del controlador proporcional-integral-derivado (PID) en un esquema de control de flujo de aire propuesto. La estrategia de control de flujo de aire se ha propuesto para abordar el fenómeno de estancamiento no deseado de la turbina Wells en una columna de agua oscilante (OWC). Para demostrar la eficacia del algoritmo Self-Adaptive Global Harmony Search (SGHS) sobre los métodos de ajuste tradicionales, se ha llevado a cabo un estudio comparativo entre el PID optimizado, el PID ajustado tradicionalmente y el sistema OWC no controlado. Los resultados de la optimización mostraron que el algoritmo Self-Adaptive Global Harmony Search (SGHS) se adaptó mejor al problema del control del flujo de aire dentro del convertidor de energía de las olas. Además, el rendimiento del OWC es superior cuando se utiliza el PID ajustado por SGHS [16]. El objetivo del presente estudio es determinar, utilizando herramientas básicas de cálculo, las solicitaciones que generan los diferentes fenómenos climáticos de la dinámica marina –viento, corrientes y oleaje– sobre una plataforma flotante tipo SPAR para eólica offshore. A partir de ellas, pueden hallarse las respuestas de la misma, considerando los diferentes elementos que juegan un papel fundamental en el proceso, como son el sistema de amarre y las amortiguaciones hidrodinámicas. Como introducción y punto de partida, se hace un recorrido por la situación actual de los muchos elementos relacionados con la explotación de energía eólica offshore, como son las características y tendencias de la energía eólica, las características especiales del ambiente marino, las diferentes plataformas que existen y se están desarrollando –fijas y flotantes–, los tipos de sistemas de amarre y una pequeña reseña de las clases de anclajes que se suelen utilizar. Los apartados de cálculo se han realizado principalmente siguiendo las pautas e indicaciones de manuales como el de Subrata Chakrabarty (Handbook of Offshore Engineering, 2005) y estándares para diseño de estructuras offshore como los DNV Standards. Se ha utilizado la expresión de Morison para determinar las cargas horizontales –estacionarias y no estacionarias– sobre el cuerpo de la plataforma debidas a viento, corrientes y oleaje, cuyas magnitudes se han obtenido de regímenes extremos facilitados por el Instituto de Hidráulica Ambiental IH Cantabria. Se ha supuesto una situación donde todos estos fenómenos atacan a la estructura alineados en la dirección de una de las líneas de fondeo. Para el cálculo de la respuesta de la SPAR, se ha asimilado la boya a un siste-

ma físico de oscilador con muelle y amortiguación no lineal bajo oleaje regular, haciendo las simplificaciones y ajustes oportunos. Finalmente, se ha resuelto la ecuación de movimiento del oscilador en el dominio de la frecuencia, y se han podido describir los desplazamientos que realiza la plataforma como una función del tiempo una vez se ha estabilizado la oscilación [17]. La generación de energía eléctrica a partir del aire en movimiento es considerada actualmente la tecnología más prometedora en cuanto a su contribución a la matriz energética de países con grandes recursos eólicos. Este hecho se ve reflejado por el continuo incremento en el tamaño y la capacidad de los aerogeneradores: desde rotores de 15 m de diámetro y una potencia nominal de 0.05 MW hasta las grandes turbinas eólicas de eje horizontal (Large Horizontal-Axis Wind Turbines, LHAWT) con rotores superiores a los 120 m de diámetro y potencia aproximada de 8 MW. Un diseño eficiente de estas grandes máquinas rotantes debe involucrar, indefectiblemente, un enfoque holístico que incluya los múltiples campos físicos intervinientes, tales como: i) aerodinámica; ii) hidrodinámica (turbinas emplazadas en el océano); iii) dinámica estructural; iv) dinámica eléctrica; y v) control. En este trabajo se presentan los aspectos teóricos relacionados al modelado y diseño de una plataforma numérica de cosimulación destinada al análisis integral de LHAWTs. Específicamente, en esta primera etapa, el sistema dinámico bajo estudio es particionado en tres subsistemas: i) un modelo multicuerpo rígido para la estructura de la turbina; ii) un modelo aerodinámico basado en el método de red de vórtices no lineal e inestacionario (Unsteady Vortex-Lattice Method, UVLM) para estimar las cargas sobre las palas de la turbina; y iii) un modelo de máquina síncrona de imanes permanentes para el control del generador y el monitoreo de condición. Los tres subsistemas intercambian información bidireccionalmente mediante un esquema de acoplamiento fuerte. Finalmente, se presenta la implementación computacional del marco de co-simulación propuesto y el esquema numérico para integrar todas las ecuaciones gobernantes en el dominio del tiempo [18]. La duración de estas estructuras es un factor clave para este tipo de parques y la corrosión es el principal problema. Actualmente se utilizan sistemas con ánodos de sacrificio para combatir esta problemática. En el presente trabajo se analizan los sistemas de protección catódica (CP) que se utilizan actualmente y se proponen soluciones para su optimización. Se trata aquí de buscar una herramienta sólida y flexible, que se pueda aplicar a cualquier estructura offshore sea cual sea su morfología. Se podría así modelar fácilmente cualquier sistema de CP para su posterior optimización. En primer lugar, se modela y valida un sistema de protección catódica por ánodos galvánicos instalado en una estructura existente y posteriormente se propone un sistema de protección catódica por corriente impresa (ICCP) para sustituir al sistema pasivo [19]. En este tutorial se aborda el tema del modelado y control de las turbinas eólicas marinas flotantes. En primer lugar se describen estos sistemas de extracción de energía eólica que están situados en alta mar, en aguas profundas, y se comentan algunas aproximaciones a su modelado. El control de potencia de estas turbinas es presentado con detalle, explicando los distintos tipos de control que buscan maximizar la obtención de energía. Se resalta el problema de la inducción de dinámicas inestables en la plataforma flotante

debido al control del rotor del aerogenerador, una dificultad que no aparece en otros tipos de turbinas. La reducción de las vibraciones mediante estrategias de control estructural se ilustra con un ejemplo, usando un dispositivo pasivo que es complementado con un mecanismo denominado inerter, mostrando con resultados de simulación cómo se consiguen eliminar las oscilaciones de la turbina flotante. Este ejemplo está basado en resultados preliminares obtenidos en la investigación que llevan a cabo los autores de este tutorial [20].

## **PRODUCTOS COMPROMETIDOS**

1. Simulación del Viento y el Clima Marino.
2. Análisis Estructural de Plataformas Offshore.
3. Simulación de la Interacción Plataforma-Aerogenerador.
4. Simulación de Cargas y Producción de Energía.
5. Optimización de Diseño de Plataformas y Aerogeneradores.
6. Simulación de Dinámica de Fluidos (CFD).
7. Plataformas de Análisis de Datos y Monitoreo.
8. Software Común en la Simulación Numérica de Plataformas Eólicas Marinas.

## **CONCLUSIÓN**

La investigación tiene como objetivo determinar la efectividad de estas tecnologías para mantener la estabilidad de las plataformas y evitar fallas mecánicas que puedan comprometer su funcionamiento a largo plazo. Otro aspecto clave de la investigación es explorar el uso de algoritmos de control avanzado, como el control adaptativo basado en redes neuronales, para ajustar de manera dinámica las plataformas a las cambiantes condiciones del entorno marino. De esta manera, se busca obtener una comprensión profunda de cómo la combinación de control estructural y algoritmos de optimización puede mejorar el rendimiento de las plataformas, incluso en situaciones de alta carga por viento y oleaje. Además, la investigación se enfoca en identificar las mejores estrategias de diseño y mantenimiento que no solo aseguren la estabilidad de las plataformas, sino que también contribuyan a la sostenibilidad económica y operativa de las mismas. El objetivo es reducir los costos operativos, prolongar la vida útil de las infraestructuras y mejorar la viabilidad de las plataformas eólicas marinas como una fuente de energía renovable competitiva y confiable en el mercado. En conclusión, la investigación pretende ofrecer soluciones prácticas y efectivas para enfrentar los desafíos técnicos de las plataformas eólicas marinas, con el

fin de hacerlas más confiables, eficientes y sostenibles. Al lograr este objetivo, se contribuye de manera significativa a la transición energética global, aprovechando al máximo el potencial de las energías renovables en condiciones marinas desafiantes.

## BIBLIOGRAFIA

1. TOMÁS-RODRÍGUEZ, M.; SANTOS, M. Modelado y control de turbinas eólicas marinas flotantes. *Revista iberoamericana de automática e informática industrial*, 2019, vol. 16, no 4, p. 381-390.

2. ABOUTALEBI, Payam, et al. A control technique for hybrid floating offshore wind turbines using oscillating water columns for generated power fluctuation reduction. *Journal of Computational Design and Engineering*, 2023, vol. 10, no 1, p. 250-265.

3. M'ZOUGHFI, Fares, et al. Mitigación de vibraciones con control del flujo de aire basado en GA-ANFIS de una turbina eólica marina flotante híbrida con columnas de agua oscilantes. *Jornadas de Automática*, 2024, no 45.

4. RANGEL, Omar Salvador Areu; CARRILLO, Liliana Rodríguez; CASARÍN, Rodolfo Silva. FLOTABILIDAD DE UNA TURBINA EÓLICA MARINA CON PLATAFORMA TIPO DEEPCWIND.

5. CAMACHO, Diego Fernando Bernal; HERNÁNDEZ-FONTES, Jassiel; MENDOZA, Edgar. ESTABILIDAD DE PLATAFORMA SEMISUMERGIBLE COSTA FUERA PARA TURBINAS EÓLICAS.

6. ABOUTALEBI, Payam, et al. Nueva estrategia de control para la reducción de oscilaciones en turbinas eólicas flotantes. En *XLII Jornadas de Automática*. Universidade da Coruña, Servizo de Publicacións, 2021. p. 37-44.

7. MORALES, Jose Rodrigo Rojas; MARTÍNEZ, Karla Chaves. Análisis Análisis prospectivo de la cadena de suministro para el desarrollo de energía eólica marina en Costa Rica: Análisis prospectivo de la cadena de suministro para el desarrollo de energía eólica marina en Costa Rica. *Repertorio Científico*, 2021, vol. 24, no 1, p. 57-78.

8. López, A., Somolinos, J. A., and Núñez, L. R. (2014). Modelado Energético de Convertidores Primarios para el Aprovechamiento de las Energías Renovables Marinas. *Revista Iberoamericana De Automática E Informática Industrial*, 11(2), 224-235. <https://doi.org/10.1016/j.riai.2014.02.005>.

9. BETTI, Giulio, et al. Development of a control-oriented model of floating wind turbines. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2013, vol.

22, no 1, p. 69-82.

10. SANDNER, Frank, et al. Integrated optimization of floating wind turbine systems. En International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers, 2014. p. V09BT09A030.

11. FONTANELLA, A., et al. A control-oriented wave-excited linear model for offshore floating wind turbines. En Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2020. p. 022038.

12. ÁLVAREZ, Andrés Felipe Ospina; SANTOS, Matilde. Mechanical stability analysis of a DFIG floating offshore wind turbine using an oriented-control model. IEEE Latin America Transactions, 2023, vol. 21, no 1, p. 91-97.

13. OLONDRIZ, Joannes, et al. A feedback control loop optimisation methodology for floating offshore wind turbines. Energies, 2019, vol. 12, no 18, p. 3490.

14. LÓPEZ-QUEIJA, Javier, et al. A simplified modeling approach of floating offshore wind turbines for dynamic simulations. Energies, 2022, vol. 15, no 6, p. 2228.

15. CAPALDO, Matteo; MELLA, Paul. Damping analysis of Floating Offshore Wind Turbine (FOWT): a new control strategy reducing the platform vibrations. Wind Energy Science Discussions, 2022, vol. 2022, p. 1-29.

16. M'ZOUGHJI, Fares, et al. Self-adaptive global-best harmony search algorithm-based airflow control of a wells-turbine-based oscillating-water column. Applied Sciences, 2020, vol. 10, no 13, p. 4628.

17. RODRÍGUEZ MARJUÁN, Alberto, et al. Estudio de las solicitaciones meteoceánicas extremas y las respuestas asociadas a una plataforma eólica flotante tipo Spa. 2015.

18. ROCCIA, Bruno A., et al. Desarrollo de una Plataforma de Co-Simulación para el Estudio Integral de Turbinas Eólicas: Aspectos Teóricos y de Modelado. Mecánica Computacional, 2016, vol. 34, no 44, p. 3101-3133.

19. CHAS GESTAL, Brais. Análisis y simulación del sistema de protección catódica de una estructura flotante offshore tipo SPAR. 2019.

20. TOMÁS-RODRÍGUEZ, M.; SANTOS, M. Modelado y control de turbinas eólicas marinas flotantes. Revista iberoamericana de automática e informática industrial, 2019, vol. 16, no 4, p. 381-390.

# RECICLAJE DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO PARA PAVIMENTO EN CALLES DE TERRACERÍA

5 de diciembre de 2024

## **Instituto Tecnológico Superior de San Andrés Tuxtla**

Jose Alejandro Leon Lozano, Samir Isidoro Benitez, Jesús Manuel Victorio Palayot, Enrique Hernández Olea, Jafet Hariberto Torres, Alejandro Martínez Aguilar Martínez.

### **RESUMEN**

El reciclaje de neumáticos fuera de uso (NFU) para la construcción y mejora de pavimentos en calles de terracería representa una alternativa sostenible y económica frente a los problemas ambientales asociados a estos residuos. Los NFU son un material complejo de gestionar debido a su resistencia a la descomposición, su gran volumen y los riesgos que generan al acumularse, como la proliferación de vectores de enfermedades y la contaminación causada por su quema. Por ello, su reutilización en proyectos de infraestructura vial ofrece una solución innovadora y práctica. El proceso de reciclaje de neumáticos comienza con su recolección y procesamiento. Estos son triturados para obtener fragmentos de caucho reciclado que pueden emplearse como aditivos en mezclas para estabilización de suelos o en la fabricación de pavimentos híbridos. En el caso de calles de terracería, el caucho triturado se combina con otros materiales como agregados pétreos y estabilizadores químicos. Esta mezcla mejora significativamente las propiedades mecánicas del suelo, incrementando su resistencia al desgaste y reduciendo el polvo generado por el tránsito vehicular. Las principales ventajas de esta técnica incluyen la reducción de costos de mantenimiento en caminos rurales, la disminución de la generación de polvo, el aumento de la resistencia a las cargas dinámicas y el mejor comportamiento frente a cambios climáticos extremos. Además, fomenta la economía circular al reutilizar un residuo difícil de gestionar, disminuyendo así el impacto ambiental. La flexibilidad del caucho también contribuye a que los pavimentos resistan mejor las deformaciones y fisuras.



## ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

Se ha estudiado por diversos autores entre ellos Chávez (2019) que su estudio Se centra en tres métodos de incorporación de caucho: húmedo, seco y semihúmedo. Cada método afecta de manera diferente las propiedades mecánicas de las mezclas, lo que puede influir en su durabilidad y resistencia. Destaca la importancia de seleccionar el método de incorporación adecuado, ya que influye directamente en las propiedades mecánicas y la durabilidad de las mezclas asfálticas. La elección del proceso debe basarse en consideraciones técnicas y económicas, adaptándose a las necesidades específicas de cada proyecto CHÁVEZ) en la fecha de (30 de abril de 2019). Por otro lado, Santos (2019) menciona. Una comparativa atribuible de mezclas asfálticas italianas tradicionales y ciertas mezclas innovadoras que contienen diferentes porcentajes de materiales reciclados (es decir, RAP y CR), empleados en la base de pavimentos flexibles. Destacan diferentes aspectos del rendimiento ambiental asociado con cada alternativa considerada para la construcción de la capa base SANTOS) en la fecha de (10 de junio de 2019). Biligiri (2020) explica que. Durante la construcción y el mantenimiento del pavimento ayudarían a reducir la huella de carbono, minimizar el consumo de energía, reducir el envejecimiento y experimentar una menor exposición a riesgos de salud ocupacional. El estudio mostró que la reducción en el consumo total de energía fue similar tanto para la mezcla en frío como para el HMA, pero fue significativamente mayor para el concreto de cemento Biligiri) en la fecha de (7 de enero de 2020). Mohajerani (2020) es el beneficio al. Ayuda a reducir la cantidad de desechos, sino que también mejora las propiedades del material, como su resistencia y durabilidad. Por lo tanto, el reciclaje de neumáticos en materiales de construcción ofrece oportunidades valiosas para la sostenibilidad, pero es crucial implementar prácticas adecuadas para mitigar los riesgos ambientales asociados y asegurar que este proceso contribuya a un desarrollo más responsable y ecológico Mohajerani) en la fecha de (7 de enero de 2020). Un descubrimiento shaoquan (2020) fue que. Una mezcla asfáltica que incorpora caucho de neumáticos de desecho (CDR) y un ligante asfáltico modificado por APAO se centra en evaluarla) y las propiedades de este material reciclado en aplicaciones viales. La utilización de caucho de neumáticos reciclados y ligantes modificados por APAO en mezclas asfálticas no solo mejora el rendimiento del asfalto, sino que también representa una alternativa sostenible que contribuye a la gestión de residuos y a la innovación en la infraestructura vial SHAOQUAN) en la fecha de (24 de febrero de 2020. Saberian (2020) nos menciona. Los efectos del tamaño y el contenido de caucho en el comportamiento del RCA en términos de resistencia a la compresión sin confinamiento, relación de carga de California. Basado en los resultados experimentales, se ha propuesto un modelo no lineal práctico y racional para la estimación del coeficiente de resistencia al cizallamiento (directamente) y los parámetros de resistencia al cizallamiento (indirectamente) del agregado reciclado de concreto reforzado con caucho reciclado en términos de tensión normal, tamaño SABERIAN) nos menciona en la fecha de (20 de diciembre de 2020. vandewalle (2020) da a conocer. Soluciones de pavimentos reciclados proporcionan una importante contribución a la industria

de la pavimentación para lograr un desarrollo económico y ambiental sostenible. Esto disminuye el agotamiento de recursos de calidad en vertederos (por ejemplo, betún y agregados), que son finitos y costosos. El paso de caracterización demostró el impacto ambiental de los cinco ciclos de vida del LCS en 15 categorías de impacto. En todas las categorías, sin excepción, se puede observar una disminución general de los impactos en proporción a la tasa de RAP utilizada VANDEWALLE) en la fecha de (14 de agosto de 2020). milad (2020) explica. La capacidad de mejorar el rendimiento de los pavimentos flexibles y contribuir a garantizar un medio ambiente más sostenible. Se ha demostrado que el uso de neumáticos al final de su vida útil MILAD) en la fecha de (29 de agosto de 2020). En opiniones de Zhang (2020) en el que. El asfalto modificado se ha aplicado ampliamente en la construcción debido a su excelente rendimiento y menor costo en comparación con el asfalto modificado con estireno-butadieno-estireno (SBS) y así como su aplicabilidad para servir como materiales de recubrimiento, materiales de capas que absorben estrés y materiales de superficie de gradación abierta. ZHANG) en la fecha de (28 de septiembre de 2020) . Liu (2021.) Los neumáticos de vehículos es un enfoque integral que analiza el impacto ambiental a lo largo de todas las etapas de su vida, desde la extracción de materias primas hasta la disposición final. LIU) en la fecha de (12 de abril de 2021.)

## **OBJETIVOS:**

### **GENERAL**

Diseñar un tipo de mezcla Asfáltica con un porcentaje de Relamed Asphalt Pavement (RAP) que cumpla con todos los parámetros indicados en la normativa INVIAS.

### **ESPECIFICOS**

1. Realizar la caracterización de los materiales obtenidos, tanto el material reciclado (RAP) como el material granular de carpeta de rodadura.
2. Formular diseños de mezcla densa frío con diferentes proporciones de asfalto residual.
3. Determinar por medio de ensayos de laboratorio, la estabilidad, la densidad, el porcentaje de vacíos y el flujo de cada mezcla planteada, siguiendo la normatividad INVIAS.
4. Analizar si los resultados obtenidos cumplen con lo establecido en la norma INVIAS.

## **ALCANSES**

La demanda de soluciones más sostenibles ha llevado a un número cada vez mayor de partes interesadas a comprometerse con la aplicación de los principios de sostenibilidad en la gestión de pavimentos. Diferentes partes interesadas han estado buscando herramientas y metodologías para evaluar los impactos ambientales de las soluciones, para lo cual el análisis del ciclo de vida (ACV) ha demostrado ser una metodología adecuada .

## **METAS**

Ayuda a reducir la cantidad de desechos, sino que también mejora las propiedades del material, como su resistencia y durabilidad. Por lo tanto, el reciclaje de neumáticos en materiales de construcción ofrece oportunidades valiosas para la sostenibilidad, pero es crucial implementar prácticas adecuadas para mitigar los riesgos ambientales asociados y asegurar que este proceso contribuya a un desarrollo más responsable y ecológico.

## **PRODUCTOS COMPROMETIDOS**

El reciclaje de neumáticos fuera de uso (NFU) representa una solución innovadora y sostenible para abordar el problema del manejo de residuos sólidos, especialmente en el contexto del desarrollo de infraestructura vial. Esta simulación tiene como objetivo analizar la viabilidad técnica y económica de utilizar NFU triturados como material base en pavimentos para calles de terracería, evaluando sus propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad en comparación con materiales convencionales.

## **RAZÓN PARA REALIZAR LA SIMULACIÓN**

Sostenibilidad Ambiental: Los neumáticos fuera de uso representan una amenaza ambiental significativa debido a su lenta descomposición y potencial para generar contaminación. Reutilizarlos en pavimentos contribuye a reducir este problema.

Optimización de Recursos: La integración de NFU en pavimentos puede disminuir el consumo de materiales vírgenes y fomentar la economía circular.

Condiciones Reales de Uso: Las calles de terracería, especialmente en zonas rurales, están sujetas a condiciones extremas como erosión, tráfico pesado y variaciones climáticas. La simulación permite replicar estas condiciones para predecir el comportamiento del material.

Innovación Técnica: Evaluar cómo las propiedades de los NFU mejoran características como flexibilidad, resistencia al desgaste y reducción del polvo en comparación con los pavimentos tradicionales.

## **PRUEBAS REALIZADAS**

### **PRUEBAS DE RESISTENCIA:**

Compresión: Determinar la capacidad del material para soportar cargas aplicadas.

Resistencia al desgaste: Simular la acción del tráfico continuo sobre el pavimento para medir su durabilidad.

### **PRUEBAS FÍSICAS:**

Permeabilidad: Evaluar si el material permite el drenaje del agua, reduciendo la acumulación en épocas de lluvia.

Adherencia: Analizar la cohesión entre partículas para evitar que el material se desplace.

### **PRUEBAS DE IMPACTO CLIMÁTICO:**

Expansión térmica: Analizar el comportamiento del material ante cambios de temperatura.

Resistencia a la intemperie: Medir la estabilidad del material frente a la radiación solar y la humedad.

## **PROCEDIMIENTO**

La simulación del reciclaje de neumáticos fuera de uso (NFU) para pavimentos en calles de terracería se realiza porque permite evaluar de manera eficiente y económica la viabilidad técnica, económica y ambiental de este tipo de solución antes de implementarla en el mundo real

### Reducción de costos y tiempo

Las simulaciones permiten probar diferentes configuraciones y proporciones de materiales sin necesidad de construir múltiples prototipos físicos. Esto ahorra recursos, ya que no es necesario realizar ensayos extensivos en laboratorio o en campo hasta que se haya identificado una solución viable.

### Evaluación de desempeño

Analizar cómo el material reciclado (NFU) se comportará bajo diferentes condiciones de carga y clima.

*Tráfico vehicular:* Simular las tensiones generadas por vehículos.

*Clima:* Determinar la resistencia a temperaturas extremas, humedad y lluvias.

*Durabilidad:* Predecir el desgaste y la vida útil del pavimento.

Identificar las mejores proporciones de NFU para maximizar el desempeño mecánico del pavimento.

#### Sostenibilidad y aprovechamiento de recursos

*Impacto ambiental:* El reciclaje de NFU reduce significativamente el problema ambiental asociado con los neumáticos desechados, que suelen acumularse en basureros y generan contaminación. Las simulaciones permiten cuantificar el impacto positivo de usar NFU en términos de ahorro de recursos naturales (como grava y arena) y reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> en el proceso de construcción.

#### Seguridad y riesgos

Simular evita riesgos asociados con aplicar directamente una mezcla desconocida en calles de terracería, lo que podría resultar en fallas estructurales o problemas de calidad. Garantiza que el producto final cumpla con estándares de seguridad antes de realizar pruebas en el mundo real.

#### Optimización del diseño

Permite experimentar con múltiples variables, como: Diferentes proporciones de NFU en la mezcla, tipos de suelos o bases en calles de terracería y métodos de compactación y procesamiento.

#### Evaluación económica

La simulación proporciona datos que permiten calcular costos aproximados de producción y mantenimiento. Facilita la comparación con métodos tradicionales para demostrar la viabilidad económica del proyecto.

#### Escalabilidad

Ayuda a prever cómo se comportará el material en diferentes escenarios de uso: Desde tramos pequeños hasta calles más largas o de mayor tráfico y permite evaluar cómo adaptar el proceso a diferentes regiones o condiciones geográficas.

## PROCEDIMIENTO DE LA SIMULACIÓN

El código es un script en Unity, escrito en C#, que permite mover un automóvil utilizando la entrada del usuario.

**Clase PlayerController** Esta clase hereda de `MonoBehaviour`, lo que significa que está diseñada para ser utilizada como un componente en un `GameObject` de Unity.

Las Variables públicas son las siguientes: `public float speed = 5.0f;` Representa la velocidad de avance del automóvil. Se puede ajustar desde el inspector. `public float turnSpeed = 0.0;` Define la velocidad de giro del automóvil.

También puede ser modificada desde el inspector. `public float horizontalInput;` Almacena el valor de entrada horizontal (izquierda/derecha) del usuario. Se obtiene del eje configurado en el sistema de entrada.

### Métodos

`void Start()` Es el método que Unity llama automáticamente al iniciar el juego. `void Update()` Es llamado una vez por cada cuadro del juego (frame). Contiene la lógica para manejar la entrada y mover el automóvil.

**1. Captura de la entrada horizontal** `horizontalInput = Input.GetAxis("Horizontal");` Obtiene la entrada del usuario en el eje horizontal (teclas izquierda/derecha o joystick). Unity tiene configurado este eje por defecto en `Project Settings > Input Manager`.

**2. Movimiento hacia adelante** `transform.Translate(Vector3.forward * Time.deltaTime * speed);` Mueve el `GameObject` hacia adelante a lo largo del eje Z mundial. `Vector3.forward` indica la dirección hacia adelante. `Time.deltaTime` asegura que el movimiento sea uniforme independientemente de la velocidad de cuadros (frames per second, FPS). `speed` multiplica la velocidad del movimiento.

**3. Giro del vehículo** `transform.Translate(Vector3.right * Time.deltaTime * turnSpeed * horizontalInput);` Mueve el automóvil hacia los lados (eje X) en función de la entrada horizontal del usuario. `Vector3.right` indica la dirección hacia la derecha. `horizontalInput` determina cuánto se mueve según la entrada del jugador (positivo para derecha, negativo para izquierda).

Este script mueve el automóvil hacia adelante continuamente, mientras que el giro se ajusta según la entrada del usuario. Debes asignar este script al `GameObject` del automóvil y ajustar los valores de `speed` y `turnSpeed` desde el inspector para obtener un movimiento más realista.

## CONCLUSIÓN

El reciclaje de neumáticos fuera de uso (NFU) para la construcción de pavimentos en calles de terracería constituye una alternativa innovadora y sostenible que aborda múltiples desafíos ambientales, sociales y económicos. Este enfoque representa un modelo práctico de economía circular, donde los residuos, en lugar de convertirse en un problema, se transforman en recursos útiles para la infraestructura vial. Uno de los principales beneficios de esta práctica es su impacto positivo en la reducción de desechos sólidos. Los neumáticos usados, que representan un problema crítico debido a su lenta descomposición y potencial para generar incendios o criaderos de mosquitos, encuentran una nueva utilidad al ser procesados para la elaboración de materiales estabilizadores o mezclas asfálticas. Al reciclarlos, se disminuye su acumulación en vertederos y el impacto ambiental que estos generan. En el ámbito técnico, el uso de caucho reciclado en pavimentos de terracería ha demostrado mejorar significativamente las propiedades mecánicas de las superficies. Entre sus ventajas destacan el aumento de la elasticidad, la reducción del agrietamiento y una mayor resistencia al desgaste provocado por el tránsito constante o condiciones climáticas extremas. Además, estos materiales tienen propiedades de drenaje que ayudan a mitigar los problemas de inundaciones en zonas vulnerables, mejorando la seguridad vial. Desde una perspectiva económica, esta solución puede ser particularmente beneficiosa para comunidades rurales o áreas con limitados recursos financieros. Los costos de implementación pueden ser más bajos en comparación con los métodos tradicionales de pavimentación, debido al aprovechamiento de materiales reciclados. Asimismo, el reciclaje de neumáticos fomenta la creación de empleos en sectores como el reciclaje, la ingeniería vial y la construcción, impulsando economías locales y promoviendo un desarrollo más inclusivo. Sin embargo, la adopción de esta técnica no está exenta de desafíos. Es crucial que existan políticas públicas que regulen y promuevan su implementación, asegurando estándares de calidad y sostenibilidad en cada etapa del proceso. La investigación continua es fundamental para optimizar las propiedades de los materiales reciclados y adaptarlos a diversas condiciones geográficas y climáticas. Además, se requiere la participación activa de las comunidades y de los sectores público y privado para garantizar que este enfoque se desarrolle y se expanda de manera efectiva. En términos sociales, el uso de neumáticos reciclados en calles de terracería contribuye a mejorar la calidad de vida de las comunidades al proporcionar vías más funcionales y accesibles. Esto no solo facilita el tránsito diario, sino que también mejora la conectividad y el acceso a servicios esenciales como la educación, la salud y el comercio. Al mismo tiempo, la adopción de estas prácticas fortalece la conciencia ambiental, promoviendo un cambio cultural hacia un manejo más responsable de los recursos. En conclusión, el reciclaje de neumáticos fuera de uso para pavimentos en calles de terracería no solo contribuye al desarrollo sostenible y a la preservación del medio ambiente, sino que también mejora la calidad de vida de las comunidades al proporcionar vías más seguras y funcionales. Este enfoque innovador debe ser promovido como una solución clave para los desafíos ambientales y de infraestructura que enfrenta nuestra sociedad.

## BIBLIOGRAFÍA

1. CHAVEZ, Francisco; MARCOBAL, Jose; GALLEGO, Juan. Laboratory evaluation of the mechanical properties of asphalt mixtures with rubber incorporated by the wet, dry, and semi-wet process. *Construction and Building Materials*, 2019, vol. 205, p. 164-174.
2. BRESSI, Sara, et al. A comparative environmental impact analysis of asphalt mixtures containing crumb rubber and reclaimed asphalt pavement using life cycle assessment. *International Journal of Pavement Engineering*, 2021, vol. 22, no 4, p. 524-538.
3. ABDALLA, Ahmed; FAHEEM, Ahmed F.; WALTERS, Evelyn. Life cycle assessment of eco-friendly asphalt pavement involving multi-recycled materials: A comparative study. *Journal of Cleaner Production*, 2022, vol. 362, p. 132471.
4. PIAO, Zhengyin, et al. Life cycle assessment of rubberized semi-dense asphalt pavements; A hybrid comparative approach. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, vol. 176, p. 105950.
5. NANJEGOWDA, Vinay Hosahally; BILIGIRI, Krishna Prapoorna. Recyclability of rubber in asphalt roadway systems: A review of applied research and advancement in technology. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, vol. 155, p. 104655.
6. ALFAYEZ, Saud A.; SULEIMAN, Ahmed R.; NEHDI, Moncef L. Recycling tire rubber in asphalt pavements: State of the art. *Sustainability*, 2020, vol. 12, no 21, p. 9076.
7. FORMELA, Krzysztof. Sustainable development of waste tires recycling technologies—recent advances, challenges and future trends. *Advanced industrial and engineering polymer research*, 2021, vol. 4, no 3, p. 209-222.
8. MOHAJERANI, Abbas, et al. Recycling waste rubber tyres in construction materials and associated environmental considerations: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, vol. 155, p. 104679.
9. MOASAS, Abdulrhman Mohamad, et al. A worldwide development in the accumulation of waste tires and its utilization in concrete as a sustainable construction material: A review. *Case Studies in Construction Materials*, 2022, vol. 17, p. e01677.
10. YAN, Kezhen, et al. Laboratory performance of asphalt mixture with waste tyre rubber and APAO modified asphalt binder. *International Journal of*



Pavement Engineering, 2022, vol. 23, no 1, p. 59-69.

11. SAMBUCCI, Matteo; MARINI, Danilo; VALENTE, Marco. Tire recycled rubber for more eco-sustainable advanced cementitious aggregate. Recycling, 2020, vol. 5, no 2, p. 11.

12. VANDEWALLE, David, et al. Assessment of eco-friendly pavement construction and maintenance using multi-recycled rap mixtures. Recycling, 2020, vol. 5, no 3, p. 17.

13. GHABCHI, Rouzbeh, et al. Technical challenges of utilizing ground tire rubber in asphalt pavements in the united states. Materials, 2021, vol. 14, no 16, p. 4482.

14. ZHANG, Weiguang, et al. Performance characterization of recycled-asphalt pavement with stabilized rubber-modified asphalt using balanced mix design method. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, vol. 32, no 12, p. 04020387.

15. MILAD, Abdalrhman, et al. A review of the feasibility of using crumb rubber derived from end-of-life tire as asphalt binder modifier. Journal of Rubber Research, 2020, vol. 23, p. 203-216.

16. DONG, Yahong, et al. Life cycle assessment of vehicle tires: A systematic review. Cleaner Environmental Systems, 2021, vol. 2, p. 100033.

17. NANJEGOWDA, Vinay Hosahally; BILIGIRI, Krishna Prapoorna. Recyclability of rubber in asphalt roadway systems: A review of applied research and advancement in technology. Resources, Conservation and Recycling, 2020, vol. 155, p. 104655.

18. BRESSI, Sara, et al. A comparative environmental impact analysis of asphalt mixtures containing crumb rubber and reclaimed asphalt pavement using life cycle assessment. International Journal of Pavement Engineering, 2021, vol. 22, no 4, p. 524-538.

19. PICADO-SANTOS, Luis G.; CAPITÃO, Silvino D.; NEVES, Jose MC. Crumb rubber asphalt mixtures: A literature review. Construction and Building Materials, 2020, vol. 247, p. 118577.

20. SABERIAN, Mohammad, et al. An experimental study on the shear behaviour of recycled concrete aggregate incorporating recycled tyre waste. Construction and Building Materials, 2020, vol. 264, p. 120266.

21. ARULRAJAH, Arul, et al. Tire derived aggregates as a supplementary material with recycled demolition concrete for pavement applications. Journal

of Cleaner Production, 2019, vol. 230, p. 129-136.

22. FAKHRI, Mansour; AMOOSOLTANI, Ershad. The effect of reclaimed asphalt pavement and crumb rubber on mechanical properties of roller compacted concrete pavement. Construction and Building Materials, 2017, vol. 137, p. 470-484.