

Industrialization for carbon neutrality in sustainable buildings

Carlos Magno Chavarry Vallejos, Doctor¹; Liliana Janet Chavarría Reyes, Doctor(c)²; Joaquín Samuel Támara Rodríguez, Doctor³; Joseph Emmanuel Támara Henostroza, Bachiller⁴; Edgar Andrés Camayo Chavarría, Bachiller⁵; Leydy Nataly Zamora Terrones, Magister⁶; Kelly Raquel Pazos Sedano, Magister⁷

^{1,2,5} Universidad Ricardo Palma, Perú, carlos.chavarry@urp.edu.pe; liliana.chavarría@urp.edu.pe; edgar.camayo@urp.edu.pe

^{3,4,6,7} Universidad Santiago Antúnez de Mayolo, Perú, jtamarar@unasam.edu.pe; jtamarah@unasam.edu.pe; lzamorat@unasam.edu.pe; kpazoss@unasam.edu.pe

Abstract. - *The objective of this research is to determine the decarbonization technologies from the industrialization approach for the neutrality of carbon emissions in sustainable buildings in Multifamily Buildings of the Mivivienda Fund Program of Metropolitan Lima. The research method is deductive, quantitative, applied and descriptive, correlational and explanatory. The design is non-experimental, cross-sectional and prospective. The technique used is the personal interview, aimed at managers, construction engineers and/or other professionals in charge of the design and technical part of the project. The data collection instrument is a semi-structured questionnaire, consisting of closed questions, with polytomic values. The study determined that the reduction of CO₂ emissions using decarbonization technologies in the projects of the Mivivienda Fund Program from the industrialization approach the reduction of CO₂ emissions is 45.63%, being a reduction of CO₂ emissions at the national level of 3.36% and an energy reduction of 3.87% and at the international level a reduction of CO₂ emissions of 8.40% and an energy reduction of 9.0%.*

Keywords: *Decarbonization technologies, carbon neutrality, CO₂ emission reduction, industrialization, Multifamily Buildings.*

Resumen. - *El objetivo de esta investigación es determinar las tecnologías de descarbonización desde el enfoque de industrialización para la neutralidad de emisiones de carbono en edificaciones sustentables en Edificios Multifamiliares del Programa Fondo Mivivienda de Lima Metropolitana. El método de investigación es deductivo, cuantitativo, aplicado y descriptivo, correlacional y explicativo. El diseño es no experimental, transversal y prospectivo. La técnica utilizada es la entrevista personal, dirigida a directivos, ingenieros constructores y/u otros profesionales encargados del diseño y parte técnica del proyecto. El instrumento de recolección de datos es un cuestionario semiestructurado, compuesto por preguntas cerradas, con valores politómicos. El estudio determinó que la reducción*

de emisiones de CO₂ utilizando tecnologías de descarbonización en los proyectos del Programa Fondo Mivivienda desde el enfoque de industrialización la reducción de emisiones de CO₂ es del 45.63%, siendo una reducción de emisiones de CO₂ a nivel nacional de 3.36% y una reducción de energía del 3,87% y a nivel internacional una reducción de emisiones de CO₂ del 8,40% y una reducción de energía del 9,0%.

Palabras clave: *Tecnologías de descarbonización, neutralidad de carbono, reducción de emisiones de CO₂, industrialización, Edificaciones Multifamiliares.*

I. INTRODUCCIÓN

Las estrategias destinadas a preservar un entorno saludable y mitigar los efectos adversos de los patrones climáticos globales en la salud respiratoria han sido objeto de una atención creciente en la comunidad científica. El aumento de las partículas de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera ha contribuido significativamente al deterioro de la calidad del aire, exacerbando la incidencia de enfermedades respiratorias [1]. Para contrarrestar este fenómeno, se ha destacado la importancia crítica de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, en particular el dióxido de carbono (CO₂). En este contexto, se postula que la transformación del sector de la construcción hacia sistemas de construcción en seco, fácilmente desmontables y separables puede desempeñar un papel fundamental en la mitigación de impactos ambientales futuros. Estos sistemas permiten la reutilización de materiales en otros procesos de economía circular, minimizando así el impacto negativo asociado con la construcción de edificios nuevos. Sin embargo, la implementación exitosa de estas medidas se ve obstaculizada por las disparidades regionales en variables socioeconómicas. Investigaciones adicionales, han identificado diferencias significativas en el

crecimiento económico, la densidad de población, la estructura económica y las características de la urbanización entre diversas regiones. Estas divergencias influyen en las intensidades de CO₂ en la producción de la industria pesada, la infraestructura y el parque de viviendas, dificultando la implementación homogénea de estrategias de reducción de emisiones a nivel global [11].

Implementar procesos industrializados se presenta como una estrategia esencial para la optimización de los tiempos de ejecución en el ámbito de la construcción, donde la identificación y análisis de los sistemas constructivos utilizados juegan un papel determinante en este contexto. La creación y aplicación de elementos prefabricados, con el ensamblaje in situ, fortalecen el paradigma de ejecución de proyectos [12]. En particular, se aboga por la producción y transformación de materiales de ingeniería, especialmente en economías desarrolladas, integrándolos de manera industrializada en el proceso edificatorio. Este enfoque se alinea con los principios de renovación y diseño, procurando la sostenibilidad a largo plazo. La mejora continua de la renovación industrializada emerge como un elemento clave para avanzar hacia la descarbonización del parque de edificaciones.

La dirección de investigaciones orientadas a la eficiencia energética y la reducción de emisiones de carbono se posiciona como una necesidad imperante. La adopción de conceptos de economía circular, con un énfasis en fomentar la demanda de materiales de construcción ecoamigables, contribuye significativamente a la reducción del carbono incorporado. Este enfoque se fundamenta en la adherencia a estándares y certificaciones internacionales que respaldan prácticas sostenibles en la construcción y equipamiento. En última instancia, la implementación de estos enfoques no solo busca mejorar la calidad de vida, sino que también aspira a alcanzar un alto nivel de eficiencia energética, reduciendo de manera significativa el consumo de energía, agua y otros recursos. Este enfoque integral no solo beneficia la eficiencia del proceso constructivo, sino que también minimiza la huella ambiental, promoviendo así un entorno más sostenible.

La justificación del proyecto se sustenta en un modelo orientado a incrementar la conciencia acerca de la necesidad de que las futuras edificaciones sean construidas siguiendo principios de sostenibilidad y en consonancia con procesos de industrialización. Se llevarán a cabo diversas acciones con el propósito de garantizar un entorno saludable y prevenir el cambio climático a nivel global. Con el objetivo de maximizar los impactos en términos de eficiencia energética, costos, calidad ambiental interna y comodidad del usuario, se

reconoce la importancia crítica de una atención eficiente a los usuarios del proyecto. Este enfoque se considera esencial para lograr una mejora continua que conduzca a la reducción de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂).

La justificación metodológica de este estudio se centra en la consideración de las tecnologías de descarbonización durante el diseño y la construcción de edificaciones, con el propósito de garantizar su sostenibilidad y certificación por organismos internacionales. Se plantea la necesidad de elaborar un plan integral que evite el incremento de las emisiones, abogando por la construcción de edificios que sean resilientes al cambio climático. Este enfoque implica la utilización de materiales de construcción y técnicas de diseño sostenibles, con el objetivo de salvaguardar tanto el medio ambiente como la salud de los usuarios [13].

Para alcanzar los objetivos de descarbonización, mejorar la eficiencia y cumplir con las metas de sostenibilidad, tanto las ciudades como los edificios deben someterse a cambios significativos. Es relevante señalar que numerosas naciones a nivel mundial han propuesto metas de neutralidad de carbono a lo largo del tiempo, proyectando su consecución para el año 2050. La instauración de un sistema de energía neutral requiere estrategias que potencien la eficiencia energética, reduzcan el consumo de energía, disminuyan la proporción de energía carbonosa, ajusten la estructura energética y reconstruyan el equilibrio entre fuentes y sumideros. [2].

II. MATERIALES Y MÉTODO

Los formuladores de políticas enfatizan la necesidad de diseñar cuidadosamente políticas de carbono con miras a facilitar una mitigación temprana y efectiva. Al mismo tiempo, subrayan la importancia de mantener un avance constante en la eficacia tecnológica del sector de la construcción, con el objetivo de contribuir significativamente a la mejora del rendimiento energético. Este enfoque dual busca conciliar la urgencia de medidas inmediatas de mitigación con el impulso continuo hacia innovaciones tecnológicas que respalden la sostenibilidad a largo plazo en el ámbito de la construcción [3].

El enfoque metodológico adoptado es de naturaleza deductiva, ya que, a través de la observación, se procedió a identificar las causas subyacentes a la generación de emisiones, permitiendo así derivar conclusiones que expliquen o establezcan relaciones entre los fenómenos investigados. Este método se caracteriza por su capacidad para inferir conclusiones a partir de observaciones específicas. La orientación de la investigación es de índole aplicada, puesto que su

propósito principal radica en establecer criterios concretos para el diseño y la construcción mediante la implementación de tecnologías de descarbonización. Además, se emplea un enfoque cuantitativo, ya que se presentan porcentajes específicos de reducción de emisiones de CO₂ tanto a nivel nacional como internacional. Estos datos se derivan de consultas realizadas a publicaciones especializadas en el tema, asegurando una base sólida y respaldada por investigaciones previas. En relación con la tipología de la fuente de recolección de datos, se clasifica como proyectiva. Este enfoque se justifica dado que la información se recopilará de manera proactiva, alineada con los objetivos predefinidos del estudio. La selección y adquisición de datos se llevará a cabo de manera estratégica, permitiendo así abordar de manera específica los aspectos fundamentales vinculados a la investigación sobre descarbonización y emisiones de CO₂ [14].

La investigación es de tipo descriptiva, porque se determinó y/o describió las principales causas de éxito y/o fracaso de los diseños y procedimientos constructivos para identificarlos y establecer las tecnologías de descarbonización adecuada; también es de tipo correlacional y explicativa, ya que, reconoce la relación entre las tecnologías de descarbonización y las emisiones de CO₂, brindando el conocimiento necesario para el mejoramiento de los procedimientos e identificación de los factores, de tal manera que se establezca una cultura de descarbonización con las prácticas utilizadas en la organización [4].

La naturaleza de la investigación se define como descriptiva, ya que se abocó a identificar las causas subyacentes que generan las emisiones de CO₂. Este enfoque permitió un análisis detallado de los factores implicados en la emisión de gases de efecto invernadero, ofreciendo así una visión comprensiva del fenómeno estudiado. En términos metodológicos, el estudio se clasifica como cuantitativo, ya que se llevaron a cabo determinaciones numéricas, incluyendo la identificación de frecuencias, promedios e intervalos de confianza. Estos parámetros cuantitativos se convierten en referencia esencial para establecer los lineamientos de gestión necesarios en el plan de mejora, con el objetivo específico de reducir las emisiones de CO₂. Esta orientación cuantitativa proporciona bases sólidas y medibles que contribuyen a la formulación de estrategias efectivas de gestión ambiental.

Según la técnica de contrastación adoptada, la investigación se clasifica como no experimental, ya que se llevó a cabo sin la manipulación deliberada de variables ni la construcción de situaciones controladas. En lugar de ello, se centró en la observación de situaciones y condiciones ya

existentes, permitiendo un análisis detallado de los fenómenos en su contexto natural. En relación con la dirección temporal del estudio, se cataloga como transversal y prospectivo. Este enfoque implica la recolección de datos en un solo momento, en un punto temporal único. La investigación se orientó hacia el futuro, ya que se proyecta sobre eventos que se desarrollarán más adelante, brindando así una perspectiva proactiva. En cuanto al diseño del estudio, se caracteriza como de cohorte, ya que el fenómeno estudiado tiene su causa en el presente y su efecto se proyecta hacia el futuro. Este enfoque permite la identificación y seguimiento de una población específica a lo largo del tiempo, proporcionando así una comprensión más profunda de las relaciones temporales entre variables...

La población objeto de estudio comprende las edificaciones multifamiliares erigidas en la ciudad de Lima Metropolitana durante los años 2021 y 2022, debidamente registradas en el *Programa Fondo Mivivienda*. A través de un muestreo intencionado, guiado por criterios de inclusión y exclusión, se procedió a determinar el tamaño de la muestra [15]. La unidad de análisis de este estudio recae en los profesionales involucrados en los proyectos, quienes poseen conocimientos detallados de las especificaciones técnicas. La unidad de observación, se centra específicamente en los proyectos inmobiliarios, siendo estos el foco primordial de análisis y evaluación en el marco de la investigación.

Los criterios de inclusión: el personal entrevistado debe conocer las herramientas, documentos o conocimiento que posee la empresa constructora para planificar/gestionar la Seguridad y Salud Ocupacional y Medio Ambiente (SSOMA).

III. RESULTADOS

El análisis reveló que las construcciones de edificios multifamiliares presentan, en promedio, una altura de 10 pisos, siendo las construcciones de 5 pisos las más frecuentes. Además, cada proyecto alberga un promedio de 50 departamentos. En cuanto al área construida, se observa una variabilidad que abarca desde 35 m² hasta 140 m², con una media de 75 m². Respecto al costo, se registra un promedio de 1,315 dólares estadounidenses por metro cuadrado. Estos hallazgos proporcionan una visión detallada de las características comunes de los edificios multifamiliares estudiados, permitiendo así una comprensión más completa de su perfil constructivo y financiero.

La fase de procesamiento de datos se llevó a cabo mediante el programa estadístico SPSS versión 22, alcanzando niveles significativos de consistencia interna [5]. El análisis arrojó una

excelente consistencia interna (Coeficiente alfa = $0.908 > 0.9$), basada en elementos estandarizados. Es relevante destacar que la eliminación de cualquier ítem no conllevó un aumento en la fiabilidad de la prueba, subrayando así la robustez de la metodología empleada. En cuanto a la correlación total de elementos corregida, se obtuvo un valor de 0.862, indicando una correlación positiva muy fuerte. Este resultado respalda la coherencia y la interrelación destacada entre los elementos evaluados en el estudio. La aplicación de estas herramientas estadísticas fortalece la validez y la solidez de los resultados obtenidos durante el análisis, proporcionando así una base cuantitativa confiable para las conclusiones derivadas de la investigación.

En el marco de la investigación con un enfoque centrado en la industrialización, se observa que, en promedio, los diseñadores emplean un 25% de proyectos técnicos basados en este paradigma. Un dato significativo revela que el 4,05% de las empresas que adoptan la digitalización y fomentan la edificación sostenible logran alcanzar la neutralidad de emisiones de carbono. Asimismo, el 3,38% de estas empresas implementan un monitoreo regular del patrón de consumo, identificando posibles funcionamientos anómalos mediante sensores inteligentes y descarbonizando los procesos de fabricación de sus materiales. Un enfoque adicional adoptado por el 2.03% de las empresas se centra en la búsqueda de sistemas constructivos en seco fácilmente desmontables y separables. Esta estrategia tiene como objetivo la incorporación de materiales en otros procesos de economía circular, procurando obtener eficiencia y sostenibilidad en la fase de diseño integral [16]. Estos hallazgos resaltan las prácticas emergentes en la industria, evidenciando una tendencia hacia métodos más sostenibles y eficientes en la construcción y diseño de edificaciones.

Tras obtener los resultados del análisis mediante SPSS, se llevó a cabo la evaluación de la normalidad utilizando la prueba de Shapiro-Wilk, apropiada para tamaños de muestra $n \leq 50$. Los resultados de esta prueba indicaron que el conjunto de datos en estudio no sigue una distribución normal, lo que llevó a la decisión de optar por pruebas no paramétricas. La elección de pruebas no paramétricas se fundamentó en la presencia de resultados con valores significativos ($\text{sig.} = p \leq 0.05$), confirmándose así que los datos no cumplen con los supuestos de normalidad. Este enfoque metodológico refuerza la validez del análisis estadístico al adaptarse a la naturaleza específica de la distribución de los datos recopilados en el estudio.

En un 8% de los proyectos, se observa la aplicación de tecnologías de descarbonización

destinadas a la reducción de las emisiones de CO_2 . Esta constatación señala que en el 92% restante de los proyectos existe una oportunidad significativa para implementar mejoras orientadas a reducir tanto el consumo de energía como las emisiones de gases nocivos de efecto invernadero. Estos hallazgos subrayan el potencial de implementación de estrategias más sostenibles y eficaces en la gran mayoría de los proyectos evaluados. El estudio también estableció:

- En un 2.70% de los proyectos, la empresa demuestra la capacidad de generar energía renovable de manera altamente competitiva, aprovechando recursos naturales inagotables como el sol, el viento, el agua o la biomasa. Es destacable que en estas instancias, la medición y verificación de los ahorros energéticos se realiza de manera regular, proporcionando información valiosa sobre los ahorros reales derivados del uso de equipos y artefactos en el contexto de la edificación. Este enfoque subraya la implementación efectiva de prácticas sostenibles y la gestión eficiente de los recursos naturales en una fracción específica de los proyectos analizados.
- En un 1.35% de los proyectos, la empresa muestra la habilidad frecuente de generar energía renovable con un costo altamente competitivo, utilizando recursos naturales inagotables como el sol, el viento, el agua o la biomasa. El propósito fundamental al adoptar energías renovables en estos casos es evitar cualquier impacto negativo en el medio ambiente. Esta práctica resalta el compromiso con la sostenibilidad y la gestión responsable de recursos en una fracción específica de los proyectos analizados.
- En un 3.38% de los proyectos, la empresa demuestra de manera muy frecuente su capacidad para generar energía renovable a un costo altamente competitivo mediante la utilización de recursos naturales inagotables, tales como el sol, el viento, el agua o la biomasa. En estos casos, los diseños de las edificaciones destacan por su enfoque hacia la eficiencia energética al sustituir tecnologías térmicas o hidráulicas con equipos o artefactos que consumen menos energía. Además, la empresa a menudo desarrolla simulaciones más económicas, priorizando la eficiencia energética en sus edificaciones, y utiliza herramientas que facilitan el análisis energético de manera preliminar durante las etapas tempranas del diseño. Estas prácticas reflejan un compromiso significativo con la sostenibilidad y la adopción proactiva de estrategias eficientes en el ámbito de la generación y gestión de energía en la construcción.

- En un 3.38% de los proyectos, la empresa se dedica de manera frecuente a la digitalización y promoción de la edificación sostenible, logrando la neutralidad en las emisiones de carbono. En estos casos, los diseños desarrollados por la empresa transforman la manera de generar y consumir energía, enfocándose de manera específica en prácticas sostenibles. Asimismo, en el mismo porcentaje de proyectos, se observa la implementación regular de un seguimiento del patrón de consumo y la identificación de funcionamientos anómalos, utilizando sensores inteligentes. Además, se destaca que estos proyectos con frecuencia realizan simulaciones más económicas con un enfoque en la eficiencia energética en sus edificaciones. Estos hallazgos subrayan el compromiso activo de estos proyectos con la adopción de tecnologías y estrategias que promueven la sostenibilidad y la eficiencia energética en el sector de la construcción.
- En un 2.70% de los proyectos, se observa con frecuencia la descarbonización de los procesos de fabricación de materiales, acompañada por la práctica de aislar las tuberías de distribución. Esta estrategia tiene como objetivo reducir las pérdidas térmicas y, por ende, minimizar el consumo de energía a niveles superiores a lo necesario. Estos hallazgos indican un enfoque activo hacia la optimización de procesos y la reducción de pérdidas energéticas en una fracción específica de los proyectos analizados.

Procesos para optimizar en el plan de mejora:

- Digitalizar e impulsar la edificación sostenible alcanzando la neutralidad de las emisiones de carbono buscando sistemas constructivos en seco fácilmente desmontables y separables para introducir los materiales en otros procesos de economía circular.
- Obtener la eficiencia y sostenibilidad en la fase de un diseño integral por su construcción y equipamiento, para ello se debe conseguir un alto nivel de eficiencia reduciendo el consumo de energía, agua y otros recursos para disminuir la contaminación.
- Establecer un seguimiento regular del patrón de consumo e identificar funcionamientos anómalos para reducir el consumo de energía mediante sensores inteligentes. Conocer los excesos de consumo instalando medidores para supervisar o monitorear la energía eléctrica, con el objeto de identificar las desviaciones o mermas del consumo energético.
- Considerar en los procesos de fabricación de materiales, la construcción de tal manera que cause el menor impacto ambiental, incorporando criterios de sostenibilidad

ambiental, eficiencia energética, durabilidad, recursos renovables, tecnologías limpias y materiales residuales.

Recomendaciones para la propuesta de mejora desde el enfoque de la industrialización: - Realizar diseños integrales considerando tanto la construcción como el equipamiento. Para lograrlo, es fundamental alcanzar un elevado nivel de eficiencia que permita la reducción del consumo de energía, agua y otros recursos, contribuyendo así a la disminución de la contaminación. - Identificar los procesos de fabricación de materiales en la construcción e incorporar criterios fundamentales para la sostenibilidad ambiental. Esto implica la integración de elementos como la eficiencia energética, durabilidad, aprovechamiento de recursos renovables, adopción de tecnologías limpias y un manejo adecuado de materiales residuales. Estas consideraciones son esenciales para garantizar prácticas constructivas respetuosas con el medio ambiente y socialmente responsables.

Con el objetivo de lograr la eficiencia y sostenibilidad en la fase integral de un diseño digitalizado, se impulsa la edificación sostenible con la meta de alcanzar la neutralidad de las emisiones de carbono [17]. En busca de un desarrollo sostenible, se enfatiza en la importancia de abordar la contaminación ambiental y responder al cambio climático, lo que conlleva a la mejora y ajuste de la estructura energética. Es crucial que las áreas remotas garanticen el cumplimiento oportuno de los objetivos nacionales de reducción de emisiones de energía, considerándolas como zonas clave para la conservación de energía y la reducción de emisiones.

La conservación de la energía y la reducción de emisiones se perfilan como la principal tarea en toda la región. Esto implica la eliminación energética de algunas industrias y capacidades de producción de energía rezagadas, así como la implementación de medidas para frenar el alto consumo de energía [6] (Tabla 1).

Tabla 1
Reducción de las emisiones de gases de CO₂ - Industrialización

Industrialización (Liu, 2022)	Reducción Emisiones de CO ₂
Peso total del SBT sistema BTC	62.10%
Energía embebida total del 3	124.45%
Energía incorporada total del SBT	20.10%
Emissiones de dióxido de carbono totales del SBT	16.50%
	5.00%
Promedio	45.63%

Nota:

SBT: Evaluación de objetivos basados en la ciencia

BTC: Producto del minado de Bitcoin

SAT: Servicio de Administración Tributaria

Este sistema presenta diversas ventajas, siendo notablemente más ligero que los sistemas de adobe tradicional y de BTC. Sin embargo, su característica ecológica más destacada radica en el empleo predominante de materiales naturales, como la madera, la tierra y la paja. Esta elección de materiales conlleva a la obtención de coeficientes negativos en las emisiones de dióxido de carbono asociadas al sistema. Asimismo, el uso de estos materiales naturales confiere al sistema la capacidad de llevar a cabo un secuestro de carbono de manera indirecta, contribuyendo así a la mitigación de los impactos ambientales. Los datos generados para un área de 10 m², el SBT tiene un peso de 704,2 kg/m², una energía incorporada de 1.566,7 MJ/m², y genera -147,6 kg CO₂/m², de esta manera, se puede establecer que por cada 60 m² de construcción, tomando como referencia el área mínima de una vivienda social, se tendría un peso de 42.25 kg, equivalentes a 42,2 toneladas, una energía embebida de 94.002 MJ, y generaría -8.856 [7].

Resumen de reducción de emisiones de CO₂ y de energía en porcentajes a nivel nacional e internacional de reducción de emisiones de CO₂ y reducción de energía (fig. 1).

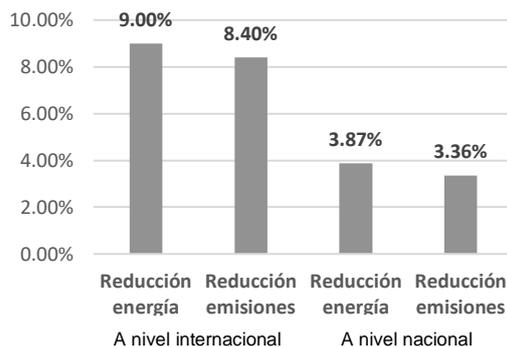


Fig. 1. Resumen del porcentaje de reducción de emisiones de CO₂ y reducción de energía
Nota: Adaptado de González (2022).

Discusión. – En el ámbito de la tecnología de descarbonización, particularmente desde la perspectiva de la industrialización, la capacidad para producir y transformar materiales de ingeniería ha desempeñado un papel fundamental en la mejora de los estándares de vida, especialmente en las economías desarrolladas. Sin embargo, es crucial considerar los impactos a largo plazo de la adicción a la creación y uso acelerado de materiales, particularmente en lo que respecta a las generaciones futuras. El actual proceso de

fabricación y utilización de materiales tiene efectos negativos significativos en nuestro planeta, dando lugar a numerosos problemas ambientales graves [8]. En el análisis cualitativo de contenido, los resultados fueron organizados en un marco conceptual que abarcó diversas categorías, entre las que se incluyen: (1) la aplicación de métodos basados en datos, como el monitoreo, la medición, el mapeo o modelado, pronóstico, evaluación de riesgos y propósitos de planificación; (2) los efectos positivos resultantes; (3) los desafíos emergentes; y (4) recomendaciones de acción para abordar estos desafíos. A pesar de los beneficios y aplicaciones versátiles, se destacan los desafíos asociados y se proponen acciones concretas para superarlos [9].

La definición y aplicación de técnicas industrializadas en el diseño y construcción de la renovación, especialmente en lo que respecta a los conceptos de diseño, ofrecen una visión esclarecedora sobre aspectos fundamentales para la futura implementación de la rehabilitación de envolventes de edificios industrializados [5]. Los experimentos realizados han evidenciado una reducción notable en la intensidad de las emisiones de CO₂, disminuyendo de 0.43 ton/mil yuanes a 0.20 ton/mil yuanes entre 1995 y 2013. Este descenso representa una disminución anual promedio del 4.34%. Cabe destacar que, a pesar de los factores que han obstaculizado la reducción de las intensidades de CO₂, como la continua industrialización que exige el aumento de la producción en la industria pesada, la inversión en infraestructura y el desarrollo del parque de viviendas [10], se ha logrado un progreso significativo.

IV. CONCLUSIONES

En el *Programa Fondo Mivivienda* en Lima Metropolitana, un 25% de los proyectos inmobiliarios emplean técnicas de descarbonización desde el enfoque de la industrialización. Este enfoque, respaldado por elementos estandarizados alcanzan índices de consistencia interna excelente (coeficiente alfa de Cronbach = 0.908). Se destaca que la confiabilidad de la prueba no se ve afectada al eliminar algún ítem. Además, tiene una correlación promedio de 0.862 entre las 26 preguntas, reflejando una fuerte correlación positiva entre ellas. La elección de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para n ≤ 50, reveló un valor de significancia p ≤ 0.05, indicando que los datos provienen de una población que no sigue una distribución normal.

El estudio reveló una significativa reducción de emisiones de CO₂ del 45.63%, acompañada de reducciones de energía del 3.36% a nivel nacional y reducciones de CO₂ del 3.87%. A nivel internacional, se lograron reducciones de energía

del 8.40%. Estos resultados evidencian el impacto positivo de las estrategias de descarbonización implementadas en el ámbito inmobiliario.

RECOMENDACIONES

Es esencial que las empresas dedicadas a la construcción de edificaciones civiles establezcan objetivos compartidos, centrados en la sostenibilidad del proyecto desde sus fases iniciales, como el diseño y la construcción, hasta la operación. Estos objetivos deben ser definidos mediante logros y metas que beneficien a todas las partes involucradas en el proyecto. La eficiencia energética y la reducción de emisiones de carbono (CO₂) deben ser consideradas de manera prioritaria. Asimismo, la adopción de conceptos de economía circular y el control del uso de materiales de construcción son fundamentales para contribuir a soluciones sostenibles en la industria de la construcción. Este enfoque integral asegurará un impacto positivo en la sostenibilidad y el rendimiento ambiental de las edificaciones civiles.

AGRADECIMIENTO

A las Universidades Ricardo Palma (URP) y Santiago Antúnez de Mayo (UNASAM) por los asesores especialistas y metodólogos que participaron en la elaboración del presente artículo.

REFERENCIAS

- [1] Wang, S., F. C., S. L., S. Y., C. X., Z. C., . . . y H. K. (2019). Descarbonizando las aglomeraciones urbanas de China. *Anales de la Asociación Estadounidense de Geógrafos*. 266–285.
- [2] Gao, L., Zheng, Y., Yang, D., Zhu, L., Li, S., & Jin, H. (2021). Critical equation of carbon neutrality for power systems. *Kexue Tongbao/Chinese Science Bulletin*, 66(31), 3932–3936. <https://doi.org/10.1360/TB-2021-0509>.
- [3] Chen, H., Wang, L., & Chen, W. (2019). Modeling on building sector's carbon mitigation in China to achieve the 1.5 °C climate target. *Energy Efficiency*, 12(2), 483–496. <https://doi.org/10.1007/s12053-018-9687-8>.
- [4] Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2018). *Metodología de la investigación* (Vol. 4, pp. 310-386). México: McGraw-Hill Interamericana.
- [5] Konstantinou, T., & Heesbeen, C. (2022). Industrialized renovation of the building envelope: realizing the potential to decarbonize the European building stock. (Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822477-9.00008-5>
- [6] González, A. (2022). Análisis comparativo de tres sistemas constructivo de tierra. *Energía embebida y emisiones de CO₂*. 1–15.
- [7] Liu, Y., Chen, S., Jiang, K., & Kaghembega, W. S. H. (2022). The gaps and pathways to carbon neutrality for different type cities in China. *Energy*, 244. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122596>.
- [8] Liu, Z., & Jiang, G. (2021). Optimization of intelligent heating ventilation air conditioning system in urban building based on BIM and artificial intelligence technology. *Computer Science and Information Systems*, 18(4), 1379–1394. <https://doi.org/10.2298/CSIS200901027L>
- [9] Titirici, M., Sparks, T., Baird, S., & Hosseinaei, O. (2022). The sustainable materials roadmap. 4-132. <https://doi.org/10.1088/2515-7639/ac4ee5>.
- [10] Bachmann, N.; Tripathi, S.; Brunner, M.; Jodlbauer, H. (2022). The Contribution of Data-Driven Technologies in Achieving the Sustainable Development Goals. *Sustainability* 2022, 14, 2497. <https://doi.org/10.3390/su14052497>.
- [11] Márquez, L.; Cuétara, L.; Cartay, R.; Labarca, N. (2020). Desarrollo y crecimiento económico: Análisis teórico desde un enfoque cuantitativo. *Revista de Ciencias Sociales (Ve)*, vol. XXVI, núm. 1, pp. 233-253, 2020. Universidad del Zulia, Venezuela. <https://www.redalyc.org/journal/280/28063104020/html/>
- [12] Walas, M.; Federico, T.; Julián, I.; Victor, F.; Seminario, A. (2022). Estrategia LEAN 4.0, la optimización de procesos industriales en el marco del paradigma industria 4.0. <https://www.researchgate.net/publication/365898215>.
- [13] Caballero, G.; Enrique, C.; Alfaro, M.; Hipólito, Edith.; Torres, L. (2023). Importancia de los edificios inteligentes para el medio ambiente. *Revista Digital Universitaria (rdu)*, 24(1). <http://doi.org/10.22201/cuaieed.16076079e.2023.24.1.3>.
- [14] Hernández, R.; Mendoza, C (2018). Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta, Ciudad de México, México: Editorial Mc Graw Hill Education, Año de edición: 2018, ISBN: 978-1-4562-6096-5, 714 p. DOI: <https://doi.org/10.22201/fesc.20072236e.2019.10.18.6>.
- [15] Tamara, O.; Manterola, C. (2017)- Técnicas de Muestreo sobre una Población de Estudio, *Sampling Techniques on a Population Study. International Journal of Morphology versión On-line*. vol.35 no.1 <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-95022017000100037>
- [15] Tamara, O.; Manterola, C. (2017). Técnicas de Muestreo sobre una Población de Estudio, *Sampling Techniques on a Population Study. International Journal of Morphology versión On-line* vol.35 35(1):227-232. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-95022017000100037>
- [16] Thirlway, C. (2020). La sostenibilidad y la economía circular. *Revista OMPI*, 1/2020, 11 p. https://www.wipo.int/export/sites/www/wipo_magazine/es/pdf/2020/wipo_pub_121_2020_01.pdf
- [17] Gracia, J. (2019). *DESARROLLO SOSTENIBLE: ORIGEN, EVOLUCIÓN Y ENFOQUES*. Universidad Cooperativa de Colombia. Sede Bogotá. <http://dx.doi.org/10.16925/greylit.1074>