

Athenea

Revista en Ciencias de la Ingeniería

ISSN: 2737-6439
DOI: 10.47460/athenea
Volume 5, Issue 16
July 2024

2
0
2
4

Published by:


AutanaBooks
Engineering & Services

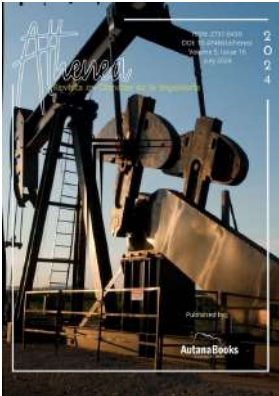
ATHENEA JOURNAL

JOURNAL IN ENGINEERING SCIENCES

Electronic Journal Edited By AutanaBooks.

Continuous Periodicity

Our cover:



On our cover we highlight the importance of energy and the necessary investment in other more sustainable sources, not forgetting the improvement of current conventional energies. This issue of Athenea magazine includes articles on energy research, both green and conventional.

Volume 5 // Issue 16 // July 2024
DOI:10.47460/athenea
ISSN: 2737-6439

Viewing the Journal:
<https://athenea.autanabooks.com/index.php/revista>

TECHNICAL TEAM

Webmaster and Metadata
Ing. Ángel Lezama (Quito, Ecuador).
a2lezama@gmail.com

Graphic design and layout:
Adrián Hauser
(AutanaBooks, Ecuador).
adrian.hauser@gmail.com

Translator: Fausto Bartolotta
Via Francesco Crispi, 309/A
98028 Santa Teresa Di Riva, Provincia Messina
Italia
email: fbartolotta@gmail.com

The articles, opinions and collaborations that are published in this magazine do not necessarily represent the informative or institutional philosophy of AutanaBooks SAS and may be reproduced with the prior authorization of the Publisher. In case of reproduction, please cite the source and send copies of the medium used to AutanaBooks, Sector Mitad del Mundo, Quito, Ecuador.

"by the grace of God"

Publisher: Dr. Franyelit Suárez,
<http://orcid.org/0000-0002-8763-5513>

editorial@autanabooks.com
AutanaBooks, Quito, Ecuador

DIRECTORY OF THE ATHENEA
JOURNAL IN ENGINEERING SCIENCES
ACADEMIC COMMITTEE

Dr. Luis Rosales.
Universidad Nacional Experimental Politécnica
"Antonino José de Sucre", Vice Rectorado Puerto Ordaz
luis.rosals2@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-7787-9178>
Venezuela.

Dr. Farooq Ahmed Jam
Executive Director
<https://orcid.org/0000-0001-7388-5522>
jam@globalilluminators.org
Global Illuminators Kuala Lumpur, Malaysia

Dr. José García-Arroyo.
Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED)
jagarcia@uees.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-9905-1374>
España

Dr. Valentina Millano.
<https://orcid.org/0000-0001-6138-4747>.
millanov@fing.luz.edu.ve , millanov@gmail.com
Directora. Universidad del Zulia.
Centro de Estudios de Corrosión (CEC).
Venezuela.

PhD. Yajaira Lizeth Carrasco Vega
<https://orcid.org/0000-0003-4337-6684>
ycarrasco@undc.edu.pe
Universidad Nacional de Cañete
Lima, Perú.

Dr. Edwin Flórez Gómez
<https://orcid.org/0000-0003-4142-3985>
Universidad de Puerto Rico en Mayagüez
edwin.florez@upr.edu
Mayagüez, Puerto Rico

Dr. Hilda Márquez
<https://orcid.org/0000-0002-7958-420X>
Universidad Metropolitana de Quito,
amarquez@umet.edu.ec
Quito, Ecuador

Dr. Diana Cristina Morales Urrutia
<https://orcid.org/0000-0002-9693-3192>
dc.moralesu@uta.edu.ec
Universidad Técnica de Ambato
Ambato, Ecuador

Dr. Hernan Mauricio Quisimain Santamaria
<https://orcid.org/0000-8491-8326>
hernanmquisimalin@uta.edu.ec
Universidad Técnica de Ambato.
Ambato, Ecuador

DIRECTORY OF THE ATHENEA
JOURNAL IN ENGINEERING SCIENCES

ACADEMIC COMMITTEE

Dr. Jorge Mauricio Fuentes Fuentes,
<https://orcid.org/0000-0003-0342-643X>,
jmfuentes@uce.edu.ec;
Universidad Central del Ecuador.
Quito-Ecuador

Dr. Angel Gonzalez Lizardo
<https://orcid.org/0000-0002-0722-1426>
Polytechnic University of Puerto Rico
agonzalez@pupr.edu
Puerto Rico, San Juan

Dr. Yelka Martina López Cuadra
<https://orcid.org/0000-0002-3522-0658>
ylopez@unibagua.edu.pe
Universidad Nacional Intercultural Fabiola Salazar Leguía
de Bagua
Bagua, Perú

Dr. Wilfredo Fariñas Coronado
<https://orcid.org/0000-0003-2095-5755>
Polytechnic University of Puerto Rico
wfarinascoronado@pupr.edu
Puerto Rico, San Juan

Dra. Irela Perez Magin
<https://orcid.org/0000-0003-3329-4503>
iperezmagin@pupr.edu
Universidad Politécnica de Puerto Rico
San Juan, Puerto Rico

Dra. Diana Cristina Morales Urrutia
Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9693-3192>
dc.moralesu@uta.edu.ec
Universidad Técnica de Ambato
Ambato-Ecuador

PhD. Alejandro Suarez-Alvites
<https://orcid.org/0000-0002-9397-057X>
alejandrosualvites@hotmail.com
Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Peru, Lima

Mgt. Juan Segura
<https://orcid.org/0000-0002-0625-0719>
juansegura@uti.edu.ec
Universidad Tecnológica Indoamérica
Quito, Ecuador

Dr. Janio Jadán.
Universidad Tecnológica Indoamérica,
Quito, Ecuador.
janiojadan@uti.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-3616-2074>
Ecuador

Dr. Jairo José Rondón Contreras
<https://orcid.org/0000-0002-9738-966X>
Instituto tecnológico de Santo Domingo
rondonjjx@gmail.com/ jairo.rondon@intec.edu.do
República Dominicana

Dr. Neris Ortega
<https://orcid.org/0000-0001-5643-5925>
Universidad Metropolitana de Quito,
Quito, Ecuador
nortega@umet.edu.ec

Dr. Juan Carlos Alvarado Ibáñez
<https://orcid.org/0000-0002-6413-3457>
jalvarado@unibagua.edu.pe
Universidad Nacional Intercultural Fabiola
Salazar Leguía de Bagua
Bagua-Perú

Content

- 7 José Salazar, Luis Rosales-Romero, Franyelit Suarez-Carreno. ***Evaluation of stresses and deformations of oil strings in a transient state: a theoretical analysis.***
- 15 Mario Augusto Rivera Valenzuela. ***Advances in composite materials based on industrial applications.***
- 24 Argenis Jose Rodriguez Amaiz. ***Design of a criticality monitoring system for conveyor belt rollers.***
- 37 Natasha Guadalupe, Danilo Chavez. ***Simulation of remote control of a hexacopter with force feedback in semi-structured environments.***
- 48 Cesar Geovanny Quilumbaqui. ***Analysis of the integration of solar PV in buildings: design, implementation, and environmental benefits.***

Editorial

The latest developments in engineering and technology underscore the importance of addressing industrial, environmental, and societal challenges through diverse research efforts. In this issue, several studies showcase innovative approaches to longstanding problems in materials science, mechanical design, renewable energy, and robotics, illustrating a commitment to advancing both industrial and sustainable solutions.

A theoretical evaluation of stress and deformation in oil strings offers critical insights for the energy sector, particularly in optimizing safety and performance under transient conditions. Mario Augusto Rivera Valenzuela's research provides a foundation for enhancing oil extraction practices by deepening our understanding of these materials under stress. Similarly, the study on composite materials led by Argenis Jose Rodriguez Amaiz highlights the significant potential of these materials in industrial applications. With the growing demand for lightweight, durable materials, this research is vital for aerospace and automotive manufacturing fields, driving innovation in high-performance, cost-effective solutions.

In parallel, a study on conveyor belt systems by Natasha Guadalupe and Danilo Chavez introduces a criticality monitoring system that offers preventive maintenance insights. By identifying potential failures before they occur, this research supports the goal of minimizing downtime and enhancing operational efficiency in industrial environments. Meanwhile, Cesar Geovanny Quilumbaqui's work on remote control and force feedback simulation for hexacopters represents a leap in robotics, making it feasible to explore difficult terrains while maintaining precise control—a development with applications in search and rescue, remote monitoring, and environmental mapping. Rounding out this issue is an investigation into solar photovoltaic (PV) integration in buildings, emphasizing not only technical design and implementation but also environmental benefits. As the world shifts toward renewable energy, this research is especially timely, demonstrating how urban spaces can contribute to sustainable energy production. Together, these studies reflect an interdisciplinary approach to modern challenges, where advances in materials, sustainable energy, and technology converge to build a resilient and resourceful future.

Dr. Franyelit Suárez
Athenea Journal Publisher
Engineering Sciences



Evaluación de los esfuerzos y deformaciones de las sartas petroleras en estado transitorio: un análisis teórico

José Salazar
<https://orcid.org/0009-0000-4973-1574>
jsalazar123@hotmail.com
UNEXPO Vicerrectorado Puerto Ordaz
Puerto Ordaz-Venezuela

Luis Rosales-Romero
<https://orcid.org/0000-0002-7787-9178>
lrosales@unexpo.edu.ve
UNEXPO Vicerrectorado Puerto Ordaz
Puerto Ordaz-Venezuela

Franyelit Suárez-Carreño
<https://orcid.org/000-0002-8763-5513>
franyelit.suarez@udla.edu.ec
Universidad de las Américas,
Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas,
Carrera de Ingeniería Industrial
Quito, Ecuador

Correspondencia: jsalazar123@hotmail.com

Received (02/05/2024), Accepted (27/05/2024)

Resumen: Este artículo presenta una revisión bibliográfica sobre la evaluación de los esfuerzos y deformaciones de las sartas petroleras en estado transitorio. La revisión incluye estudios que aplican modelos numéricos y analíticos para evaluar las tensiones y deformaciones bajo diferentes condiciones operativas y de carga. También se examinan investigaciones que consideran los efectos de factores como la temperatura, la presión, y las propiedades del material en el desempeño de las sartas. Se destacan trabajos que han desarrollado simulaciones computacionales avanzadas para representar el estado transitorio de las sartas y su interacción con el entorno del pozo. Además, se discuten estudios de caso que han validado estos modelos a través de datos experimentales y de campo. La revisión proporciona una visión integral de las técnicas actuales y sus aplicaciones, identificando tanto los avances significativos como los desafíos pendientes en la evaluación de los esfuerzos y deformaciones de las sartas petroleras en condiciones transitorias.

Palabras clave: industria petrolera, sartas petroleras, estudio de vibraciones, análisis de deformaciones.

Evaluation of stresses and deformations of oil strings in a transient state: a theoretical analysis

Abstract: This article presents a literature review on evaluating the stresses and deformations of oil strings in a transient state. The review includes studies that apply numerical and analytical models to assess stresses and strains under different operating and load conditions. Research that considers the effects of temperature, pressure, and material properties on string performance is also examined. Work that has developed advanced computational simulations to represent the transient state of strings and their interaction with the well environment is highlighted. In addition, case studies that have validated these models through experimental and field data are discussed. The review provides a comprehensive view of current techniques and their applications, identifying significant advances and remaining challenges in evaluating oil string stresses and deformations under transient conditions.

Keywords: oil industry, oil strings, vibration study, deformation analysis.



I. INTRODUCCIÓN

La industria del petróleo y gas enfrenta constantemente desafíos técnicos y operacionales, especialmente en lo que respecta a la integridad y eficiencia de las sargas petroleras durante operaciones de perforación y producción [1]. Las sargas petroleras, compuestas por tubos y herramientas, son fundamentales para la extracción segura y eficaz de hidrocarburos. Su desempeño puede verse afectado por diversos factores, entre ellos, las condiciones transitorias que incluyen cambios en la presión, temperatura y fuerzas mecánicas.

La evaluación precisa de los esfuerzos y deformaciones en estas sargas es crucial para prevenir fallos estructurales, optimizar las operaciones y minimizar los costos asociados con interrupciones y reparaciones. A pesar de los avances tecnológicos en la simulación y modelado, la comprensión del comportamiento dinámico de las sargas en condiciones transitorias sigue siendo un área de investigación activa y de gran interés para la comunidad científica y la industria [1], [2].

En este trabajo se presenta una revisión exhaustiva de la literatura sobre la evaluación de esfuerzos y deformaciones en sargas petroleras durante estados transitorios. Se analizan los métodos y modelos más recientes, incluyendo enfoques numéricos, analíticos y experimentales. Además, se destacan estudios de caso que ilustran la aplicación práctica de estos modelos y se discuten los avances y desafíos en este campo [1], [3]. Esta revisión pretende proporcionar una visión integral y actualizada, contribuyendo al desarrollo de soluciones más robustas y eficaces para la industria petrolera a nivel internacional.

La necesidad de mejorar la seguridad y eficiencia en la explotación de hidrocarburos impulsa la investigación continua en esta área, y esta revisión aspira a ser un recurso valioso tanto para investigadores como para profesionales en el sector.

II. DESAROLLO

Las sargas petroleras son componentes críticos en la industria de la perforación de pozos de petróleo y gas. Estos conjuntos de tuberías y herramientas están diseñados para soportar las severas condiciones encontradas durante la perforación y para asegurar que el pozo se perfora de manera eficiente y segura. Comprender los aspectos teóricos relacionados con las sargas petroleras es fundamental para optimizar su uso y prevenir problemas operativos [3].

Uno de los aspectos teóricos más importantes es la selección adecuada de la sarga. Esto implica considerar las propiedades mecánicas de los materiales, como la resistencia a la tracción, la dureza y la capacidad de soportar altas presiones y temperaturas. Los materiales comúnmente usados incluyen aceros de alta resistencia, que ofrecen una combinación de durabilidad y flexibilidad necesaria para las complejas condiciones de perforación.

Otro aspecto teórico clave es el diseño de la sarga en sí. Esto incluye la configuración de las tuberías y herramientas que la componen [4]. Las sargas se diseñan teniendo en cuenta factores como la profundidad del pozo, el tipo de formación geológica, y las fuerzas que se encontrarán durante la perforación. La geometría y el diámetro de las tuberías deben ser seleccionados para minimizar la fricción y la torsión, y para permitir un flujo eficiente de los fluidos de perforación.

La dinámica de las sartas petroleras también es un área de considerable importancia teórica. La vibración de la sarta, por ejemplo, puede causar desgaste prematuro y fallos estructurales. Por lo tanto, se deben analizar y controlar las vibraciones para mantener la integridad de la sarta. Las simulaciones por computadora y los modelos matemáticos son herramientas valiosas en este contexto, ya que permiten predecir el comportamiento de la sarta bajo diversas condiciones operativas y optimizar su diseño y uso [3]- [5].

La interacción entre la sarta y el fluido de perforación es otro aspecto crucial. El fluido de perforación no solo enfría y lubrica la sarta, sino que también transporta los recortes de perforación a la superficie. La reología del fluido, su viscosidad y densidad deben ser cuidadosamente ajustadas para asegurar un equilibrio adecuado entre el control de la presión del pozo y la eficiencia del transporte de recortes [6]. Este equilibrio es esencial para evitar problemas como el atascamiento de la sarta o la pérdida de circulación.

Además, la teoría de las sartas petroleras abarca el análisis de fallos y la implementación de prácticas de mantenimiento predictivo. Los registros de perforación y los datos de monitoreo en tiempo real se utilizan para identificar patrones que pueden indicar un desgaste excesivo o condiciones operativas adversas [4]. Mediante el uso de técnicas avanzadas de análisis de datos y aprendizaje automático, es posible predecir y prevenir fallos antes de que ocurran, mejorando así la seguridad y la eficiencia de las operaciones de perforación.

La tecnología de las sartas petroleras también está en constante evolución. Los avances en materiales, como los compuestos y los metales de alta resistencia, están mejorando las capacidades de las sartas para soportar condiciones más extremas. Asimismo, la integración de sensores y dispositivos de monitoreo en las sartas permite una recopilación de datos más precisa y en tiempo real, lo que facilita la toma de decisiones informadas durante la perforación.

Las sartas petroleras están formadas por una serie de componentes, cada uno con funciones específicas:

- Broca (Bit): La punta de la sarta, encargada de perforar la roca.
- Collares de perforación (Drill Collars): Tubos pesados y gruesos que proporcionan el peso necesario para la broca y ayudan a mantener la dirección de la perforación.
- Tubería de perforación pesada (Heavy-weight Drill Pipe): Una transición entre los collares de perforación y la tubería de perforación estándar, ofreciendo mayor rigidez y reduciendo la flexión.
- Tubería de perforación (Drill Pipe): Tubos más largos y ligeros que conectan la sarta con la superficie, permitiendo la circulación de fluidos de perforación.

Las sartas petroleras están fabricadas con materiales resistentes y duraderos, principalmente aceros de alta resistencia. Estos aceros deben soportar:

- Altas tensiones: Durante la perforación, las sartas están sometidas a fuerzas de tracción y compresión.
- Altas temperaturas y presiones: Las condiciones de perforación pueden ser extremas, con altas temperaturas y presiones en el fondo del pozo.
- Corrosión: El contacto continuo con fluidos de perforación y formaciones geológicas puede provocar corrosión.

El diseño de las sartas petroleras es crucial para su rendimiento y seguridad:

- Diámetro: Debe ser adecuado para permitir el flujo de fluidos y minimizar la fricción y la torsión.
- Longitud: Las sartas deben ser lo suficientemente largas para alcanzar las profundidades deseadas.
- Conexiones: Las juntas entre los diferentes segmentos deben ser robustas para evitar fugas y fallos estructurales.

Además, las sartas petroleras están sujetas a diversas fuerzas dinámicas durante la perforación:

- Vibraciones: Pueden causar desgaste y fallos prematuros. Es crucial controlar y mitigar las vibraciones.
- Torsión y flexión: La sarta debe ser capaz de soportar la torsión y la flexión sin romperse.

El fluido de perforación desempeña varias funciones esenciales:

- Enfriamiento y lubricación: Ayuda a enfriar la broca y reducir la fricción.
- Transporte de recortes: Lleva los recortes de roca a la superficie.
- Control de presión: Mantiene la presión del pozo para evitar explosiones o derrumbes.

El mantenimiento predictivo y el análisis de fallos son vitales para la operación segura y eficiente de las sartas:

- Monitoreo en tiempo real: Sensores y dispositivos de monitoreo integrados en las sartas permiten la recopilación de datos y el análisis en tiempo real.
- Técnicas de análisis de datos: Se utilizan para predecir y prevenir fallos, mejorando la seguridad y eficiencia de la perforación.

La tecnología de las sartas petroleras está en constante evolución:

- Nuevos materiales: Los avances en materiales compuestos y metales de alta resistencia están mejorando las capacidades de las sartas.

Integración de sensores: Permite una recopilación de datos más precisa y la toma de decisiones informadas durante la perforación.

III. METODOLOGÍA

En este trabajo se realizó una revisión primaria de la bibliografía, cumpliendo con los estándares de la metodología PRISMA (fig. 3).

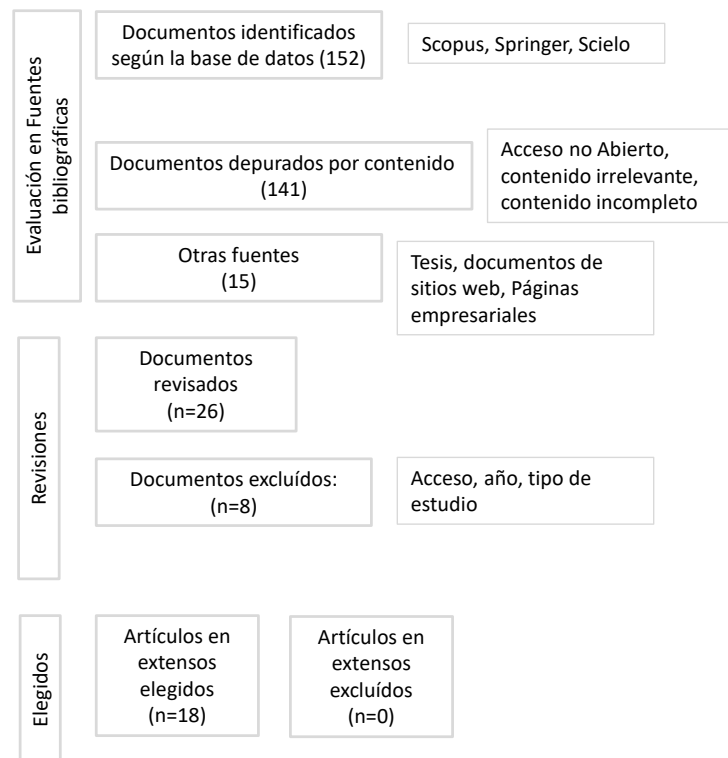


Fig. 3. Tratamiento de la información seleccionada siguiendo la metodología PRISMA.

Por otra parte, se analizaron los documentos siguiendo una evaluación de manuscritos descritos en la tabla 1. Se observa que se han considerado principalmente los desarrollos de ingeniería específicamente en el área de análisis de vibraciones, deformaciones y esfuerzos.

Tabla 1. Control de calidad del material analizado.

(QA)	Preguntas de evaluación de calidad	Respuesta
QA1	¿El documento describe algún desarrollo para el análisis de vibraciones y deformaciones en las sartas petroleras?	(+1) Sí/ (+0) No
QA2	¿El documento especifica las características de las sartas analizadas?	(+1) Sí/ (+0) No
QA3	¿El documento presenta alguna discusión sobre los hallazgos relacionados con las vibraciones y deformaciones en sartas petroleras?	(+1) Sí/ (+0) No
QA4	¿Se considera el análisis matemático o de ingeniería?	(+1) Sí/ (+0) No
QA5	¿Se plantean simulaciones y modelos?	(+1) Sí/ (+0) No
QA6	¿Se plantean nuevas propuestas el tratamiento de vibraciones y deformaciones en sartas petroleras?	(+1) Sí/ (+0) No

En la búsqueda se consideraron las cadenas descritas en la tabla 2. Se observa que es limitado el tema a sectores industriales reconocidos, como Estados Unidos, Brasil, China y Rusia.

Tabla 2. Cadenas de búsquedas utilizadas

Cadena	Revista	Número de documentos
STRESSES + DEFORMATIONS + OIL STRINGS	IEEE Xplorer	10
STRESSES AND DEFORMATIONS OF OIL STRINGS	Scopus	118
OIL STRINGS	MDPI	56

IV. RESULTADOS

En este trabajo se ha desarrollado una revisión bibliográfica para evaluar los aportes científicos desarrollados en relación con los esfuerzos y deformaciones en las sartas petroleras. Para ello se han revisado algunas fuentes bibliográficas (tabla 1), y se han podido constatar algunos avances en este tema, así como algunos vacíos que pueden dar origen a futuras investigaciones.

Tabla 1. Principales revistas publicando en el tema

Nombre de la Revista	Cantidad de Publicaciones	Tipo de Aportes
Journal of Petroleum Science and Engineering	35	Estudios sobre vibraciones de sartas, estabilidad, y nuevos materiales.
Journal of Natural Gas Science and Engineering	28	Innovaciones en diseño de sartas, análisis de rendimiento y simulaciones de perforación.
Journal of Energy Resources Technology	20	Investigación sobre dinámicas no lineales y control de oscilaciones de las sartas.
Archive of Applied Mechanics	18	Análisis de vibraciones y contacto entre la sarta y la pared del pozo, interacción con la roca.
Sensors	15	Avances en telemetría y comunicación inalámbrica en la perforación con sartas.
Journal of Sound and Vibration	12	Estudios sobre vibraciones y control de estabilidad en sartas de perforación.
SPE Drilling & Completion	10	Soluciones prácticas para el control de oscilaciones stick-slip y mejoras en técnicas de perforación.
International Journal of Mechanical Sciences	8	Modelado y análisis de las dinámicas de sartas, incluyendo efectos de retardos temporales.
Composites Science and Technology	7	Investigación sobre uso de materiales compuestos en la construcción de sartas.

Los principales aportes encontrados en las publicaciones de los últimos años estuvieron asociados al estudio de las vibraciones y la estabilidad durante la perforación, incluyendo vibraciones no lineales y el efecto de estas en la eficiencia y seguridad de las operaciones. Además, se han desarrollado avances significativos en el uso de materiales compuestos y otras innovaciones en el diseño de las sartas para mejorar su resistencia y durabilidad. Por otro lado, la investigación sobre el control de oscilaciones stick-slip y otras formas de vibración ha sido crucial para mejorar la precisión y velocidad de perforación. También se observó que se han desarrollado nuevos métodos para mejorar la comunicación de datos desde las sartas hasta la superficie, lo cual es esencial para monitorear las condiciones de perforación en tiempo real. Estas publicaciones han contribuido significativamente al avance en la tecnología de perforación, mejorando tanto la eficiencia como la seguridad de las operaciones de perforación petrolera.

En la tabla 2 se muestran los principales países que realizados desarrollos científicos sobre las sartas petroleras. Se observa que China ha realizado importantes contribuciones en el modelado matemático y el análisis de vibraciones en las sartas de perforación. Han desarrollado modelos para optimizar parámetros de perforación y reducir las vibraciones stick-slip, mejorando así la eficiencia de perforación y la vida útil de los equipos [5], [4]. Por otra parte, Estados Unidos se ha enfocado en desarrollos de ingeniería y estudios experimentales. Investigaciones en control de vibraciones stick-slip han sido prominentes, buscando mitigar los efectos negativos de estas vibraciones en las operaciones de perforación [6], [7].

Así mismo, Brasil ha contribuido significativamente con modelos estocásticos y análisis dinámicos de las sartas de perforación. Estudios de simulación han ayudado a entender mejor las interacciones complejas dentro del sistema de perforación [5]. Por otra parte, en Alemania los investigadores alemanes se han centrado en la validación experimental y estudios de dinámica no lineal, aportando conocimientos teóricos que ayudan a predecir y controlar el comportamiento de las sartas de perforación en diversas condiciones operativas. También Rusia ha producido revisiones bibliográficas y análisis de estabilidad que son cruciales para el desarrollo de nuevas herramientas y técnicas de perforación. Sus estudios se centran en la optimización y mejora de los equipos y técnicas existentes.

Tabla 2. Principales países que han aportado al estudio de las sartas petroleras.

País	Tipo de Aporte	Número de Publicaciones
China	Modelos matemáticos, análisis de vibraciones, optimización de parámetros de perforación	15
Estados Unidos	Desarrollos de ingeniería, estudios experimentales, control de vibraciones stick-slip	12
Brasil	Modelos estocásticos, análisis dinámico, simulaciones	10
Alemania	Investigación teórica, validación experimental, estudios de dinámica no lineal	8
Rusia	Revisiones bibliográficas, análisis de estabilidad, optimización de herramientas de perforación	6

Los resultados también revelan que el análisis matemático de las vibraciones y deformaciones en las sartas petroleras es más frecuente en países industrializados como China y Estados Unidos. Esto demuestra que el análisis de las sartas petroleras es un tema actual y en constante evolución, que requiere una atención permanente.

Este análisis no solo es crucial para mejorar la eficiencia y seguridad de las operaciones de perforación, sino que también juega un papel fundamental en la optimización de los costos y la reducción de los riesgos ambientales. Los avances tecnológicos en sensores y software de simulación han permitido un monitoreo más preciso y en tiempo real de las condiciones de las sartas, lo que facilita la toma de decisiones informadas y oportunas. Además, la colaboración internacional y la inversión en investigación y desarrollo son esenciales para seguir avanzando en este campo. La implementación de prácticas innovadoras y el intercambio de conocimientos entre los países pueden contribuir significativamente a la mejora continua de las técnicas de análisis y a la sostenibilidad de la industria petrolera.

La revisión bibliográfica permitió reconocer que el tema del análisis de las vibraciones y deformaciones en las sartas petroleras es una disciplina dinámica y de gran relevancia, que exige un enfoque multidisciplinario y una actualización constante para abordar los desafíos presentes y futuros en la industria.

CONCLUSIONES

El estudio de las vibraciones y deformaciones en las sartas petroleras es crucial para identificar y mitigar riesgos operacionales, previniendo fallas catastróficas y accidentes que pueden poner en peligro la vida de los trabajadores y causar daños ambientales significativos.

Un análisis detallado de las vibraciones y deformaciones permite optimizar el rendimiento de las sartas, mejorando la eficiencia de las operaciones de perforación y reduciendo el tiempo no productivo.

Detectar y corregir problemas en las sartas de manera temprana ayuda a evitar reparaciones costosas y a prolongar la vida útil de los equipos, lo que se traduce en una reducción de costos operativos y de mantenimiento.

La investigación en este campo impulsa el desarrollo de nuevas tecnologías, como sensores avanzados y software de simulación, que permiten un monitoreo más preciso y en tiempo real de las condiciones de las sartas.

Los estudios sobre vibraciones y deformaciones en las sartas petroleras amplían el conocimiento científico en el área de la mecánica de sólidos y fluidos, aportando datos valiosos para otras disciplinas y aplicaciones industriales.

La investigación en este ámbito promueve el desarrollo de materiales más resistentes y duraderos, capaces de soportar condiciones extremas de operación y minimizar las deformaciones y vibraciones indeseadas.

Al optimizar las operaciones y reducir el riesgo de fallas, se disminuye el impacto ambiental de las actividades de perforación, contribuyendo a una industria petrolera más sostenible y responsable.

La importancia global de este tema fomenta la colaboración entre países, universidades y empresas, facilitando el intercambio de conocimientos y tecnologías que benefician a toda la industria.

Los estudios en este campo son fundamentales para la creación y actualización de normativas y estándares industriales que aseguran prácticas seguras y eficientes en la perforación petrolera.

La continua evolución de las técnicas de análisis y monitoreo abre nuevas líneas de investigación, como la integración de inteligencia artificial y aprendizaje automático, que pueden revolucionar el manejo de vibraciones y deformaciones en las sartas petroleras.

REFERENCES

- [1] M. Martínez, Daniel Insausti y A. Corales, «Análisis y Modelado de los Esfuerzos en una Sección de Cemento de un Pozo Petrolero Utilizando el Método de Elementos de Contorno (MEC),» *Mecánica Computacional*, vol. XXXI, pp. 1065-1083, 2012.
- [2] J. Ramírez y G. Larrazabal, «Imageonología sísmica 3d post-apilamiento en exploracion petrolera,» 2015. [En línea]. Available: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/https://www.researchgate.net/profile/Jose-Ramirez-98/publication/235601976_IMAGEONOLOGIA_SISMICA_3D_POST-APILAMIENTO_EN_EXPLORACION_PETROLERA/links/555a15ee08ae980ca6117682/IMAGEONOLOGIA-SISMICA-3D-POST-. [Último acceso: 2023].
- [3] Y. Del Toro, J. Ortiz y Y. Pimienta, «Biblioteca Digital Personalizada sobre Simulación Numérica en la Industria petrolera.,» Universidad de las Ciencias Informáticas, Cuba, 2010.
- [4] E. Zhang y A. Abdi, «Communication Rate Increase in Drill Strings of Oil and Gas Wells Using Multiple Actuators.,» *Sensors*, vol. 19, p. 1337, 2019.
- [5] J. Tian, L. Wei, L. Yang, L. Dai, T. Zhang y H. Liu, «Research and experimental analysis of drill string dynamics characteristics and stick-slip reduction mechanism,» *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 34, pp. 977-986, 2020.
- [6] A. Yigit y A. Christoforou, «Stick-Slip and Bit-Bounce Interaction in Oil-Well Drillstrings,» *Journal of Energy Resources Technology*, vol. 128, n° 4, pp. 268-274, 2006.
- [7] C. Wang, W. Chen, Z. Wu, J. Li y G. Liu, «Stick-Slip Characteristics of Drill Strings and the Related Drilling Parameters Optimization.,» *Processes*, vol. 11, n° 2, p. 2783, 2023.

Avances en materiales compuestos basados en nanotecnología para aplicaciones industriales

Mario Augusto Rivera Valenzuela*
<https://orcid.org/0000-0003-3088-0654>
mariverav@uce.edu.ec
Universidad Central del Ecuador
Quito-Ecuador

*Correspondencia: mariverav@uce.edu.ec

Received (30/04/2024), Accepted (25/05/2024)

Resumen: Este trabajo tuvo como finalidad evaluar la aplicabilidad y beneficios de los materiales compuestos en diversos contextos industriales. A través de encuestas realizadas a tres industrias mineras y dos del sector eléctrico, se analizaron aspectos como la frecuencia de uso de diferentes materiales compuestos, los beneficios percibidos y los principales desafíos enfrentados en su implementación. Los resultados mostraron una alta preferencia por la fibra de carbono y los polímeros debido a su resistencia y ligereza, destacándose también la importancia de la durabilidad y la reducción de peso como beneficios clave. Sin embargo, el costo elevado y la disponibilidad de materiales fueron identificados como los principales desafíos. Estos hallazgos subrayan la necesidad de continuar invirtiendo en investigación y desarrollo para mejorar la accesibilidad y reducir los costos, optimizando así el uso de materiales compuestos en la industria.

Palabras clave: materiales compuestos, aplicaciones industriales, nanotecnología, análisis de materiales.

Advances in composite materials based on industrial applications

Abstract. - This work aimed to evaluate the applicability and benefits of composite materials in various industrial contexts. Through surveys carried out in three mining industries and two in the electricity sector, aspects such as the frequency of use of different composite materials, the perceived benefits, and the main challenges faced in their implementation were analyzed. The results showed a high preference for carbon fiber and polymers due to their strength and lightness, highlighting the importance of durability and weight reduction as key benefits. However, high cost and availability of materials were identified as the main challenges. These findings underscore the need to continue investing in research and development to improve accessibility and reduce costs, optimizing the use of composite materials in industry.

Keywords: composite materials, industrial applications, nanotechnology, materials analysis

I. INTRODUCCIÓN

La evolución de los materiales compuestos ha sido una de las áreas más dinámicas y prometedoras en la ciencia de materiales, especialmente con la integración de la nanotecnología. Los materiales compuestos basados en nanotecnología han mostrado un potencial significativo para revolucionar diversas aplicaciones industriales debido a sus propiedades mecánicas, térmicas y eléctricas mejoradas. Estos materiales están diseñados a partir de la incorporación de nanoestructuras, como nanotubos de carbono, nanopartículas y nano fibras, en matrices poliméricas, metálicas o cerámicas, resultando en materiales con características únicas que no pueden ser logradas con componentes individuales.

La incorporación de nanotubos de carbono, por ejemplo, ha demostrado mejorar significativamente la resistencia y la rigidez de los materiales compuestos, manteniendo al mismo tiempo una baja densidad. Esto se debe a las extraordinarias propiedades mecánicas de los nanotubos de carbono, que incluyen una alta relación de aspecto y una resistencia específica elevada [1]. Además, las nanopartículas metálicas han sido ampliamente estudiadas por su capacidad para mejorar las propiedades térmicas y eléctricas de los materiales compuestos, haciendo posible su uso en aplicaciones donde se requiere una alta conductividad térmica y eléctrica [2].

Las aplicaciones industriales de estos materiales compuestos son vastas y diversas. En la industria aeroespacial, por ejemplo, la demanda de materiales ligeros pero fuertes es crítica, y los compuestos basados en nanotecnología pueden ofrecer soluciones superiores en términos de rendimiento y eficiencia de combustible [3]. De igual manera, en la industria automotriz, estos materiales pueden ser utilizados para fabricar componentes más ligeros y duraderos, contribuyendo a una mayor eficiencia energética y reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero [4].

De esta manera podemos afirmar que los materiales compuestos basados en nanotecnología representan una revolución en el diseño y desarrollo de nuevos materiales para aplicaciones industriales. La capacidad de estos materiales para combinar propiedades superiores de resistencia, ligereza y conductividad abre nuevas oportunidades para mejorar la eficiencia y el rendimiento en múltiples sectores industriales.

II. DESARROLLO

En esta sección se incluyen los aspectos que fundamentan la investigación, partiendo de una revisión de literatura y siguiendo con las principales características de ciertos materiales.

A. Revisión de la literatura

Niculescu et al [5] presentan los avances recientes en el uso de compuestos magnéticos para la descontaminación del agua. Los autores se centran en la integración de nanopartículas magnéticas en diversos materiales compuestos, destacando sus propiedades únicas que los hacen efectivos para la eliminación de contaminantes orgánicos e inorgánicos del agua. Además, abordan varios tipos de materiales base, incluidos compuestos de carbono, polímeros, hidrogeles, aerogeles, sílica, arcilla, biochar, estructuras metal-orgánicas y estructuras orgánicas covalentes, y describen cómo estos compuestos han demostrado capacidades de adsorción prometedoras para diversos contaminantes industriales.

Adicional, los autores exploran la integración de nanomateriales magnéticos, como nanopartículas de hierro, cobalto y níquel, en matrices poliméricas y de carbono, es un claro ejemplo de cómo la nanotecnología puede mejorar significativamente las propiedades de los materiales compuestos [5]. Destacan que estos compuestos magnéticos no solo son eficaces en la adsorción de contaminantes, sino que también permiten una fácil separación y recuperación de los materiales adsorbentes mediante la aplicación de un campo magnético externo, lo que representa una ventaja considerable sobre las técnicas convencionales de tratamiento de aguas.

Otras investigaciones [6] ofrecen una visión integral sobre los avances recientes en el uso de materiales compuestos magnéticos para la descontaminación del agua. Estos compuestos, que incorporan nanopartículas magnéticas en matrices de carbono, polímeros, hidrogeles, aerogeles, sílica, arcilla, biochar y estructuras organometálicas, han mostrado una notable capacidad de adsorción para eliminar contaminantes industriales, incluidos metales pesados y compuestos orgánicos. La relevancia de este trabajo radica en su enfoque en la multifuncionalidad de los nanomateriales magnéticos, que no solo mejoran la eficiencia de adsorción, sino que también permiten una fácil separación y recuperación de los adsorbentes mediante campos magnéticos externos, reduciendo así los costos y el impacto ambiental de los procesos de tratamiento de agua.

La integración de nanomateriales magnéticos en matrices compuestas representa una aplicación innovadora de la nanotecnología en el desarrollo de materiales avanzados [6]. Este enfoque es particularmente relevante para el campo de los materiales compuestos, ya que combina las propiedades superiores de los nanomateriales con la versatilidad y funcionalidad de las matrices tradicionales. Estos avances no solo tienen implicaciones significativas para la industria del tratamiento de agua, sino que también abren nuevas oportunidades para el desarrollo de tecnologías de purificación más efectivas y ecológicas.

Autores como Chaudhary et al [7] examinan los desarrollos recientes en el uso de empaques biogénicos inteligentes, destacando su potencial para transformar la industria de empaques de alimentos. La investigación se enfoca en la integración de biopolímeros naturales y la intervención de la nanotecnología para crear materiales compuestos avanzados que son ligeros, de alto rendimiento y amigables con el medio ambiente [8]-[10]. Estos desarrollos no solo mejoran la funcionalidad y la durabilidad de los empaques, sino que también abren la puerta a nuevas aplicaciones, como los sistemas de empaque activos e inteligentes que pueden monitorear y preservar la calidad de los alimentos en tiempo real.

Asimismo, estos autores muestran cómo la combinación de biopolímeros naturales y tecnologías avanzadas, como la nanotecnología y la encapsulación, puede dar lugar a nuevos materiales con propiedades mejoradas y funcionalidades avanzadas [7]. Estos materiales compuestos no solo abordan los desafíos de sostenibilidad y reducción de residuos, sino que también proporcionan soluciones innovadoras para la industria del empaque de alimentos, mejorando la seguridad alimentaria y extendiendo la vida útil de los productos. La integración de biosensores en los sistemas de empaque, por ejemplo, permite la detección de patógenos y aditivos nocivos, asegurando así la calidad y seguridad de los alimentos.

Por otra parte, Bernardo-Aruguay et al [8] hacen una evaluación detallada de las propiedades físicas y químicas de varios minerales de silicato en la región sur de Filipinas, con el objetivo de determinar su viabilidad como materias primas para la producción de diversos productos cerámicos. Los autores examinan la arcilla roja de Linamon, la ceniza negra de Salvador y la tierra de diatomeas de Kapatagan, analizando características como la distribución del tamaño de las partículas, los límites de Atterberg, las propiedades térmicas, las morfologías y las composiciones mineralógicas.

Los autores [8] demuestran cómo los recursos minerales locales pueden ser optimizados para aplicaciones industriales, reduciendo la dependencia de materias primas importadas y promoviendo el desarrollo económico sostenible. La caracterización exhaustiva de estos minerales no solo proporciona una base para su uso eficiente en la industria cerámica, sino que también abre oportunidades para la innovación en materiales compuestos. La investigación subraya la importancia de la sinergia entre las propiedades inherentes de los minerales y las técnicas avanzadas de procesamiento, lo que puede conducir a la creación de nuevos materiales compuestos con propiedades mejoradas para aplicaciones específicas en la industria de la cerámica y más allá.

B. Aspectos teóricos

Los materiales compuestos nanotecnológicos son una clase avanzada de materiales que combinan una matriz de material tradicional con nanoestructuras, como nanopartículas, nanotubos, nanofibras, y otros nanomateriales. Estos compuestos se diseñan para aprovechar las propiedades únicas de los nanomateriales, lo que resulta en mejoras significativas en las propiedades mecánicas, térmicas, eléctricas y químicas del material compuesto final.

Propiedades Mecánicas Mejoradas

La incorporación de nanotubos de carbono o nano fibras de carbono puede aumentar significativamente la resistencia y rigidez de los materiales compuestos, sin añadir un peso considerable. Estos nanomateriales tienen una resistencia específica y módulo de elasticidad extremadamente altos, lo que contribuye a la mejora global del material compuesto [1]. Por otra parte, las nanopartículas cerámicas pueden mejorar la dureza y la resistencia al desgaste de las matrices poliméricas o metálicas.

Propiedades Térmicas y Eléctricas

Las nanopartículas metálicas, como las de plata o cobre, pueden aumentar la conductividad térmica del material compuesto, lo cual es beneficioso en aplicaciones donde la disipación de calor es crucial [2]. Además, la integración de nanotubos de carbono o grafeno puede mejorar la conductividad eléctrica de los materiales compuestos, haciéndolos útiles en aplicaciones electrónicas y de almacenamiento de energía.

Propiedades funcionales

Algunos materiales compuestos nanotecnológicos tienen capacidades de autorreparación, donde las nanoestructuras pueden ayudar a reparar daños o grietas en la matriz. Además, las nanopartículas pueden mejorar la resistencia a la corrosión de los metales, lo que extiende la vida útil de los componentes en ambientes agresivos.

Este tipo de materiales tiene importantes aplicaciones industriales, que abarcan una rama amplia de usos relevantes en el desarrollo de diferentes industrias. En la industria aeroespacial, los materiales compuestos nanotecnológicos se utilizan en la industria aeroespacial para fabricar componentes estructurales ligeros y extremadamente fuertes. Esto ayuda a reducir el peso total de las aeronaves, mejorando la eficiencia del combustible y reduciendo las emisiones [3]. Por otra parte, en la industria automotriz, estos materiales se utilizan para fabricar piezas más ligeras y duraderas. Los compuestos nanotecnológicos pueden mejorar la eficiencia energética de los vehículos y aumentar la resistencia al impacto y la fatiga [4].

Por su parte, en el sector electrónico, los materiales con alta conductividad eléctrica y térmica son esenciales en la fabricación de dispositivos electrónicos, desde microchips hasta baterías avanzadas. Los nanocompuestos pueden mejorar el rendimiento y la vida útil de estos dispositivos. Mientras que, en el ámbito biomédico, los materiales compuestos nanotecnológicos se utilizan en dispositivos médicos y en la liberación controlada de fármacos, aprovechando las propiedades de biocompatibilidad y funcionalidad de los nanomateriales.

Desafíos y Perspectivas Futuras

A pesar de sus ventajas, los materiales compuestos nanotecnológicos enfrentan desafíos en términos de fabricación, costos y escalabilidad. La integración uniforme de nanomateriales en matrices tradicionales y el control de las propiedades a escala nanométrica son áreas de investigación activa. Además, se están explorando métodos más sostenibles y económicos para la producción en masa de estos materiales. En el futuro, la continua investigación y desarrollo en nanotecnología promete expandir las aplicaciones de los materiales compuestos nanotecnológicos, haciendo posible la creación de materiales con propiedades "a medida" para satisfacer necesidades específicas en una amplia gama de industrias.

III. METODOLOGÍA

En este trabajo se ha realizado una metodología empírica en diferentes empresas e industrias, para conocer los diferentes avances en materiales que se usan en la producción. Para ello se ha realizado una encuesta a expertos y personal de áreas específicas en la industria, que trabajan de forma directa en la producción específica. Entre las industrias consultadas se encuentran tres industrias mineras, dos industrias del sector eléctrico.

Las características de la encuesta realizada se describen en la tabla 1. Se puede observar que en la industria minera el principal uso es para protección y recubrimientos, mientras que en la industria eléctrica es usado para complementos de los equipos eléctricos. La encuesta estuvo centrada en conocer las aplicaciones de los materiales en el ambiente industrial, así como la frecuencia de uso de estos materiales, la identificación de los materiales, así como las percepciones de los encuestados en cuanto a los beneficios y desafíos del uso de materiales.

Tabla 1. Encuesta realizada en la industria

Industria	Número de encuestados	Alpha de Cronbach	Usos de materiales compuestos
Minera A	42	0.85	Refuerzo estructural, recubrimiento resistente a la corrosión
Minera B	48	0.88	Componentes de maquinaria, recubrimiento anti abrasivo
Minera C	53	0.87	Soportes de transporte, revestimientos protectores
Eléctrica A	47	0.82	Aislamiento térmico, carcasa de equipos eléctricos
Eléctrica B	49	0.84	Componentes de transformadores, recubrimiento conductivo

Hipótesis de Estudio

Hipótesis nula (H0): No hay diferencias significativas en la consistencia interna (Alpha de Cronbach) entre las industrias mineras y las industrias del sector eléctrico.

Hipótesis alternativa (H1): Hay diferencias significativas en la consistencia interna (Alpha de Cronbach) entre las industrias mineras y las industrias del sector eléctrico.

Análisis Estadístico

Cálculo del Promedio y Desviación Estándar del Alpha de Cronbach:

- Para las industrias mineras: Minera A, Minera B, Minera C
- Para las industrias del sector eléctrico: Eléctrica A, Eléctrica B

Prueba t para muestras independientes:

- Comparar las medias del Alpha de Cronbach entre las dos categorías de industrias.

III. RESULTADOS

A. Resultados estadísticos

Industria Minera:

- Promedio del Alpha de Cronbach: 0,8667
- Desviación Estándar del Alpha de Cronbach: 0,0153

Industria Eléctrica:

- Promedio del Alpha de Cronbach: 0,83
- Desviación Estándar del Alpha de Cronbach: 0,0141

Prueba t para muestras independientes

Media1 (mineras)= 0,8667, SD1= 0,0153, n1= 3

Media2 (eléctricas)= 0,83, SD1= 0,0141, n1= 2

$$t = \frac{0,8667 - 0,83}{\sqrt{\frac{0,0153^2}{3} + \frac{0,0141^2}{2}}} = 2,76$$

Con los grados de libertad (df) aproximados mediante la fórmula de Welch para muestras con varianzas desiguales, $df=3,68$. Usando una tabla de distribución t con $df = 3,68$ y un nivel de significancia de 0.05, se obtiene un valor crítico de t aproximadamente de 2,353.

Dado que el valor calculado de t (2.76) es mayor que el valor crítico de t (2.353), rechazamos la hipótesis nula. Esto sugiere que hay diferencias significativas en la consistencia interna de las respuestas (Alpha de Cronbach) entre las industrias mineras y las industrias del sector eléctrico.

Este análisis demuestra que los materiales compuestos se utilizan de manera diferente y con diversos niveles de consistencia en la percepción y aplicación entre diferentes sectores industriales, destacando la importancia de considerar el contexto industrial en el desarrollo y aplicación de estos materiales.

Por otro lado, en la encuesta se consultó sobre la frecuencia de uso de cada tipo de material compuesto por industria (Fig. 2), donde se observó que los principales materiales fueron fibra de carbono, fibra de vidrio, nanocompuestos, materiales basados en polímeros, materiales basados en metal.

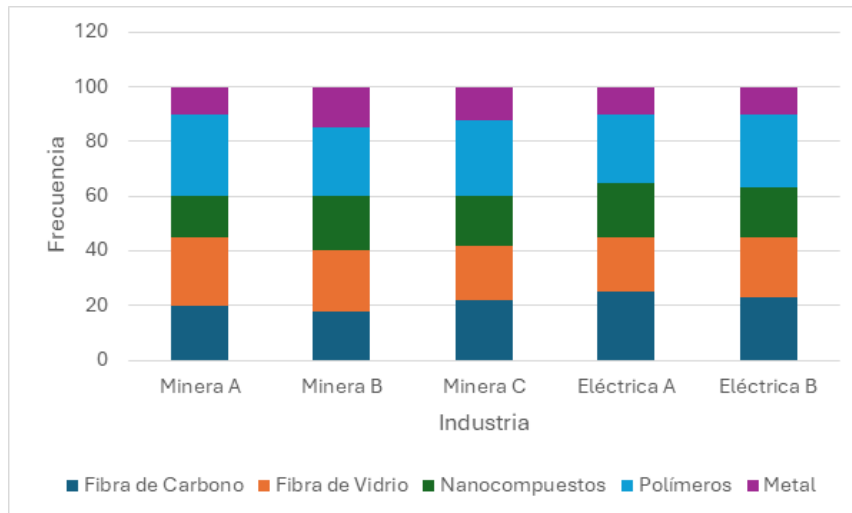


Fig. 2. Frecuencia de uso de cada tipo de material compuesto por industria

Por otra parte, se consultó sobre la percepción de los beneficios al usar materiales compuestos, encontrando los resultados mostrados en la fig. 3. Estos datos representan la cantidad de encuestados que perciben cada beneficio como el más destacado al usar materiales compuestos.

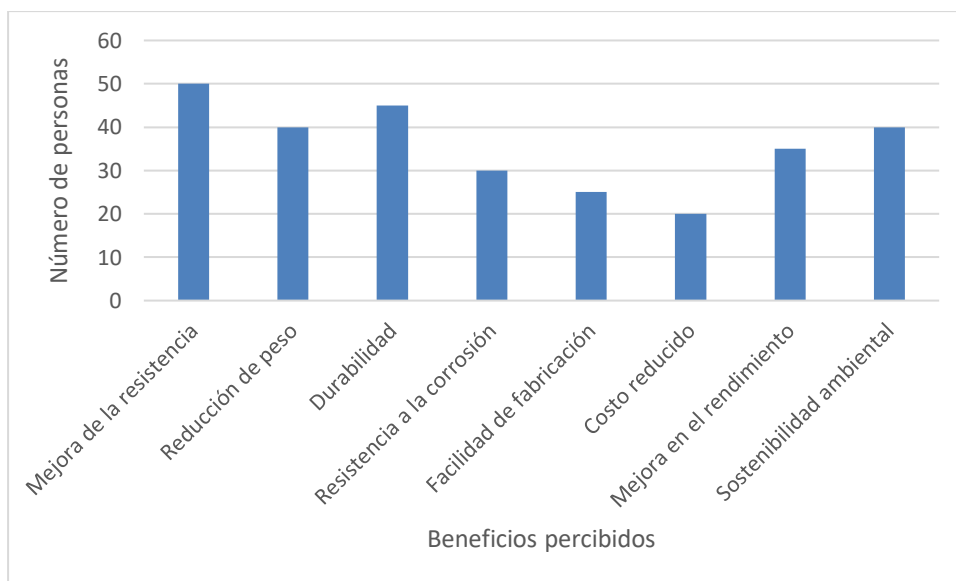


Fig. 3. Percepción encontrada por los encuestados en relación con los beneficios del uso de materiales compuestos.

Por último, en la encuesta realizada se evaluaron los desafíos que los expertos y personal del área considera que deben enfrentar para mejorar las aplicaciones de material compuesto (fig.4).

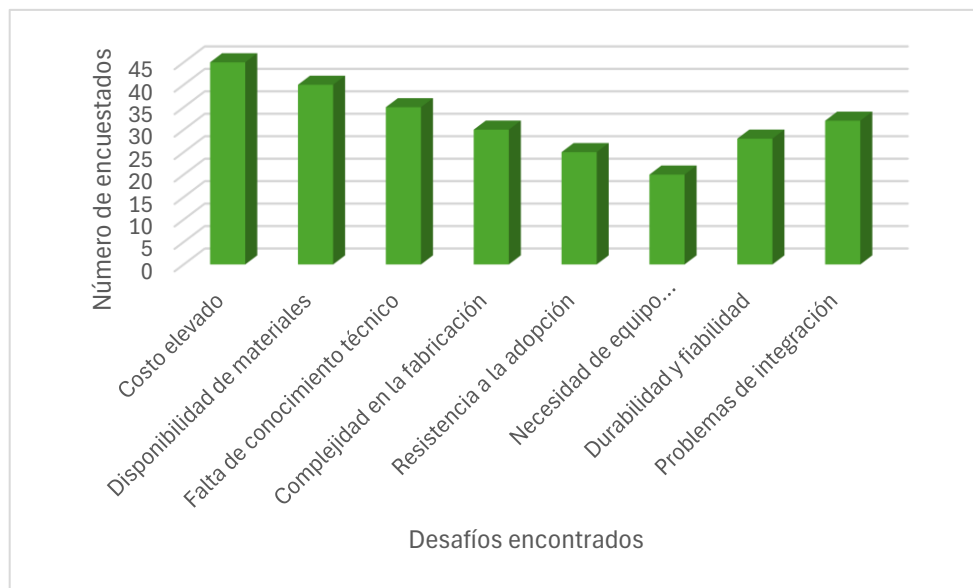


Fig. 4. Desafíos encontrados en la percepción de expertos y personal calificado sobre el uso industrial de materiales compuestos.

CONCLUSIONES

Se observó que tanto las industrias mineras como las eléctricas utilizan una variedad de materiales compuestos, pero con ciertas preferencias notables. En este sentido, la fibra de carbono y los polímeros son los materiales más utilizados en ambas industrias, destacándose por su alta frecuencia de uso. Esto puede atribuirse a sus propiedades superiores de resistencia y ligereza, que son críticas en aplicaciones industriales. Las industrias mineras también muestran un uso considerable de fibra de vidrio y nanocompuestos, lo que indica una tendencia hacia la integración de materiales avanzados que pueden mejorar la durabilidad y la eficiencia operativa. En contraste, las industrias eléctricas muestran una preferencia ligeramente menor por los nanocompuestos y los materiales metálicos, lo que sugiere un enfoque más conservador en la adopción de tecnologías emergentes. Este análisis destaca la importancia de los materiales compuestos en mejorar la eficiencia y la sostenibilidad en aplicaciones industriales clave.

Los resultados muestran que la mejora de la resistencia es el beneficio más valorado, seguido de cerca por la durabilidad y la reducción de peso. Estos beneficios son fundamentales para aplicaciones industriales que requieren materiales que puedan soportar condiciones extremas y prolongar la vida útil de los productos. La resistencia a la corrosión y la sostenibilidad ambiental también son percibidos como beneficios importantes, reflejando una creciente conciencia sobre la necesidad de materiales que puedan contribuir a prácticas industriales más ecológicas. La facilidad de fabricación y el costo reducido son menos valorados, lo que sugiere que, aunque los materiales compuestos ofrecen ventajas significativas, aún existen desafíos relacionados con la producción y los costos que deben ser abordados. Este análisis resalta la necesidad de continuar mejorando las tecnologías de fabricación de materiales compuestos para maximizar sus beneficios y minimizar sus limitaciones.

En cuanto a los desafíos que enfrenta la industria, se observó el costo elevado es el mayor obstáculo, seguido de la disponibilidad de materiales y la falta de conocimiento técnico. Estos desafíos subrayan la necesidad de invertir en investigación y desarrollo para reducir los costos de producción y mejorar la accesibilidad de los materiales compuestos. La complejidad en la fabricación y la necesidad de equipo especializado también son desafíos significativos, lo que indica que las industrias requieren tecnologías de fabricación más avanzadas y capacitación técnica para optimizar el uso de materiales compuestos. La resistencia a la adopción y los problemas de integración reflejan una cierta inercia organizacional y técnica que debe ser superada para facilitar una transición más fluida hacia el uso de estos materiales. Este análisis sugiere que, aunque los materiales compuestos ofrecen numerosas ventajas, es crucial abordar estos desafíos mediante estrategias de educación, inversión en tecnología y desarrollo de políticas que promuevan su adopción industrial.

REFERENCIAS

- [1] S. Iijima, "Helical microtubules of graphitic carbon," *Nature*, vol. 354, no. 6348, pp. 56-58, 1991.
- [2] J. Kreuter, "Nanoparticles—a historical perspective," *International Journal of Pharmaceutics*, vol. 331, no. 1, pp. 1-10, 2007.
- [3] E. T. Thostenson, Z. Ren, and T. W. Chou, "Advances in the science and technology of carbon nanotubes and their composites: a review," *Composites Science and Technology*, vol. 65, no. 3-4, pp. 491-516, 2005.
- [4] G. Wegner and V. K. Gupta, "Nanocomposite materials," *Nanocomposites: Science and Technology*, pp. 223-232, 2010.
- [5] A.-G. Niculescu, B. Mihaiescu, D. E. Mihaiescu, T. Hadibarata, and A. M. Grumezescu, "An Updated Overview of Magnetic Composites for Water Decontamination," *Polymers*, vol. 16, no. 5, p. 709, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/polym16050709>.
- [6] G. F. Huseien, "Potential Applications of Core-Shell Nanoparticles in Construction Industry Revisited," *Applied Nano*, vol. 4, no. 2, pp. 75-114, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/applnano4020006>.
- [7] P. C. Nath et al., "Biogeneration of Valuable Nanomaterials from Agro-Wastes: A Comprehensive Review," *Agronomy*, vol. 13, no. 2, p. 561, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/agronomy13020561>.
- [8] I. C. Bernardo-Arugay et al., "Evaluation of Linamon Red Clay, Salvador Black Cinder and Kapatagan Diatomaceous Earth of the Southern Philippines," *Minerals*, vol. 13, no. 2, p. 252, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/min13020252>.
- [9] M. Krystyjan et al., "Polysaccharides Composite Materials as Carbon Nanoparticles Carrier," *Polymers*, vol. 14, no. 5, p. 948, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/polym14050948>.
- [10] V. Chaudhary, S. P. Bangar, N. Thakur, and M. Trif, "Recent Advancements in Smart Biogenic Packaging: Reshaping the Future of the Food Packaging Industry," *Polymers*, vol. 14, no. 4, p. 829, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/polym14040829>.

Diseño de un sistema de monitoreo de criticidad para rodillos de cintas transportadoras

Argenis José Rodríguez Amaíz
<https://orcid.org/0009-0001-4305-3554>
advanced.reliability29@gmail.com
Ferrominera Orinoco
Bolívar - Venezuela

*Correspondencia: advanced.reliability29@gmail.com

Received (30/10/2023), Accepted (25/02/2024)

Resumen: El documento, presenta el diseño de un sistema de monitoreo de criticidad para visualizar en tiempo real la condición de los rodillos de una cinta transportadora. Este sistema utiliza un indicador tipo semáforo para comunicar de manera visual la criticidad del equipo; en este artículo están definidos los pasos para la aplicación de este modelo donde se le asignará un nivel de criticidad a cada rodillo mediante un sistema programable con valores de acuerdo a la condición actual de estos elementos cuyos resultados proporcionan información valiosa para optimizar las tareas de mantenimiento, reducir costos y mejorar la disponibilidad de las cintas transportadoras. Los reportes generados por este sistema lo convierten en una herramienta valiosa para una gestión gerencial, ya que su implementación se traduce en mayor seguridad, optimización del mantenimiento, extensión de la vida útil del equipo y mejor eficiencia operativa, asegurando la confiabilidad y productividad de las operaciones industriales.

Palabras clave: criticidad, rodillos, cintas transportadoras, mantenimiento preventivo, indicador tipo semáforo, reporte gerencial.

Design of a criticality monitoring system for conveyor belt rollers

Abstract. - The document presents the design of a criticality monitoring system to visualize the condition of the rollers of a conveyor belt in real-time. The paper presents the design of a criticality monitoring system to visualize the status of the rollers of a conveyor belt in real time. This system uses a traffic light indicator to visualize the criticality of the equipment. This article defines the steps for the application of this model where a criticality level will be assigned to each roller through a programmable system with values according to the current condition of these elements whose results provide valuable information to optimize maintenance tasks, reduce costs, and improve the availability of conveyor belts. The reports generated by this system make it a valuable tool for managerial management, since its implementation translates into greater safety, optimization of maintenance, extension of the useful life of the equipment, and better operational efficiency, ensuring the reliability and productivity of the industrial operations.

Keywords: criticality, rollers, conveyor belts, preventive maintenance, traffic light indicator, management report.

I. INTRODUCCIÓN

La evaluación de la criticidad en un equipo es un proceso continuo que debe revisarse periódicamente, ya que la disponibilidad puede cambiar con el tiempo. Las cintas transportadoras son componentes esenciales en diversos sectores industriales, desde la minería y la construcción hasta la manufactura y la distribución. Los rodillos, piezas clave en su funcionamiento, pueden sufrir desgastes y fallas que impactan negativamente la operación. Por lo tanto, la criticidad de las cintas transportadoras debe ser considerada como una prioridad en la gestión industrial. Implementar estrategias para garantizar su confiabilidad y buen funcionamiento es crucial para prevenir las consecuencias negativas.

Para mitigar estos riesgos se requieren de sistemas programables que brinden información precisa y en tiempo real; un sistema que permita monitorear el nivel de criticidad de los rodillos es una repuesta ante tal necesidad.

Los beneficios del sistema son múltiples:

- Reducción de paradas imprevistas: Se actúa antes de que ocurran fallas, minimizando interrupciones en la producción.
- Optimización del mantenimiento: Facilita la programación de tareas preventivas, reduciendo costos y tiempos de reparación.
- Extensión de la vida útil de los rodillos: Permite detectar y corregir problemas menores antes de que se agraven.
- Mejora de la eficiencia: Aumenta la disponibilidad de las cintas transportadoras y optimiza el flujo de materiales.

Su implementación lo convierte en un aliado estratégico para la industria. Por ende, el presente trabajo está establecido con un desarrollo teórico que contiene los conceptos técnicos que se utilizaron para llevar a cabo esta investigación. Así mismo, también contiene la metodología con el tipo de investigación aplicada y los procedimientos para desarrollar este sistema de monitoreo de criticidad en cintas transportadoras, finalizando con los resultados obtenidos, las conclusiones y referencias utilizadas.

II. DESARROLLO

La criticidad es un indicador que informa del riesgo que presenta un dispositivo para su empresa, facilitando la priorización del mantenimiento. Es una medida para dar prioridad a los activos para la planificación del gestor de mantenimiento. Este nivel se representa a su vez con un valor numérico que permitirá ponderar la criticidad de cada activo o componente de un equipo.

Tabla 1. Niveles de Criticidad.

Código	Nivel de Criticidad	Color
AC	Alta criticidad	Rojo
MC	Mediana criticidad	Amarillo
BC	Baja criticidad	Verde

A. Indicadores tipo semáforo

Los indicadores tipo semáforo son una herramienta visual simple y efectiva para comunicar la criticidad de los activos o componentes en un sistema de mantenimiento industrial. Se basan en el uso de colores para representar diferentes niveles de criticidad, similar a un semáforo:



Fig. 1. Semáforo indicador. Elaboración propia del autor.

- **Rojo:** Indica que el activo o componente se encuentra en un estado crítico y requiere atención inmediata.
- **Amarillo:** Indica que el activo o componente se encuentra en un estado de alerta y requiere atención preventiva.
- **Verde:** Indica que el activo o componente se encuentra en un estado normal y no requiere atención inmediata.

Los indicadores tipo semáforo son definidos por M. Mozammel Haque (2016)¹ como “una herramienta valiosa para la gestión de activos en una variedad de industrias. Pueden ayudar a mejorar la comunicación, la toma de decisiones y la eficiencia general del proceso de mantenimiento.” [1]

B. Monitor de criticidad programado

Es una herramienta que permite visualizar y gestionar la criticidad de los equipos en un sistema de mantenimiento industrial. Se basa en la clasificación de los equipos o sus componentes en función de su impacto potencial en la producción, la seguridad y los costos de la empresa en caso de falla.

C. Beneficios del uso de un monitor de criticidad

- **Mejora la toma de decisiones:** Permite a los responsables de mantenimiento tomar decisiones informadas sobre la asignación de recursos y la priorización de tareas de mantenimiento.
- **Reduce el riesgo de fallas:** Permite identificar y gestionar los activos críticos de manera proactiva, lo que reduce el riesgo de fallas imprevistas y costosas.
- **Mejora la eficiencia del mantenimiento:** Permite optimizar las actividades de mantenimiento al enfocarse en los activos que tienen un mayor impacto potencial en caso de falla.

Un monitor de criticidad eficaz para los equipos o sus componentes, según el Dr. John Van Der Meer, “Es una herramienta poderosa que puede ayudar a las empresas a prevenir fallos costosos y proteger a sus trabajadores y al medio ambiente” [2].

D. Gráficos indicadores

Se utilizan para mostrar tendencias, patrones y cambios en los datos de una manera fácil de entender. Son útiles para comunicar información sobre el rendimiento de una métrica en relación con un objetivo o rango objetivo. fig. 2.



Fig. 2. Modelo de gráfico indicador [3].

Los gráficos indicadores ofrecen varios beneficios, que incluyen:

- **Mejora de la comunicación:** Los gráficos indicadores pueden comunicar información compleja de una manera fácil de entender.
- **Mayor visibilidad:** Los gráficos indicadores pueden ayudar a aumentar la visibilidad de las métricas clave.
- **Promoción de la acción:** Los gráficos indicadores pueden ayudar a promover la acción al mostrar cuándo es necesario tomar medidas correctivas.

E. Cintas o bandas transportadoras

Es un sistema de transporte que consiste en una banda continua que se mueve sobre poleas y está sostenida por rodillos (Acanalada) o una bandeja plana. La banda transportadora se utiliza para transportar materiales a granel o productos manufacturados sobre una distancia fija o variable. fig.3.

En el transporte de materiales a granel, según el Manual para Transportadores de Cinta CEMA (N° 305-2019)⁴, indica que: "Los transportadores de cinta proporcionan un flujo continuo de material evitando demoras, peligros de seguridad en rieles, tráfico de motor, y otros congestionamientos" (Pag 6). [3]

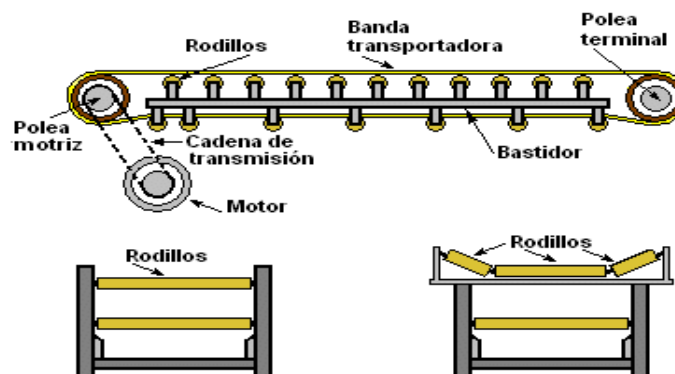


Fig. 3. Esquema de una cinta transportadora [5].

Una cinta transportadora acanalada, es un tipo de transportador de banda que utiliza una banda con surcos o canales en su superficie para transportar materiales. Los surcos ayudan a contener el material en la banda, lo que permite transportar materiales inclinados o incluso verticalmente. fig. 4.



Fig. 4. Modelo de Cinta transportadora acanalada para el procesamiento de mineral de carbón [6].

F. Bastidor de carga para cinta acanalada

Es la estructura principal que soporta la banda transportadora, los rodillos, los componentes mecánicos y el material transportado. Tienen tres configuraciones generales con ángulos de 20° , 35° y 45° . Usualmente consta de tres rodillos. Los dos rodillos extremos están inclinados hacia arriba, quedando el central horizontal. fig. 5.

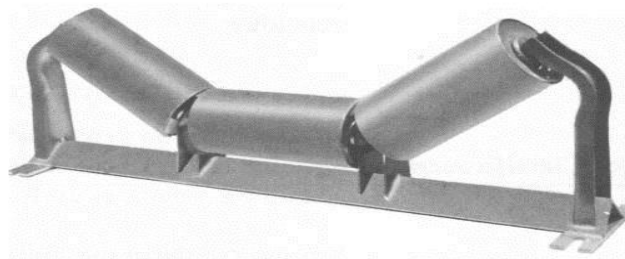


Fig. 5. Bastidor Acanalado de Carga [7].

Los bastidores con rodillos levantados a 35° y 45° proporcionan mayor capacidad de carga para un ancho dado, y demanda mayor flexibilidad para la cinta.

G. Bastidor de retorno

Estos bastidores son usados para soportar la cinta en el camino de retorno. Usualmente están suspendidos debajo de la misma estructura que soporta los bastidores de carga. fig. 6.



Fig. 6. Bastidor de retorno [7].

H. Espaciamiento entre los bastidores

El espaciamiento normal sugerido en los bastidores para el trabajo de los transportadores en general es establecido por el Manual para Transportadores de Cinta CEMA (N° 305-2019)¹. Los bastidores deberían espaciarse para mantener la correa fija y en contacto con el bordeado de goma de los delantales a lo largo de su longitud entera. Tabla 2.

Tabla 2. Espaciado entre bastidores.

Ancho de la cinta. (Pulgadas)	Peso de las ruedas guía del material manipulado.						Rodillos de retorno.
	30	50	75	100	150	200	
18	5.5 ft	5.0 ft	5.0 ft	5.0 ft	4.5 ft	4.5 ft	10.0 ft
24	5.0 ft	4.5 ft	4.5 ft	4.0 ft	4.0 ft	4.0 ft	10.0 ft
30	5.0 ft	4.5 ft	4.5 ft	4.0 ft	4.0 ft	4.0 ft	10.0 ft
36	5.0 ft	4.5 ft	4.0 ft	4.0 ft	3.5 ft	3.5 ft	10.0 ft
42	4.5 ft	4.5 ft	4.0 ft	3.5 ft	3.0 ft	3.0 ft	10.0 ft
48	4.5 ft	4.0 ft	4.0 ft	3.5 ft	3.0 ft	3.0 ft	10.0 ft
54	4.5 ft	4.0 ft	3.5 ft	3.5 ft	3.0 ft	3.0 ft	10.0 ft
60	4.0 ft	4.0 ft	3.5 ft	3.0 ft	3.0 ft	3.0 ft	10.0 ft
72	4.0 ft	3.5 ft	3.5 ft	3.0 ft	2.5 ft	2.5 ft	8.0 ft
84	3.5 ft	3.5 ft	3.0 ft	2.5 ft	2.5 ft	2.0 ft	8.0 ft
96	3.5 ft	3.5 ft	3.0 ft	2.5 ft	2.0 ft	2.0 ft	8.0 ft

III. METODOLOGÍA

A. Tipo de investigación

Esta Investigación es no experimental, ya que este proyecto se caracteriza por la ausencia de manipulación o control de las variables. En este tipo de estudios, se observa y analiza el fenómeno o evento tal y como ocurren de forma natural, sin intervenir en ellos. También es una investigación aplicada, ya que tiene como objetivo generar conocimiento con aplicación directa para resolver problemas específicos o satisfacer necesidades prácticas.

En este caso, el estudio se aplicó para una banda acanalada con 30 estaciones de rodillos, específicamente veinte y dos (22) bastidores de carga de tres (3) rodillos y ocho (08) bastidores de retorno.

B. Procedimiento metodológico

1. Se generó una tabla en Excel con los valores 1,2,3 asignando los colores del semáforo donde; Rojo = 1, Amarillo = 2 y Verde = 3. El color verde indica que el rodillo está óptimo, el amarillo que está regular y el rojo que está dañado. Tabla N° 2 y 3.
2. La tabla generada se programó para evaluar los niveles de criticidad en función del dato que insertara el inspector técnico o inspector planificador, que es el encargado de recolectar la data y generar los primeros indicadores. Tabla N° 3 y 4.

Tabla 3. Tabla de Evaluación de Criticidad en rodillos. Estaciones N° 1 al 15.

ESTACIONES	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RODILLOS DE CARGA LATERAL DERECHO	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1
OPTIMO	-	3	-	3	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-
REGULAR	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	2	-	2	-	-
DAÑADO	1	-	1	-	1	1	-	1	1	-	-	1	-	1	1
RODILLOS DE CARGA CENTRAL	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
OPTIMO	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
REGULAR	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	2	2
DAÑADO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
RODILLOS DE CARGA LATERAL IZQUIERDO	3	-	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
OPTIMO	3	-	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
REGULAR	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-
DAÑADO	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
RODILLOS DE RETORNO	-	-	-	3	-	-	3	-	-	3	-	-	-	3	-
OPTIMO	-	-	-	3	-	-	3	-	-	3	-	-	-	3	-
REGULAR	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-
DAÑADO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 4. Tabla de Evaluación de Criticidad en rodillos. Estaciones N°16 al 30.

ESTACIONES	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
RODILLOS DE CARGA LATERAL DERECHO	1	3	1	2	3	1	2	3	1	2	1	3	2	2	3
OPTIMO	-	3	-	-	3	-	-	3	-	-	-	3	-	-	3
REGULAR	-	-	-	2	-	-	2	-	-	2	-	-	2	2	-
DAÑADO	1	-	1	-	-	1	-	-	1	-	1	-	1	-	-
RODILLOS DE CARGA CENTRAL	2	2	2	2	1	3	3	3	3	3	3	2	3	2	3
OPTIMO	-	-	-	-	-	3	3	3	3	3	3	-	3	-	3
REGULAR	2	2	2	2	-	-	-	-	-	-	-	2	-	2	-
DAÑADO	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
RODILLOS DE CARGA LATERAL IZQUIERDO	2	3	3	2	3	2	3	2	3	1	3	3	3	3	3
OPTIMO	-	3	3	-	3	-	3	-	3	-	3	3	3	3	3
REGULAR	2	-	-	2	-	2	-	2	-	-	-	-	-	-	-
DAÑADO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-
RODILLOS DE RETORNO	-	-	-	2	-	-	-	1	-	-	-	3	-	-	-
OPTIMO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-
REGULAR	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DAÑADO	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-

- Se programaron las celdas de instrucción de datos a través de formatos con condiciones de Excel, para que el dato al ser ingresado a la celda adopte el color de relleno asignado según el número. fig. 8.

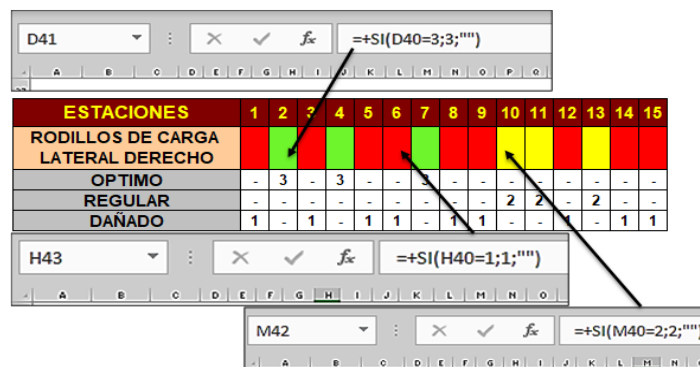


Fig. 8. Configuración de las celdas con condiciones de Excel para carga de Datos. Elaboración propia del autor.

- Se diseñó un panel de alerta con grafica de barras para visualizar los resultados de manera óptima conociendo la ubicación y el estado del rodillo de la cinta transportadora, una vez fueran ingresados los datos en las tablas mencionadas. "fig. 9, 10, 11 y 12".

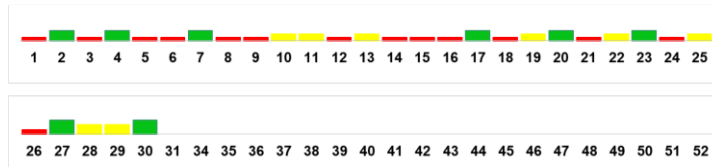


Fig. 9. Panel de Alerta – Rodillos de Carga Lateral Derecho.

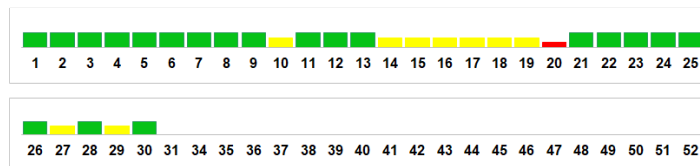


Fig. 10. Panel de Alerta – Rodillos de Carga central.

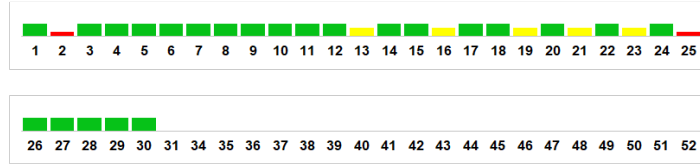


Fig. 11. Panel de Alerta – Rodillos de Carga Lateral Izquierdo.

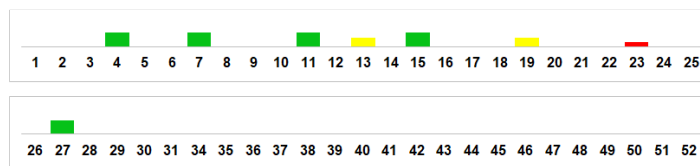


Fig. 12. Panel de Alerta – Rodillos de Retorno.

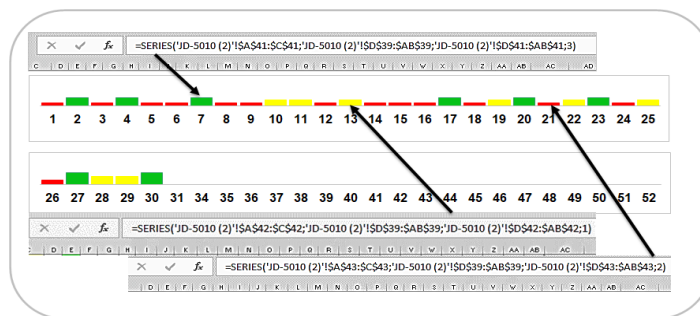


Fig. 13. Configuración del panel de alerta para cada rodillo de la cinta transportadora

- De acuerdo con el panel de alerta se diseñó una tabla de resultados para visualizar las cantidades de rodillos óptimos, regulares y dañados, para que la información consolidada pueda ser visualizada en un informe gerencial. tabla 5.

Tabla 5. Tabla de Resultados para visualizar la condición y cantidades de los rodillos de la Cinta Transportadora.

	PANEL DE RESULTADOS CONDICIÓN DE RODILLOS			TOTAL RODILLOS
	OPTIMOS	REGULARES	DAÑADOS	
RODILLOS DE CARGA LATERAL DERECHO	8	8	14	30
RODILLOS DE CARGA CENTRAL	20	9	1	30
RODILLOS DE CARGA LATERAL IZQUIERDO	23	5	2	30
RODILLOS DE RETORNO	5	2	1	9

- Se diseñaron graficas dinámicas para el reporte gerencial del monitor de criticidad, de manera que los resultados puedan ser analizados por el personal técnico responsable.

Se visualiza mediante gráficos dinámicos la cantidad de rodillos de carga lateral derecho e izquierdo en condiciones óptimas, regulares y dañados. Fig. 14.

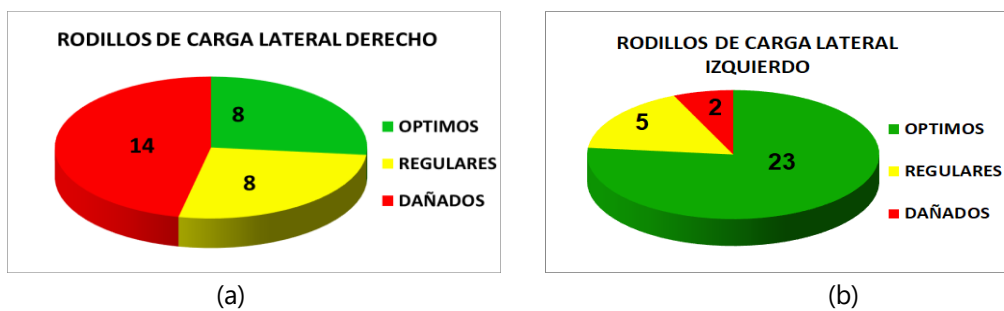


Fig. 14. Condición de los Rodillos. (a) Rodillos de carga lateral derecho. (b) Rodillos de carga lateral izquierdo. Fuente. Elaboración propia del autor.

Se visualiza mediante gráficos dinámicos la cantidad de rodillos de carga central y de retornos en condiciones óptimas, regulares y dañados. Fig. 15

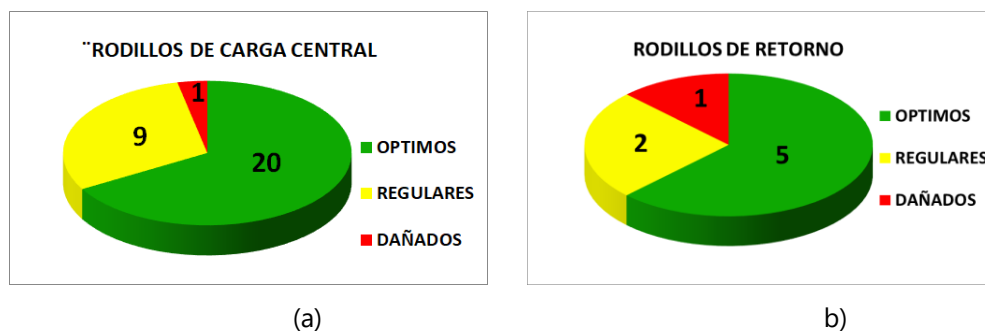


Fig. 15. Condición de los Rodillos. (a) Rodillos de carga central. (b) Rodillos de retorno. Fuente: Elaboración propia del autor.

Se obtiene por otra parte, una tabla con los resultados registrados semanalmente de la condición de la cinta transportadora, de acuerdo con la frecuencia de inspección para realizar un seguimiento al estado actual del equipo. Tabla 6.

Tabla 6. Seguimiento a la condición de la cinta.

SEGUIMIENTO A LA CONDICION DE LA CINTA				
ESTADO	SEMANA 6	SEMANA 14	SEMANA 22	SEMANA 30
OPTIMO	57%	53%	50%	92%
REGULAR	24%	24%	20%	3%
MALO	18%	24%	30%	5%

Los resultados registrados en la tabla de seguimiento de condición de la cinta se visualizan en gráficos de barra dinámicos para sus respectivos análisis en el reporte gerencial. Fig. 16

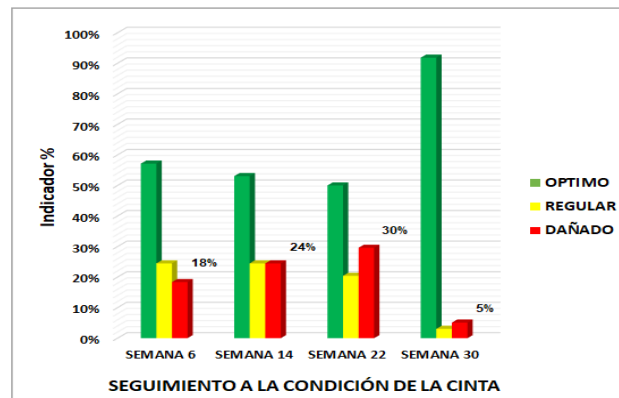


Fig. 16. Seguimiento a la Condición de la Cinta. Fuente. Elaboración propia del autor.

IV. RESULTADOS

Para finalizar y visualizar los resultados del monitor de criticidad para una cinta transportadora, se deben realizar los siguientes procedimientos:

1. Inspeccionar el estado de la cinta transportadora en tiempo real.
 - **Técnicos:** Detectan la presencia de desviaciones en los rodillos de la cinta.
2. Carga de datos.
 - **Origen de los datos:** Los datos tomados reflejan la condición de los rodillos de cada cinta transportadora.
 - **Lectura de datos:** Se cargan los datos tomados por los técnicos en la base del sistema.
 - **Frecuencia de actualización:** La frecuencia de actualización dependerá de la ratio de operación de cada cinta transportadora.
3. Visualización del monitor de criticidad.
 - **Actualización de estado:** Se actualiza el estado o condición de los rodillos de cada cinta transportadora.
 - **Semáforo indicador:** El indicador muestra los resultados mediante graficas donde los colores Verde, amarillo y rojo señalan la condición de cada rodillo de la cinta transportadora.

A continuación, Se visualiza la interfaz del monitor de criticidad para la carga de datos y el reporte gerencial que este emite, donde se puede visualizar la condición de la cinta transportadora en tiempo real y el seguimiento y control de la misma durante cada semana.

La interfaz del monitor de criticidad permite al usuario o técnico registrar los resultados de la inspección realizada a la cinta transportadora en tiempo real. fig 17.

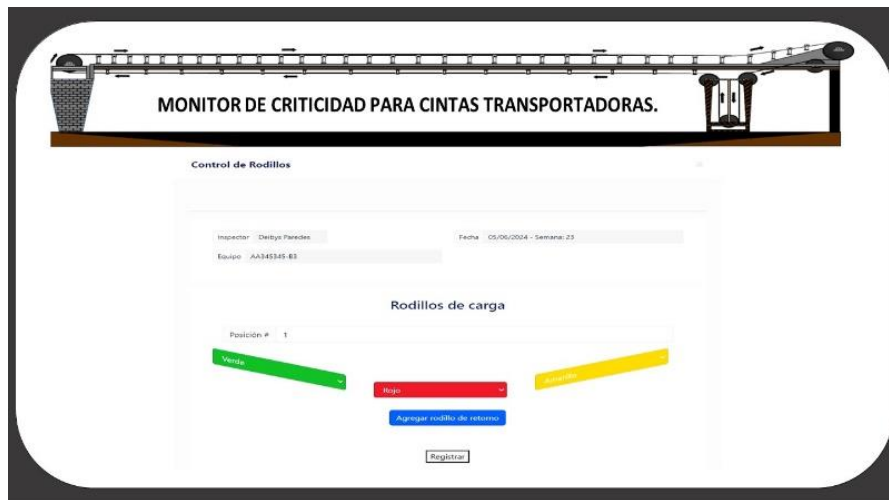


Fig. 17. Interfaz de usuario del Monitor de Criticidad para la carga de los datos. Elaboración propia del autor.

Este reporte gerencial permite obtener la información necesaria para evaluar el impacto de las estrategias de mantenimiento aplicadas, para garantizar la disponibilidad de la cinta transportadora. fig 18.

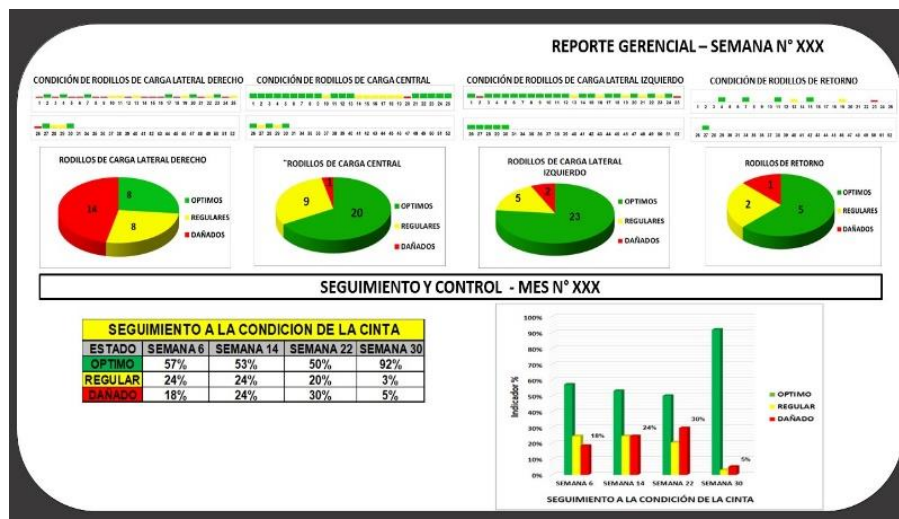


Fig. 18. Reporte Gerencial generado por el Monitor de Criticidad. Elaboración propia del autor.

A fin de lo presentado en este documento, Se recomienda lo siguiente:

1. Esta investigación sugiere la posibilidad de modernizar y automatizar nuestro sistema de criticidad, tradicionalmente basado en Excel; consideramos la migración a una aplicación web como una opción viable para mejorar la eficiencia, precisión y accesibilidad. Este cambio potencial permitiría a los usuarios acceder a la información en tiempo real desde cualquier lugar y dispositivo, facilitando una colaboración más efectiva.
2. De acuerdo al modelo de cinta transportadora existen diferentes necesidades de monitoreo. Es importante implementar el monitor y que esté diseñado para el tipo específico de cinta transportadora que se está utilizando.

CONCLUSIONES

1. El monitor de criticidad puede identificar y alertar sobre posibles fallos o problemas en la cinta transportadora antes de que ocurran, lo que permite tomar medidas preventivas y evitar paradas no planificadas.
2. Aplicar un monitor de criticidad en cintas transportadoras ayuda a las empresas a identificar y prevenir varios fallos potenciales antes de que ocurran. Esto evita daños en la cinta transportadora y en los productos transportados evitando pérdidas monetarias.
3. El monitor de criticidad puede proporcionar datos valiosos sobre el rendimiento de la cinta transportadora, que pueden usarse para tomar mejores decisiones sobre el mantenimiento, la programación y las mejoras del sistema.
4. El monitor de criticidad puede ayudar a mejorar la seguridad en el lugar de trabajo al identificar y alertar sobre posibles peligros, como un exceso de carga o un mal funcionamiento de los componentes.
5. La información proporcionada por el monitor permite establecer estrategias de mantenimiento proactivo, optimizando el uso de recursos y evitando intervenciones innecesarias. Esto conduce a una mayor eficiencia en la gestión de la cinta transportadora y a una prolongación de su vida útil.

REFERENCIAS

- [1] M. Mozammel Haque. Art. El uso de indicadores semáforo en la gestión. https://www.researchgate.net/publication/263962649_Performance_Measures_for_Traffic_Signal_Systems_An_Outcome-Oriented_Approach, 2016.
- [2] Dr. John Van Der Meer. Gestión de la Criticidad para Activos Industriales: Un enfoque Práctico. España, 2008.
- [3] Grafica inteligente e indicadores GI. Tipos de gráficos indicadores. <https://graficainteligente.com.br/Indicadores-de-Qualidade->.
- [4] Manual para Transportadores de Cinta. Transportadores de banda de material a granel: requisitos y prácticas recomendadas. (Spanish Edition). EUA. CEMA, N° 305-2019.
- [5] Researchgate Facultad de Ingeniería. Esquema de una cinta transportadora. https://www.researchgate.net/publication/263962649_Performance_Measures_for_Traffic_Signal_Systems_An_Outcome-Oriented_Approach, 2016.
- [6] Modelo de cinta transportadora acanalada para el procesamiento de mineral de carbón. https://www.freepik.es/fotos-premium/cinta-transportadora-procesamiento-mineral-carbon_43052208.htm.
- [7] Manual para Transportadores de Cinta. Rodillos de Carga y Retorno del Transportador de Banda de Material a Granel. (Spanish Edition). EUA. CEMA, N° 502-2019.
- [8] Carlos Parra. Métodos de Análisis de Criticidad y Jerarquización de Activos Industriales (Técnicas de Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad n° 6, Spanish Edition, 2012.
- [9] Grupo enova. Ingeniería de mantenimiento, análisis de criticidad, 2017. <https://enovalevante.es/ingenieria-de-mantenimiento-analisis-de-criticidad-parte-1/>.
- [10] Tips de tecnología. Pautas para crear semáforo indicador en Excel. 2020. <https://tipsdetecnologia.com/3-tips-para-crear-un-semaforo-en-excel>.



Argenis José Rodríguez Amaíz. Nació en Puerto Ordaz, Venezuela en 1981. Ingeniero Mecánico egresado de la UNEXPO Vice-Rectorado Puerto Ordaz (2006). Especialista en Gerencia de Mantenimiento, Post-Grado UNEXPO Vice-Rectorado Puerto Ordaz (2014). Auditor de Sistemas de Gestión de la Calidad (Bureau Veritas de Venezuela), Profesional del Área de Planificación de Mantenimiento e Inspección Técnica. (16 años de experiencia) en C.VG Ferrominera Orinoco.

Simulation of remote control of a hexacopter with force feedback in semi-structured environments

Natasha Guadalupe
<https://orcid.org/0009-0001-5913-4105>
natasha.guadalupe.ng@gmail.com
Departamento de Automatización y
Control Industrial,
Escuela Politécnica Nacional
Quito, Ecuador

Danilo Chávez*
<https://orcid.org/0000-0002-7529-9006>
danilo.chavez@epn.edu.ec
Departamento de Automatización y
Control Industrial,
Escuela Politécnica Nacional
Quito, Ecuador

*Correspondence: danilo.chavez@epn.edu.ec

Received (25/04/2023), Accepted (21/05/2024)

Abstract: This project simulates the flight of hexacopters in indoor environments. Through the design, modeling, and implementation of environments, it imitates semi-structured environments with static obstacles, including a house, a church, and a supermarket. Each environment displays different levels of difficulty. The application offers a choice between two models of hexacopters, achieving more useful and interactive, and it includes the option of force feedback, implemented with a force feedback joystick, warning the user about possible collisions, and giving the feeling of presence to the operator. The haptic device limits the force applied. The application focuses on three-dimensional scenes in semi-structured indoor environments, reproducing the environment variables (appearance, features, context) of a real system; in this sense, the implementation of the simulator is a low-cost technique that offers several possible scenarios without effects in the real world.

Keywords: hexacopters, haptic device, force feedback, simulation.

Simulación de control remoto de un hexacóptero con retroalimentación de fuerza en entornos semiestructurados

Resumen: Este proyecto simula el vuelo de hexacópteros en ambientes interiores. A través del diseño, modelado e implementación de entornos, imita entornos semiestructurados con obstáculos estáticos, incluyendo una casa, una iglesia y un supermercado. Cada entorno muestra diferentes niveles de dificultad. La aplicación ofrece la posibilidad de elegir entre dos modelos de hexacópteros, consiguiendo ser más útiles e interactivos, e incluye la opción de retroalimentación de fuerza, implementada con un joystick de retroalimentación de fuerza, advirtiendo al usuario sobre posibles colisiones, y dando la sensación de presencia al operador. El dispositivo háptico limita la fuerza aplicada. La aplicación se centra en escenas tridimensionales en ambientes interiores semiestructurados, reproduciendo las variables del entorno (aspecto, características, contexto) de un sistema real; En este sentido, la implementación del simulador es una técnica de bajo coste que ofrece varios escenarios posibles sin efectos en el mundo real.

Palabras clave: hexacópteros, dispositivo háptico, retroalimentación de fuerza, simulación

I. INTRODUCTION

The development of flight simulators is a solution to the education and training of students in various areas of engineering. The advantages of using a flight simulator as a facilitating tool for the experience acquisition are very high. The student can develop his capabilities since high-performance training stimulates the mental, physical, and psychological aspects. In this way, the simulation allows them to obtain skills for a proper flight, a realistic flight experience, and a high confidence level in the flight simulator. [1].

Computer simulation is often used to model systems for which analytical solutions cannot be found [2]. By simulating the teleoperation of a hexacopter, focused on applications of three-dimensional scenarios in internal semi-structured environments, reproducing the environment and its variables (appearance, features, context), constitutes a technique of low cost that offers several possible scenarios without effects in the real world.

We propose the Unity 3D video game engine utilization to simulate semi-structured environments with static obstacles, and two models of hexacopters. In addition, the application has the option to use the feedback force, which is carried out with the Microsoft SideWinder Force Feedback 2 Joystick haptic device; this controller limits the force feedback applied, allowing warn the user about possible collisions, and giving the feeling of presence to the operator. Finally, a series of tests are carried out to evaluate their performance. Initially, menus, scenarios, and maps are validated to continue with the behavior of the hexacopters during their flights, ending with user feedback on the handling of the Flight Simulator, which is done through a survey that complements the previous evaluations.

II. UNMANNED AERIAL VEHICLE

An unmanned aerial vehicle (UAV) is defined as an aircraft without a crew, which may be reusable and can maintain a level of controlled and sustained flight. This vehicle is powered by one or more engines [4].

Advances in UAVs have been significant so their applications increasing with time. One of the main reasons is that they can be used for tasks that involve some difficulty or danger to conventional vehicles crewed by people [5]. Also, UAVs acquire great importance in performing inspection, control, and sensing of high chemical toxicity tasks, thus reducing human exposure. Each of them would imply a high cost and risk to people, and loss of productivity without their use [6].

A. Hexacopter

A hexacopter is a type of UAV that consists of six rotors, arranged in four distinct configurations [7]. Among the main characteristics of this type of vehicle is good stability, due to the opposite direction of rotation of its propellers, which prevents it from rotating on its axis continuously due to the inertia of these. They also have a good time in flight concerning UAVs of the smallest number of rotors, since they can carry larger batteries and their motors work at fewer revolutions. Finally, it is important to emphasize their great power and load capacity [8]. The possible configurations of a hexacopter are: Cross (+), X, Y6, and H (Fig. 1).

"A hexacopter exhibits flight performance comparable to that of a helicopter. It maneuvers by rotating its propellers, which generate the necessary thrust for movement. Each engine can be controlled independently, allowing for various translations and rotations by adjusting the speed of each axis as needed. During a hexacopter's flight, several forces and torques are considered, including gravity, air friction, and the torque produced by the propellers." (Fig. 2) [9].

The simpler movement is the ascent and descent vertical of the aircraft, which is possible with the increase and decrease of the speed of the rotors of form equal and simultaneously [5].

The roll angle represents rotation around the 'x' axis, resulting in left or right movement, as shown in Figure 3a. To move left, the hexacopter decreases the thrust produced by the propellers on the left side while increasing the thrust from the propellers on the right side. Conversely, to move right, the hexacopter reduces the thrust from the propellers on the right side and simultaneously increases the thrust from the propellers on the left side.

The pitch angle represents the "z" axis rotation, and generates the movements back and forth of the aircraft, as shown in Fig. 3b. For forward movement, the hexacopter increases the thrust produced by the propellers on the back and diminishes the thrust produced by the front propellers.

Yaw angle represents a rotation around the axis 'y' and is generated by increasing the thrust produced by the propellers rotating in a clockwise direction, while decreasing the thrust produced by the propellers rotating counter-clockwise, as shown in Fig. 3c. And turn, the opposite direction is achieved by decreasing the thrust produced by the propellers rotating in a clockwise direction, while increases the thrust produced by the propellers rotating counter-clockwise.

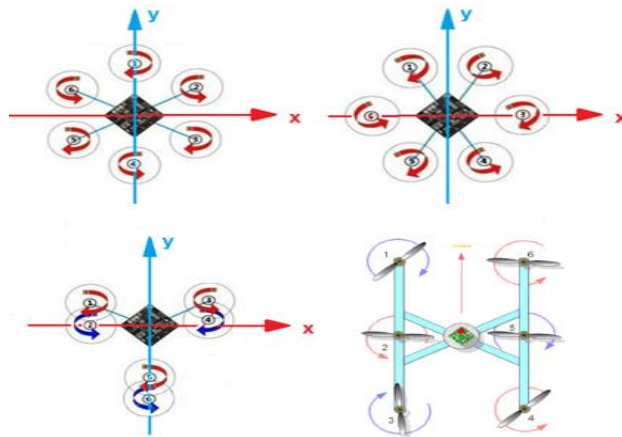


Fig 1. Configurations of a hexacopter: Cross (+), x (x), Y6, and H.

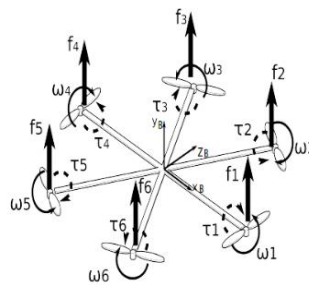


Fig. 2. Thrusts, torques, and angular velocities of a hexacopter [9].

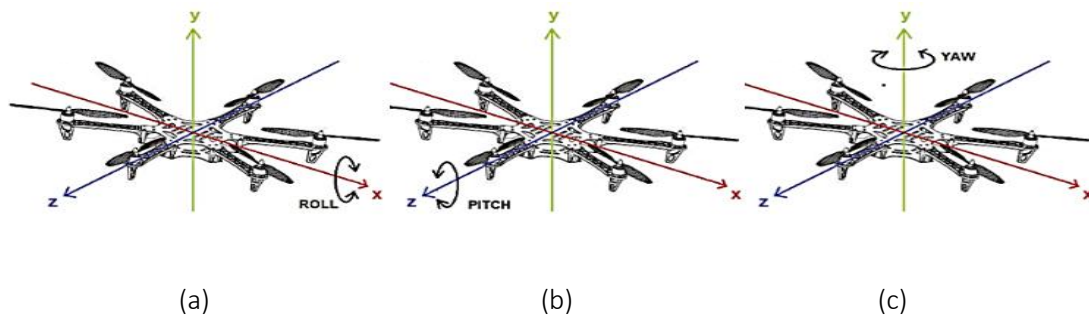


Fig. 3. Movements of rotation of a hexacopter: a) Roll, b) Pitch, c) Yaw

B. Human machine interface

The human-machine interface (HMI) can be understood as the point of action in which a man comes in contact with a machine [10]. The user can interact with reality, experiencing it and exploring it through different HMI options, such as the force feedback joystick and the keyboard. The last mentioned device is within the classification of haptic devices, since it involves the sense of touch, allowing one to enter a virtual world closer to a real environment, where there is a set of characteristics of objects such as elasticity, viscosity, adhesion, etc., which can be complemented by the force feedback [11].

C. Fictitious forces

Such forces explain the apparent acceleration of a body seen from a non-inertial reference system [12]. One of the objectives pursued by the project is the evasion of static obstacles in semi-structured environments, which proposes the creation of fictitious forces when the aircraft identifies an obstacle between the next two elements: the hexacopter and the obstacle.

The use of fictitious forces is a simple and efficient method, these forces are arranged in such a way that cover the aircraft environment and play the role of repelling any obstacle found in its field, increasing this repulsion always decreases the distance between the two objects. The diameter of the environment of the aircraft is defined considering the dimensions of the hexacopters and the environments, according to the criteria of the author, a length of three times the diameter of the hexacopters, for the evasion of obstacles.

Fig. 4 observes the scheme of evasion of obstacles, where d is the distance in which begins repulsion of the hexacopter towards the obstacle is found, and F is the fictitious force that will be sent as feedback towards the haptic device, delivering the information of change of address to the user. The algorithm for the calculation of this force depends on the magnitude of the distance.

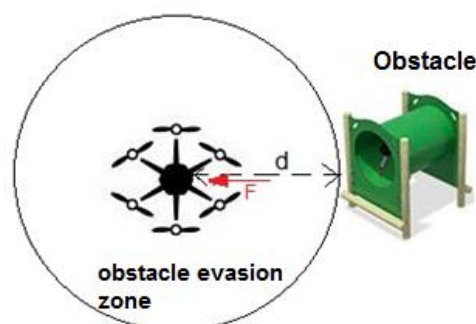


Fig. 4. Scheme of evasion of obstacles

III. HEXACOPTER MODEL

To obtain the dynamic model based on equations that describe the position and orientation of the hexacopters is assumed that each aircraft is a rigid body in space, subject to a main force, which corresponds to the thrust, and three moments, that will generate the movements of the vehicle [13]. This behavior is controlled by adjusting the angular speed of the rotors spinning through electric motors [14]; and the fixed Center of mass and the origin of the coordinate system are considered coincidental, assuming that the structure of the hexacopter is symmetric [13].

To describe the movement of the hexacopter we will need two systems of reference [14]: the earth system and the body system. The Earth system is seen as inertial, which is defined as the absolute linear position of the hexacopter (x, y, z). The body system uses the coordinates of North, East, and South. The origin of this reference system is fixed at a point on the Earth's surface, and the axes are directed in the following way: x - North - and eastward and z - downward. The angular position of the body concerning the inertial system is defined using Euler angles: roll, pitch, and yaw. It is necessary to find the transformations of the body to the inertial system, which is relied on to use the rotation matrix, starting with the rotations around the axes [13].

By rotating each of the angles roll, pitch, and yaw, it gets the matrix of rotation R (1) for the transformation of the system, inertial or fixed to the body, which is an orthogonal system.

$$R(\phi)R(\theta)R(\psi) = \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\psi & \cos\psi\sin\theta\sin\phi - \cos\phi\sin\psi & \cos\phi\cos\psi\sin\theta + \sin\phi\sin\psi \\ \cos\theta\sin\psi & \cos\phi\cos\psi + \sin\theta\sin\phi\sin\psi & \cos\phi\sin\theta\sin\psi - \cos\psi\sin\phi \\ -\sin\theta & \cos\theta\sin\phi & \cos\theta\cos\phi \end{bmatrix} \quad (1)$$

A. Kinematic Model [15]

Taking into account the motion of a rigid body decomposed into translation and rotation, and that the equations governing these movements are the Newton – Euler, that is expressed as a function of the linear speed of each axis of translation, V_x , V_y , and V_z are the entries of the system and the speeds of the aircraft \dot{x}_b , \dot{y}_b and \dot{z}_b .

With the defined model, the rotation matrix (1) is used as a link between the Centre of mass reference system and the fixed ground system.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_E \\ \dot{y}_E \\ \dot{z}_E \end{bmatrix} = R(\phi, \theta, \psi) \begin{bmatrix} \dot{x}_B \\ \dot{y}_B \\ \dot{z}_B \end{bmatrix} \quad (2)$$

Replacing (1) in (2) gets complete kinematic models depending on angles ϕ , θ and ψ .

It can be reduced through approximations of small angles, which is convenient in the simplification of the trigonometrical laws, and presents an acceptable accuracy when the angle tends to zero, assuming $\theta \rightarrow 0$ and $\phi \rightarrow 0$, it has $\cos\phi \cong 1$, $\cos\theta \cong 1$ and $\sin\phi \cong 0$, $\sin\theta \cong 0$, obtaining:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_E \\ \dot{y}_E \\ \dot{z}_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

B. Dynamic Model

A dynamic model is applied to the scheme of the hexacopter of Fig. 5 and it is performed employing Euler-Lagrange equations and Newton's laws [16]. The hexacopter has twelve States, which are [16]:

$$X = [x, \dot{x}, y, \dot{y}, z, \dot{z}, \phi, \dot{\phi}, \theta, \dot{\theta}, \psi, \dot{\psi}] \quad (4)$$

Where x , y and z are the positions in the X, Y, Z axes; \dot{x} , \dot{y} \dot{z} are the speed in the axes. ϕ, θ, ψ are the roll, pitch and yaw euler angles, respectively; $\dot{\phi}, \dot{\theta}$ and $\dot{\psi}$ are the speed in the angles.

Euler Lagrange [15]

The Lagrangian is the sum of translational and rotational energy less the potential energy, defined by:

$$L(q, \dot{q}) = E_{C_{tras}} + E_{C_{rot}} - Ep \quad (5)$$

Where $E_{C_{tras}}$ is the kinetic energy of translation, $E_{C_{rot}}$ is the kinetic energy of rotation, and Ep is the energy potential of the hexacopter.

$$\begin{bmatrix} F_\xi \\ \tau_\eta \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial q_i} \quad (6)$$

Where F_ξ is the translational force applied to the hexacopter, and τ_η are the moments of roll, pitch and yaw. For the translational dynamic of the vehicle, the Euler-Lagrange equation is:

$$F_\xi = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L(\xi, \dot{\xi})}{\partial \dot{\xi}} \right) - \frac{\partial L(\xi, \dot{\xi})}{\partial \xi} \quad (7)$$

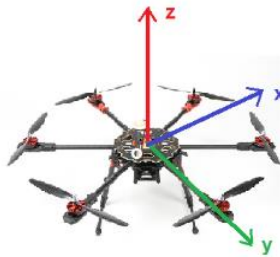


Fig. 5. The hexacopter scheme

Developing:

Where $E_z = [0 \ 0 \ 1]^T$, from Fig. 6 with the reference in (O), the system is $\hat{F} = [0, 0, U_1]$. U_1 signal is the total thrust of the rotors. If $F_\xi = R(\phi, \theta, \psi) \hat{F}$, and replacing \hat{F} :

$$F_{\xi} = m\ddot{x} + m\ddot{y} + m\ddot{z} - mg = m\ddot{\xi} - mgE_z \quad (8)$$

$$F_{\xi} = \begin{bmatrix} \cos(\psi) \operatorname{sen}(\theta) \cos(\phi) + \operatorname{sen}(\psi) \operatorname{sen}(\phi) \\ \operatorname{sen}(\psi) \operatorname{sen}(\theta) \cos(\phi) - \operatorname{sen}(\phi) \cos(\psi) \\ \cos(\theta) \cos(\phi) \end{bmatrix} \quad (9)$$

From where is gets the translational dynamic model, that is observed in the equations (16), (17) y (18).

For the rotational dynamic, the equation is:

$$\tau_{\eta} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial LRot}{\partial \dot{\eta}} \right) - \frac{\partial LRot}{\partial \eta} \quad (10)$$

Through the vector of angular speed and the matrix of inertia, is developed the equation and is derived each one of the terms, posing as the point of operation around the point of balance to $\phi = 0$, $\theta = 0$ and $\psi = 0$, i.e. $\cos\phi \cong 1$, $\cos\theta \cong 1$ and $\cos\psi \cong 1$ and $\operatorname{sen}\phi \cong 0$, $\operatorname{sen}\theta \cong 0$ and $\operatorname{sen}\psi \cong 0$, where is the stabilization of the system.

Therefore, the generalized moments can be expressed roll, pitch, and yaw with τ_{ϕ} , τ_{θ} and τ_{ψ} , respectively:

$$\tau_{\phi} = I_x(\ddot{\phi}) - \dot{\psi}\dot{\theta}(I_y - I_z) \quad (11)$$

$$\tau_{\theta} = I_y(\ddot{\theta}) - \dot{\psi}\dot{\phi}(I_z - I_x) \quad (12)$$

$$\tau_{\psi} = I_z(\ddot{\psi}) - \dot{\theta}\dot{\phi}(I_x - I_y) \quad (13)$$

Where I_x , I_y and I_z is the inertia of the hexacopter in X , Y and Z , respectively.

For roll, pitch, and yaw of the hexacopter movements, each rotor changes its direction of rotation and speed, such movements should be carried out with the main force constant. The rotation of the propellers produces a gyroscope effect [15]:

$$\tau_{gyroscope} = \begin{bmatrix} -J_r \dot{\theta} \omega \\ -J_r \dot{\phi} \omega \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Where J_r is the rotational inertia of the propellers and ω is the speed total of the propellers [16]:

$$\omega = -\omega_1 + \omega_2 - \omega_3 + \omega_4 - \omega_5 + \omega_6 \quad (15)$$

Where ω_1 , ω_2 , ω_3 , ω_4 , ω_5 , ω_6 are the angular velocities of each rotor.

Adding this effect, the rotational dynamic model is obtained [16] and shown in equations (19), (20) y (21). Finally, the complete dynamic model of the hexacopter is [16]:

$$\ddot{x} = (\cos\phi \sin\theta \cos\psi + \sin\phi \sin\psi) \frac{1}{m} U_1 \quad (16)$$

$$\ddot{y} = (\cos\phi \sin\theta \sin\psi - \sin\phi \cos\psi) \frac{1}{m} U_1 \quad (17)$$

$$\ddot{z} = -g + (\cos\phi \cos\theta) \frac{1}{m} U_1 \quad (18)$$

$$\ddot{\phi} = \dot{\theta}\dot{\psi} \left(\frac{I_y - I_z}{I_x} \right) - \frac{J_r}{I_x} \dot{\theta} \omega + \frac{1}{I_x} U_2 \quad (19)$$

$$\ddot{\theta} = \dot{\phi}\dot{\psi} \left(\frac{I_z - I_x}{I_y} \right) - \frac{J_r}{I_y} \dot{\phi} \omega + \frac{1}{I_y} U_3 \quad (20)$$

$$\ddot{\psi} = \dot{\phi}\dot{\theta} \left(\frac{I_x - I_y}{I_z} \right) + \frac{1}{I_z} U_4 \quad (21)$$

Where b is the drag factor and l is the distance between the rotor and the center of the hexacopter.

The parameters of the dynamic model developed for the implementation of the model of the hexacopters, according to [16], are presented in Table 1.

The engine for the development of the model is Tarot 4006; according to specifications and features, they are specifically designed for aircraft with multiple rotors.

IV. RESULTS

For the development of environments and 3D models of the Simulator, we have used programs such as Sweet Home 3D, SketchUp, and Blender 3D. Likewise, to integrate them and implement the Flight Simulator, we have used the Unity 3D game engine, and through Visual Studio software implemented the dynamic model of aircraft, and also the feedback of force, which is made possible through the use of the package of Force Feedback Controller. The simulation is possible through a Force Feedback Joystick, or directly from the computer keyboard.

For the calculation of the force that appears in the joystick as opposed to the movement exerted by the user, when the aircraft is near an obstacle, taking into account the distance between the two objects, the method chosen is the creation of fictitious forces around the hexacopter, creating a zone of repulsion to the obstacles that are at the distance set in the programming, according to the dimensions of the aircraft.

Directions that take the fictitious forces that the user perceives through the controller are established through the integration of eight spokes around the hexacopter, of which four are located in the positive and negative X and Y axis and the other four correspond to the velocity, as shown in Fig. 6a. It is important to understand how is related to the strength of feedback the distance between the hexacopter and the obstacle; if the hexacopter is closer to a static object, i.e., whenever the distance is less, this force will increase.

With this preamble, it can be concluded that the strength of feedback must be inversely proportional to the distance. So it has been established a correspondence between both parameters.

$$F = 87 * \frac{1}{2 + \log\left(\frac{d}{3}\right)} \quad (22)$$

Where F is the force feedback that appears on the joystick and d is the distance between the hexacopter and the obstacle.

The algorithm implements the technique of fictitious forces raised previously, and is executed by the Flight Simulator, which is responsible for measuring the distance between the hexacopter and the obstacle found, and performs the calculation of the force on each iteration, fulfilling this way the purpose of increasing the value of the force as it decreases the distance. The magnitude of the force calculated is limited to the range [57.1, 35.1], a value dependent on the distance that lies in the interval [1, 9], considering that were designed hexacopters with a measure of 3 units.

The proposed algorithm is developed taking into account the force allowed in the haptic device, values ranging from 0 to 100, and that the user should perceive a force that advises the nearness of objects, but that doesn't force to change the address. To have an idea of the dimensions of the hexacopters, and distances in the environment generated by the simulator of flight, is important to understand the units of these dimensions. This value is multiplied by 10, and thus, an equivalent value in centimeters, such that the Simulator has hexacopters of 30 cm in diameter and a zone of evasion of the obstacle of 90 cm in diameter.

The address that is assigned to the force that is applied to the driver, when an obstacle is detected near the hexacopter, is distinguished in Fig. 6b. The simulator applies one force at the same time, to optimize the step of the aircraft by places narrow as doors or corridors.

To assess the proper functioning of the application, the elements of the Simulator and the behavior of the hexacopters during its flight are validated, with obtaining feedback from users about the management of the application, through a survey that complements the assessments conducted.

Table 1. Model parameters [16]

Name	Description	Value	Unit
m	Mass	1.83	kg
b	Drag factor	2.98e-6	Ns ²
l	Length of center of mass to the rotor	0.30	m
g	Gravity	9.8	m/s ²
J_r	Rotational inertia	3.357e-5	kgm ²
I_x, I_y	x, y inertia	0.0216	kgm ²
I_z	Z inertia	0.0432	kgm ²

To obtain feedback from the user regarding the operation of the Flight Simulator, we have conducted a survey that complements the evaluations, and checks the fulfillment of objectives:

- Assess the degree of difficulty presenting the teleoperation learning of hexacopters.
- Determine which driver gives the user more comfort during flight maneuvers.
- Assess the simplicity and consistency of the interface, and check if its interactivity has an impact on the user.
- Check if the assigned tasks are reached by users.
- Consider whether the force feedback system implemented helps to warn of possible collisions.
- Estimate the viewer that provides every type of camera, and establish what is more beneficial to the user.

The sample size was 20 users, and 100% of the force feedback Joystick helped it to avoid possible collisions, as well as provided an effect of reality, showing the importance of the presence of this feature in Flight Simulator.

CONCLUSIONS

The Flight Simulator, which has three rooms with different levels of difficulty, semi-structured, was able to simulate the (remote) teleoperation of two models of hexacopters, with the force feedback feature. Additionally, the analysis of the dynamic model of the hexacopters allows the study and understanding of their behavior.

The development and implementation were possible due to the control algorithm for the calculation of the force that appears in the joystick, which is opposed to the movement exerted by the user when the aircraft is near an obstacle. Establishing this force should be inversely proportional to the distance of the hexacopter with the static obstacle.

The range of feedback that is perceived in the Force Feedback Joystick, was selected in such a way that notes the proximity of a static obstacle, without forcing the change of direction, allowing this action to be an exclusive decision of the user.

The simulator gives the user a sense of presence, through the use of a haptic device, offering an application that warns about possible collisions of the hexacopters with static obstacles.

The development of a simple, intuitive, and friendly interface to the users, allowed offer a simulator of flight that allows navigation by the application without difficulty, that offers the information, and helps timely.

ACKNOWLEDGMENT

Dr Aguilar has been partially supported by the Prometeo Project of the Ministry of Higher Education, Science, Technology and Innovation of Ecuador.

REFERENCES

- [1] E. Mercado, "Los simuladores de vuelo: su importancia," Mayo 2013. [En línea]. Available: <http://aerowiki-info.blogspot.com/2013/05/los-simuladores-de-vuelo-su-importancia.html>.
- [2] Clínica virtual, "Simulador del cuerpo humano en 3D en MSN," 7 julio 2015. [En línea]. Available: <http://clinicavirtual.weebly.com/noticias-medicas/simulador-del-cuerpo-humano-en-3d-en-msn>.
- [3] Aplicaciones y Operación con Drones/RPAS, "Origen y desarrollo de los drones," 9 Julio 2015. [En línea]. Available: <http://drones.uv.es/origen-y-desarrollo-de-los-drones/>.
- [4] Grupo de aviación de caza, "Drones," Julio 2015. [En línea]. Available: http://www.simbolicodecaza.org/index.php?option=com_content&view=article&id=124:drones&catid=52:articulos-profesionales-lunes&Itemid=194.
- [5] A. Bachfischer, "Diseño, construcción y prueba de vehículo aéreo no tripulado," Julio 2014. [En línea]. Available: <http://ricabib.cab.cnea.gov.ar/477/1/1Bachfischer.pdf>.
- [6] Asociación de Robótica, "Introducción a los UAVs," Febrero 2014. [En línea]. Available: http://asrob.uc3m.es/index.php/Introducci%C3%B3n_a_los_UAVs.
- [7] HelicamPeru, "Hexacopter," 2011. [En línea]. Available: <http://helicamperu.com/hexacopter>.
- [8] A. López, "Elección del multicoptero," Septiembre 2011. [En línea]. Available: <http://diebotreise.blogspot.de/2011/09/eleccion-del-multicoptero.html>.
- [9] T. Magnusson, "Attitude Control of a Hexarotor," 2014. [En línea]. Available: <http://liu.diva-portal.org/smash/get/diva2:736152/FULLTEXT01.pdf>.
- [10] Copadata, "Interfaz hombre-máquina (HMI)," 2015. [En línea]. Available: <http://www.copadata.com/es/productos/product-features/interfaz-hombre-maquina-hmi.html>.
- [11] L. Barrios y I. Galeano, "Interfaces hombre-máquina," 2014. [En línea]. Available: <http://jeuazarru.com/wp-content/uploads/2014/10/HMI.pdf>.
- [12] G-Blender, "Uso de texturas en Blender II UV," Agosto 2014. [En línea]. Available: <http://www.g-blender.org/uso-de-texturas-en-blender-ii-uv>.
- [13] P. Rodriguez, "Memoria," 2014. [En línea]. Available: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/90168/fichero/Memoria.pdf>.
- [14] P. Dávila y J. Orna, "Diseño, construcción y control de un hexacóptero de monitoreo," Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2015.
- [15] V. Espinosa y V. Moya, "Diseño y simulación de un algoritmo de control robusto para formación de cuadricópteros," Quito, Ecuador, 2016.
- [16] H. Nabil, "Dynamic Modeling and Control of a Quadrotor Using Linear and Nonlinear Approaches," Cairo: The American University in Cairo, 2014.
- [17] A. Cerón y P. Bedoya, "Manual Básico De Unity 3d Como Apoyo Al Desarrollo Turístico Nacional," Pereira, Universidad Tecnológica de Pereira, 2014.
- [18] Unity 3D, "Force feedback controller toolkit," Agosto 2012. [En línea]. Available: <http://forum.unity3d.com/threads/force-feedback-controller-toolkit.159297/>.
- [19] ConfigurarEquipos, "Configuración de equipos," Junio 2007. [En línea]. Available: <http://www.configurarequipos.com/doc532.html>.

THE AUTHORS***Natasha Guadalupe***

Born on 29 January 1991 in the city of Quito, Ecuador. Finish their secondary studies in the "Espejo" women's Experimental College. Currently pursuing their studies in the Escuela Politécnica Nacional, in electronics and Control Engineering.

Danilo Chávez

Born on 1 April 1977 in Quito, Ecuador. Ended his secondary education at "Juan Pío Montúfar", and graduated engineer in electronics and Control at the National Polytechnic School in 2001. He currently works at the Faculty of Electrical and Electronic Engineering.

Analysis of the integration of solar PV in buildings: design, implementation, and environmental benefits

César Geovanny Quilumbaqui*
<https://orcid.org/0009-0001-0706-8505>
cesar.quilumbaqui@gmail.com
QC project & consulting services
Quito-Ecuador

*Correspondence: cesar.quilumbaqui@gmail.com

Received (03/05/2023), Accepted (30/05/2024)

Abstract: In a world where the climate crisis and the need to reduce dependence on fossil fuels are becoming increasingly pressing, integrating solar PV in buildings is presented as a viable and sustainable solution. This work focuses on a detailed analysis of how solar PV can be designed, implemented, and maximized in urban environments. It explores the technical aspects of PV system design, the crucial steps in their implementation, and the significant environmental benefits that can be derived from their widespread use. The main results show that as cities grow and energy demand increases, the transition to renewable energy sources is not only an attractive option but a prevailing necessity to ensure a sustainable future.

Keywords: environmental impact, renewable energy, photovoltaic systems.

Análisis de la integración de energía solar fotovoltaica en edificios: diseño, implementación y beneficios medioambientales

Resumen: En un mundo donde la crisis climática y la necesidad de reducir la dependencia de los combustibles fósiles son cada vez más apremiantes, la integración de la energía solar fotovoltaica en los edificios se presenta como una solución viable y sostenible. Este trabajo se centra en el análisis detallado de cómo se puede diseñar, implementar y maximizar los beneficios de la energía solar fotovoltaica en entornos urbanos. Se exploran los aspectos técnicos del diseño de sistemas fotovoltaicos, los pasos cruciales en su implementación, y los significativos beneficios medioambientales que pueden derivarse de su uso generalizado. Los principales resultados muestran que a medida que las ciudades crecen y la demanda energética aumenta, la transición hacia fuentes de energía renovable no solo es una opción atractiva, sino una necesidad imperante para garantizar un futuro sostenible.

Palabras clave: impacto ambiental, energía renovable, sistemas fotovoltaicos.

I. INTRODUCTION

Over the past two decades, solar PV has experienced exponential growth in many developed countries, leading an energy revolution that seeks to reduce dependence on fossil fuels and mitigate climate change. Countries such as Germany, Japan, and the United States have invested heavily in solar technologies, managing not only to diversify their energy sources but also to stimulate the green economy and create thousands of jobs [1]. In these countries, favorable government policies, such as tax incentives and subsidies, have played a crucial role in accelerating the adoption of PV systems at both the residential and industrial levels. This commitment has enabled ambitious emission reduction targets and placed solar energy at the heart of the global energy transition.

Despite its many advantages, the implementation of solar photovoltaic systems is not without its difficulties. In developed countries, the main obstacles are the intermittency of solar energy and the need for efficient energy storage infrastructures. However, important technological advances are helping to overcome these challenges [2]. The development of more efficient and affordable battery storage and smart grids capable of managing power distribution more effectively is transforming the energy landscape. In addition, the continued reduction in the cost of solar panels and their increased efficiency have made solar energy an increasingly competitive option over traditional energy sources.

A. *Environmental and Economic Impact of Solar Energy*

The adoption of solar PV has a noticeable positive impact on the environment and the economy. As a clean energy source, its use contributes significantly to greenhouse gas emissions reduction, which is crucial to combat climate change. In addition, solar energy does not generate air pollution or noise, which improves the quality of life in densely populated urban areas. Economically, the solar energy expansion has created new markets and job opportunities in the renewable energy industry. The construction, installation, and maintenance of photovoltaic systems require a specialized workforce, thus promoting skills development and job creation in various regions [3].

B. *Reality of Photovoltaic Solar Energy in Latin America*

In Latin America, the adoption of solar PV is in a growth phase, although it faces challenges specific to the region. Countries such as Chile, Mexico, and Brazil have made significant strides in integrating solar energy into their energy matrix, thanks to their abundant solar radiation and increasingly favorable energy policies [4]. However, in other countries in the region, the lack of adequate infrastructure, financing, and clear policies slows the progress of solar projects. The variability of regulatory frameworks and dependence on more traditional energy sources also represent significant barriers. Despite these challenges, solar energy has great potential in Latin America due to its favorable weather conditions and growing demand for energy.

C. *Prospects for Solar Energy in Latin America*

The future of solar PV in Latin America is promising, with several trends indicating sustained growth in the coming years. International investments and financing programs for renewable energy projects are increasing, making it easier to deploy more solar systems. In addition, the development of more efficient technologies and the reduction of solar panel costs are making solar energy a more viable option for more consumers, including households and small businesses [5]. With a continued focus on creating favorable regulatory frameworks and promoting infrastructure investment, Latin America is uniquely positioned to take advantage of its solar potential and lead the energy transition in the southern hemisphere [6].

Building on this foundation, this paper presents a documentary analysis of the design, implementation, and benefits of solar photovoltaic (PV) systems in urban environments. It delves into the technical aspects of PV system design, outlines the critical steps for implementation, and highlights the substantial environmental advantages that can be gained from their widespread adoption.

II. DEVELOPMENT

Photovoltaic systems convert sunlight directly into electricity using the photovoltaic effect. This effect occurs in semiconductor materials, such as silicon, which are capable of absorbing photons of light and releasing electrons, thus generating an electric current. The main components of a photovoltaic system are:

Solar panels: Made up of photovoltaic cells that capture sunlight and convert it into direct current (DC) [7].
Inverter: Converts direct current generated by panels into alternating current (AC) which is the form of electricity used by most electrical devices and power distribution systems.

Batteries (optional): They store excess energy generated for later use especially useful in off-grid systems.
Charge controller: Regulates the energy flow between the solar panels, batteries, and inverter to prevent overcharging and optimize system performance.

A. Relevance in Sustainable Architecture

Carbon Footprint Reduction: Photovoltaic systems produce electricity without greenhouse gas emissions, contributing to the carbon footprint reduction of buildings [8].

Energy Efficiency: Incorporating photovoltaic systems into architectural design improves the energy efficiency of buildings, reducing dependence on non-renewable energy sources.

Energy Autonomy: Buildings equipped with photovoltaic systems can generate their energy, increasing their autonomy and reducing energy costs in the long term.

Flexibility and Adaptability: Photovoltaic systems can be integrated in some ways into architecture, whether as panels on roofs, facades, or even as architectural elements, such as solar blinds.

Added Value: The solar incorporation technology can increase the value of properties and comply with sustainable construction regulations and certifications, such as LEED or BREEAM.

B. Design strategies for integrating solar panels into new and existing buildings, considering aesthetic and functional aspects.

Integrating solar panels into buildings, whether new or existing, requires careful consideration of aesthetic and functional aspects to maximize energy efficiency and architectural aesthetics [9]. This challenge involves design strategies that harmonize the functionality of solar panels with the aesthetics of the built environment.

For new buildings solar panels could integrate during the initial architectural design phase. This involves selecting materials and arranging the panels to complement the overall design of the building. For example, panels can be seamlessly incorporated into flat or pitched roofs, making them visually unobtrusive or creating aesthetic highlights. They can be used as sunroofs or translucent facades, harnessing sunlight while enhancing the building's appearance. [10].

For existing buildings, the integration of solar panels can be more challenging due to pre-existing structural and aesthetic limitations [5], [8], [9]. However, several strategies can be applied. A common option is to install panels on existing ceilings without significantly modifying the exterior appearance of the building. In addition, window-integrated solar panels, such as photovoltaic glazing, can be used to transform glazed surfaces into energy generators without compromising the visibility and aesthetics of the building.

It is also crucial to consider the optimal orientation and tilt of the solar panels to maximize sunlight collection throughout the day and year. This requires a detailed analysis of the building's geographic location and an assessment of potential shading that could affect the panels' efficiency.

In addition to energy efficiency, the aesthetic integration of solar panels can enhance the perception of the building as an example of sustainable and environmentally committed design. The harmonious integration of functionality and aesthetics, in the design of solar panels, not only reduces energy consumption and carbon emissions but also enhances the architectural appearance and economic value of the building.

Design strategies for integrating solar panels into new and existing buildings must address both functional aspects, related to energy efficiency, and aesthetic aspects, which impact the visual perception of the built environment. Effective integration of solar energy in buildings optimizes energy use, enhances architectural aesthetics, and reinforces the commitment to sustainability in contemporary urban design.

C. An analysis of how solar energy reduces the carbon footprint of buildings and contributes to reducing greenhouse gas emissions, favoring energy independence.

Solar energy plays a crucial role in reducing the carbon footprint of buildings, significantly lowering greenhouse gas emissions, and notably promoting energy independence.

On one hand, integrating solar photovoltaic (PV) systems in buildings enables the clean and renewable generation of electricity directly from the sun [10]. This drastically reduces the reliance on conventional energy sources, such as fossil fuels, which are major contributors to carbon dioxide (CO₂) emissions and other polluting gases. By reducing dependence on these traditional energy sources, solar PV systems directly contribute to climate change mitigation by reducing greenhouse gas emissions. In addition, installing solar panels on buildings enables the generation of clean electricity and reduces the need to transport energy from generating plants through the power grid. This helps to minimize energy losses that occur during transmission and distribution, thereby improving the overall efficiency of the energy system and further reducing emissions associated with energy production and transportation.

In terms of energy independence, solar systems enable buildings to generate some or even all of the energy they consume, depending on the size of the system and the building's energy consumption. This provides greater autonomy in the face of fluctuations in energy prices and improves resilience to power outages [9]. Especially in remote areas or in emergencies, the ability to produce electricity locally from solar energy can be crucial to maintaining vital operations and ensuring the well-being of communities. Incorporating solar energy into buildings provides an environmentally sustainable solution by reducing the carbon footprint and greenhouse gas emissions, besides enhancing the energy independence of structures and communities. This approach is crucial for meeting global sustainability goals and offers tangible local benefits by promoting more efficient, resilient, and autonomous energy systems.

III. METHODOLOGY

In this work, some works related to sustainable architecture were analyzed, to know the implementation and benefits of photovoltaic solar energy in urban environments. In addition, the technical aspects of PV system design, the crucial steps in their implementation, and the significant environmental benefits that can be derived from their widespread use are explored.

Table 1. Main studies developed.

Study/Research	Description	Results/Conclusions
"Integration of Photovoltaics in Urban Buildings: A Review" [11]	Review of the integration of solar panels in urban buildings.	It highlights the importance of aesthetic and functional integration besides the benefits of reducing emissions and energy efficiency.
"Energy Performance of Photovoltaic Systems in Urban Areas" [12]	Study of the energy performance of photovoltaic systems in urban areas.	It concludes that photovoltaic systems can significantly reduce the carbon footprint and improve the energy efficiency of urban buildings.
"Urban Solar Potential: The Case for Vehicle Integrated Photovoltaics" [13]	Evaluation of the urban solar potential of a specific city.	It identifies priority areas for the installation of solar systems and quantifies the economic and environmental benefits of their implementation.
" Impact of urban morphology on urban microclimate and building energy loads " [14]	Analysis of the impact of PV integration in urban microclimates.	It highlights how PV implementation can mitigate the urban heat island effect and improve air quality in densely populated urban areas.
" Cost-benefit analysis of hybrid photovoltaic/thermal collectors in a nearly zero-energy building " [15]	Cost-benefit analysis of PV systems in urban buildings.	It demonstrates that the long-term benefits of solar outweigh the installation costs, especially with favorable incentives and policies.

In addition, it was noted that the main countries working on sustainable architecture are those shown in Figure 1.

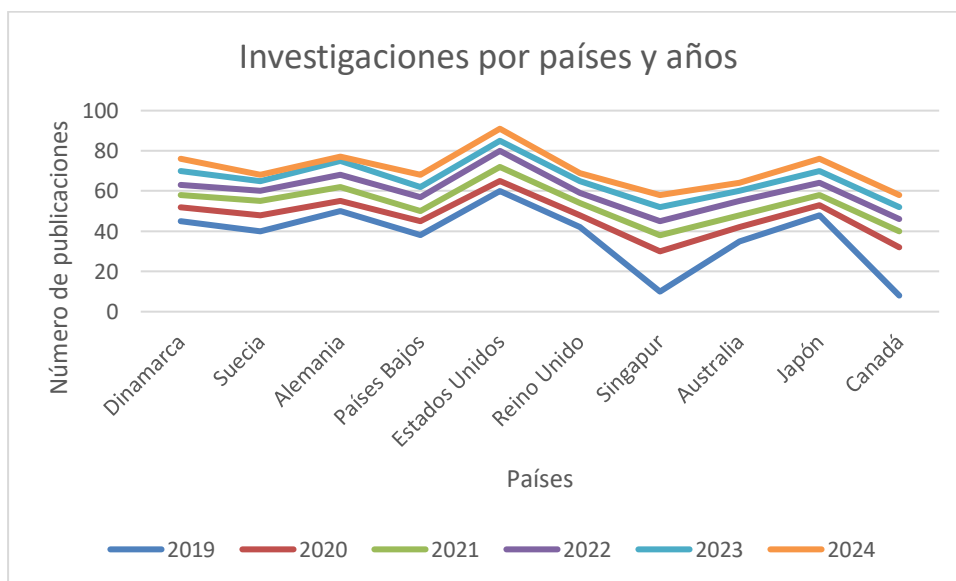


Fig. 1. Main countries that have researched sustainable architecture in recent years.

Major countries that have been actively researching the topic of sustainable architecture in recent years usually include the United States with numerous academic institutions and research centers dedicated to the study of sustainability in architecture, especially in areas such as energy efficiency and green design. Germany, renowned for its leadership in green technologies and environmental policies, Germany has conducted significant research in renewable energy applied to sustainable architecture. In addition, China due to its rapid urban growth and growing concern about environmental pollution, China has invested significantly in research on sustainable architecture and renewable energy solutions. But also, to the Netherlands, known for its focus on sustainable urban planning and green building design, the Netherlands has been a leader in implementing sustainable architectural practices. And finally, one can include the United Kingdom with important research centers and government policies that promote sustainability in the construction and design of buildings, the United Kingdom has also contributed significantly to the field of sustainable architecture.

IV. RESULTS

The review carried out allowed us to know the main methodologies used in the construction of buildings with photovoltaic solar systems, table 2 shows these findings and describes the main characteristics associated with each of them.

Table 2. Main methodologies used in the construction of buildings with photovoltaic technology.

Methodology	Design	Implementation	Environmental Benefits
Photovoltaic Integration in Buildings (BIPV)	Design of solar panels integrated into the structure of the building, such as facades, roofs, and windows.	Installation of photovoltaic modules as part of the construction material. Integration into roofs and facades.	Carbon footprint reduction. Space savings. Improvement of the building's energy efficiency.
Off-Grid Photovoltaic Systems	Design of autonomous systems to supply energy to buildings in remote or off-grid areas.	Installation of solar panels, batteries, and control systems to manage energy.	Reduction of dependence on fossil fuels. Provision of clean energy in isolated areas.
Solar Microgrids	Design of local power grids using solar energy as the principal generation source.	Solar panels implementation, inverters, storage systems, and distributed energy management.	Reduction of CO2 emissions. Improvement of energy resilience. Promotion of local energy self-sufficiency.
Hybrid Photovoltaic Systems	Solar energy integration with other renewable sources, such as wind or biomass.	Installation and coordination of multiple renewable energy sources.	Optimization of the use of renewable resources. Emission reduction. Improved energy stability and reliability.
Zero Energy Buildings (ZEB)	Design so that the building produces as much energy as it consumes annually.	Extensive use of solar panels, energy efficiency systems, and energy storage.	Reduction of net building carbon emissions to zero. Significant savings in energy costs in the long term.
Passive Solar Design	Incorporation of architectural elements that maximize the use of sunlight and thermal efficiency.	Use of materials and construction techniques that optimize the capture and retention of solar energy.	Reduced energy consumption for heating and cooling. Improved thermal comfort and indoor environmental quality.

On the other hand, fig. 2 presents the main elements necessary for residential construction. It is observed that a residential photovoltaic system is composed of several key elements that work together to convert solar energy into usable electricity for the house. These items include solar panels, an inverter, battery storage, an electric meter, a connection to the supply grid, and a home electrical panel.

Solar Panels: Solar panels are the main component of a photovoltaic system. They are usually installed on the roof of the building to maximize exposure to sunlight. These panels are composed of photovoltaic cells that convert sunlight directly into electricity through the photovoltaic effect. The electricity generated by solar panels is in the form of direct current (DC).

Inverter: The electricity generated by the solar panels needs to be converted from direct current (DC) to alternating current (AC), the form of electricity used by most household appliances and electrical systems. The inverter performs this conversion, allowing the solar power generated to be compatible with the home's electrical system and the utility grid.

Battery Storage: A battery storage system allows the excess electricity generated by solar panels to be stored for later use. This is especially useful at night or on cloudy days when solar generation is low. Batteries ensure the house has a steady supply of renewable energy, reducing reliance on the supply grid and increasing energy self-sufficiency.

Electric meter: The electric meter monitors and records the amount of electricity generated by the PV system and the amount of electricity consumed by the house. In many systems, this meter also allows for net metering, a process in which excess electricity generated is returned to the grid, and the household receives credit for this energy.

Grid connection: The grid connection allows the PV system to interact with the public power grid. This is important for balancing the demand and generation of electricity. When the solar system produces excess electricity beyond the house's consumption needs, it is fed back into the grid. Conversely, if the home requires more electricity than the solar system can generate, it draws a shortfall from the grid.

House Electrical Panel: The electrical panel in the home distributes electricity to the various circuits and appliances in the house. It receives electricity from the inverter and, if necessary, from the supply network. The electrical panel serves as the hub of the home's electrical system, ensuring efficient and safe utilization of the generated solar energy.

These components set up a residential photovoltaic system that supplies clean, renewable energy while improving house energy efficiency and contributing to environmental sustainability.

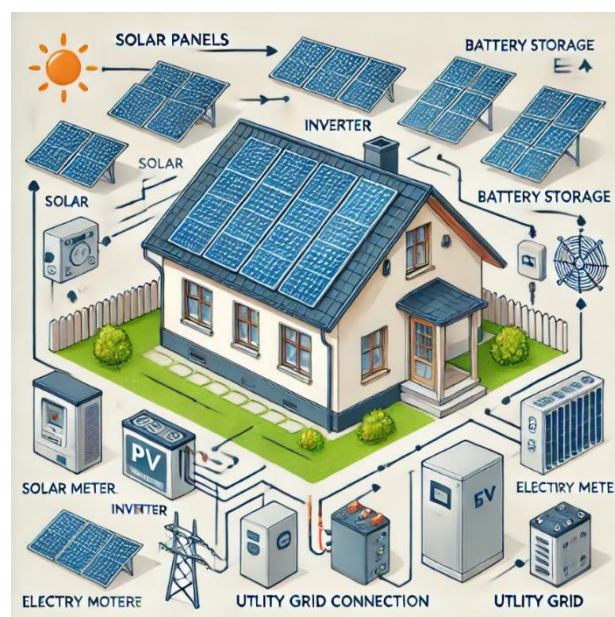


Fig. 2. Photovoltaic elements for residential buildings.

Source: Generated with Dall-E AI.

On the other hand, it was possible to confirm that the main steps for the installation of photovoltaic systems are described in Fig. 3, where it can be seen that there are 9 basic steps to make the operation of a residential photovoltaic system possible.

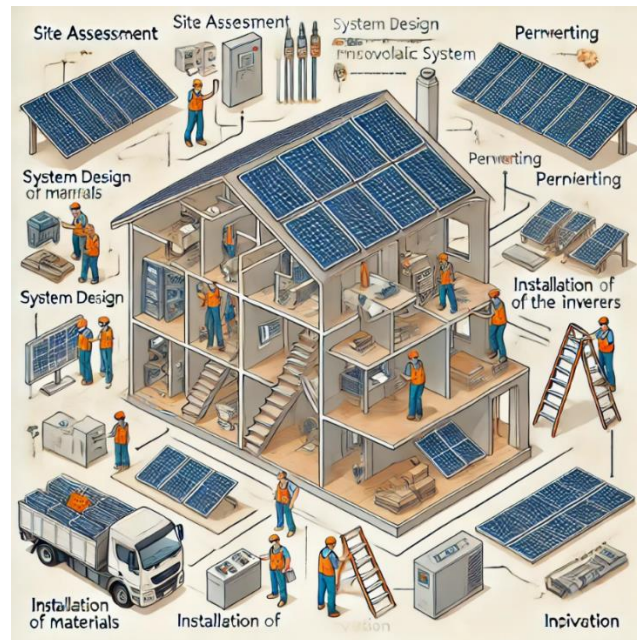


Fig. 3. Steps for the installation of a photovoltaic system.

Source: Generated with Dall-E AI.

1. Site Assessment: A site inspection is conducted to determine feasibility and best locations for solar panels.
2. System Design: The specific photovoltaic system is designed to meet the house's energy needs.
3. Obtaining Permits: The necessary permits are requested and obtained from local authorities for the installation.
4. Acquisition of Materials: The solar panels, inverter, batteries, and other necessary components are purchased.
5. Solar Panel Installation: Solar panels are installed on the roof or at the designated location.
6. Inverter Installation and Battery Storage: The inverter and battery storage system are installed in an appropriate location.
7. Electrical Wiring: The necessary wiring is carried out to connect the solar panels, the inverter, the batteries, and the electrical system of the house.
8. Inspection: An inspection is carried out to ensure that the installation complies with all safety regulations and standards.
9. System Activation: The system is activated and a final test is performed to verify that it works properly.

Furthermore, the literature review covered IEEE standards related to PV installation of systems in residential buildings, detailed below. These standards ensure the safe, efficient integration of PV systems into buildings, ensuring compatibility with existing infrastructures, promoting renewable energy use, and advancing environmental sustainability.

IEEE 1547-2018: This standard establishes the interconnection and interoperability requirements for distributed generation equipment, including photovoltaic systems, with electricity grids. It provides guidelines for the safe and efficient integration of these systems with the electricity supply infrastructure.

IEEE 1562-2021: Provides best practices for sizing stand-alone PV systems, including array size and batteries, ensuring adequate protection against overloads and deep discharges.

IEEE 2030.2-2018: These standards address interoperability and data communication guidelines for grid-connected PV systems, facilitating integration with smart grid technologies and other distributed energy resources.

IEEE 929-2000: Specifies requirements for grid-connected photovoltaic systems, focusing on protection and safe operation, including technical aspects such as power quality and fault protection.

IEEE 1547.1-2020: Details the test procedures and evaluation criteria for the interconnection of distributed generation equipment, ensuring that they comply with the requirements of the IEEE 1547 standard.

IEEE 1815-2012 (DNP3): Although it is a standard for the data network protocol, it is relevant for photovoltaic systems integration as it facilitates communication and control within distributed electrical systems.

IEEE 1547.2-2008: Provides application guides for the implementation of interconnected photovoltaic systems, including case studies and best practices for the planning and execution of these projects.

IEEE 2030.5-2018 (SEP2): Standard that defines communication protocols for energy and demand management in photovoltaic systems and other distributed energy resources, facilitating interoperability with smart grids.

IEEE 1662-2008 provides best practices for designing and installing energy storage systems deployed in conjunction with photovoltaic systems, ensuring operational efficiency and safety.

IEEE 1574-2003 focuses on photovoltaic power systems protection and provides guidelines for protection against over-currents and other abnormal conditions. This standard improves the reliability and safety of the system as a whole.

CONCLUSIONS

Integrating solar PV systems in buildings markedly enhances energy efficiency and fosters self-sufficiency. By employing solar panels, buildings can generate autonomous electricity, lessening reliance on external energy sources and often achieving a surplus of energy. This represents a long-term economic saving that relieves pressure on the power grids.

The implementation of photovoltaic systems contributes directly to the reduction of greenhouse gas emissions. By harnessing a clean, renewable energy source, buildings fitted with solar panels reduce their carbon footprint, thus mitigating their environmental impact. This shift is crucial in the fight against climate change and the shift to a more sustainable future.

Investing in solar PV for buildings is both an environmentally responsible and economically savvy decision. Initial installation costs are gradually recouped through reduced electricity bills, potential tax incentives, and government subsidies. Furthermore, buildings with PV systems often command a higher market value and gain a competitive edge in attracting sustainability-minded tenants or buyers.

The integration of solar PV systems drives innovation in building design and construction. Technologies such as Photovoltaic Building Integration (BIPV) allow solar panels to become an integral part of the building's structure, optimizing the use of space and improving architectural aesthetics. This approach maximizes energy efficiency and opens up new possibilities for sustainable architecture, turning buildings into real clean energy generators and contributing to a greener urban environment.

REFERENCES

- [1] Y. Dai and Y. Bai, "Performance Improvement for Building Integrated Photovoltaics in Practice: A Review," *Energies*, vol. 14, no. 1, p. 178, Jan. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en14010178>.
- [2] M. G. Villalva, J. R. Gazoli, and E. Ruppert Filho, "Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, no. 5, pp. 1198-1208, May 2009, doi: 10.1109/TPEL.2009.2013862.
- [3] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*, 3rd ed., Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2003.
- [4] T. Markvart and L. Castaner, *Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications*, 2nd ed., Oxford, U.K.: Elsevier, 2012.
- [5] S. B. Kjaer, J. K. Pedersen, and F. Blaabjerg, "A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 41, no. 5, pp. 1292-1306, Sept.-Oct. 2005, doi: 10.1109/TIA.2005.853371.
- [6] E. Koutroulis, K. Kalaitzakis, and N. C. Voulgaris, "Development of a microcontroller-based, photovoltaic maximum power point tracking control system," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 16, no. 1, pp. 46-54, Jan. 2001, doi: 10.1109/63.903988.
- [7] Y. Yang, P. Enjeti, F. Blaabjerg, and H. Wang, "Wide-scale adoption of photovoltaic energy: Grid code modifications are explored in the distribution grid," *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 21, no. 5, pp. 21-31, Sept.-Oct. 2015, doi: 10.1109/MIAS.2014.2355203.
- [8] X. Xiong and Y. Yang, "A photovoltaic-based DC microgrid system: Analysis, design and experimental results," *Electronics*, vol. 9, no. 6, p. 941, 2020.
- [9] S. Jain and V. Agarwal, "Comparison of the performance of maximum power point tracking schemes applied to single-stage grid-connected photovoltaic systems," *IET Electric Power Applications*, vol. 1, no. 5, pp. 753-762, Sept. 2007, doi: 10.1049/iet-epa:20060343.
- [10] M. E. Ropp, S. Gonzalez, and D. K. Brooks, "Development of a MATLAB/Simulink model of a single-phase grid-connected photovoltaic system," in *Proc. IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 2008, pp. 2112-2118, doi: 10.1109/PESC.2008.4592239.
- [11] E. Mirabi, F. Akrami Abarghuie & R. Arazi. Integration of buildings with third-generation photovoltaic solar cells: a review. *Clean Energy*, 5(3), 505-526. 2021
- [12] M. Żołądek, M. Filipowicz, K. Sornek, K. & R. Figaj. Energy performance of the photovoltaic system in urban area-case study. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 214, No. 1, p. 012123). IOP Publishing. 2019
- [13] M. Brito, T. Santos, F. Moura, D. Pera & J. Rocha. Urban solar potential for vehicle integrated photovoltaics. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 94, 102810. 2021
- [14] A. Kamal, S. Abidi, A. Mahfouz, S. Kadam, A. Rahman, I. Hassan & L. Wang. Impact of urban morphology on urban microclimate and building energy loads. *Energy and buildings*, 253, 111499. 2021
- [15] P. Conti, E. Schito & D. Testi. Cost-benefit analysis of hybrid photovoltaic/thermal collectors in a nearly zero-energy building. *Energies*, 12(8), 1582. 2019.

$$(x + a)^n = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} x^k a^{n-k}$$

$$(1 + x)^n = 1 + \frac{nx}{1!} + \frac{n(n-1)x^2}{2!} + \dots$$

Published by:

