

# Electrical decarbonization technology as a replacement for equipment and appliances to reduce the burning of fossil fuels in civil buildings

Carlos Magno Chavarry Vallejos, Doctor<sup>1</sup>; Liliana Janet Chavarría Reyes, Doctor(c)<sup>2</sup>; Joaquín Samuel Támara Rodríguez, Doctor<sup>3</sup>; Enriqueta Pereyra Salardi, Doctor(c)<sup>4</sup>; Andrés Avelino Valencia Gutiérrez, Doctor<sup>5</sup>; Leydy Nataly Zamora Terrones, Magister<sup>6</sup>; Kelly Pazos Sedano, Magister<sup>7</sup>

<sup>1,2,4,5</sup> Universidad Ricardo Palma, Perú, carlos.chavarry@urp.edu.pe; liliana.chavarria@urp.edu.pe; enriqueta.pereyra@urp.edu.pe; andres.valencia@urp.edu.pe

<sup>3,6,7</sup> Universidad Santiago Antúnez de Mayolo, Perú, jtamarar@unasam.edu.pe; lzamorat@unasam.edu.pe; kpazoss@unasam.edu.pe

*Abstract.* - The objective of this research is to implement electrical devices to reduce the burning of fossil fuels in civil buildings of the Fondo Mivivienda Program in Metropolitan Lima. Decarbonization aims to reduce or eliminate carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions contributing to climate change in buildings. Suitable electrical equipment was identified to manage effectiveness, productivity, and profitability, considering costs, time, and quality in real estate projects. The research follows a deductive method, quantitative approach, and has an applied, descriptive, correlational, and explanatory orientation. The design is non-experimental, cross-sectional, and prospective. The technique used is interviews with managers, engineers, and professionals involved in the design and technical aspects of the project. The data collection instrument was a semi-structured questionnaire with closed-ended and politomical value questions. The study revealed that decarbonization through electrification reduces CO<sub>2</sub> emissions by 30.00%. Nationally, there is a 2.80% reduction in CO<sub>2</sub> emissions and a 3.23% reduction in energy consumption. This reduction benefits costs, environmental quality, and user comfort.

**Keywords:** - Decarbonization technologies, reduction of CO<sub>2</sub> emissions, fossil fuels, equipment and appliances, electrification, civil buildings.

**Resumen** - El propósito de esta investigación es implementar dispositivos eléctricos para disminuir la quema de combustibles fósiles en edificaciones civiles del Programa Fondo Mivivienda en Lima Metropolitana. La descarbonización busca reducir o eliminar las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) que contribuyen al cambio climático en edificios. Se identificaron equipos eléctricos apropiados para gestionar eficacia, productividad y rentabilidad, considerando costos, tiempo y calidad en proyectos inmobiliarios. La investigación sigue un método deductivo, enfoque cuantitativo y tiene orientación aplicada, descriptiva, correlacional y explicativa. El diseño es no experimental, transversal y prospectivo.

La técnica utilizada es la entrevista dirigida a gerentes, ingenieros y profesionales involucrados en el diseño y aspectos técnicos del proyecto. El instrumento de recolección de datos fue un cuestionario semiestructurado con preguntas cerradas y valores politómicos. El estudio reveló que la descarbonización mediante electrificación reduce las emisiones de CO<sub>2</sub> en un 30.00%. A nivel nacional, se observa una reducción del 2.80% en emisiones de CO<sub>2</sub> y del 3.23% en el consumo de energía. Esta disminución beneficia los costos, la calidad ambiental y la comodidad del usuario.

**Palabras claves:** Tecnologías de descarbonización, reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>, combustibles fósiles, equipos y artefactos, electrificación, edificaciones civiles

## I. INTRODUCCIÓN

El presente estudio consiste en un modelo a seguir en la búsqueda de generar conciencia como necesidad primordial de futuras construcciones adecuadas bajo conceptos de sostenibilidad reemplazando los equipos y artefactos con la finalidad de reducir o eliminar la quema de combustible fósiles en edificaciones civiles desde el enfoque de la electrificación. Siguiendo las premisas de la sostenibilidad, se propone la sustitución de equipos y artefactos convencionales con el objetivo de mitigar, e idealmente eliminar, la utilización de combustibles fósiles en edificaciones civiles, haciendo hincapié en la perspectiva de la electrificación. Se aboga por enfoques similares, nuestra propuesta de equipamiento y acondicionamiento no solo aborda la creación de una edificación sostenible, sino que también busca reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), contribuyendo así a la mejora de la eficiencia

energética [1]. La necesidad de preservar un entorno ambiental saludable constituye el eje rector de las iniciativas encaminadas a prevenir alteraciones en los patrones climáticos globales y a reducir las enfermedades respiratorias asociadas al aumento de concentraciones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). La imperante necesidad de limitar el aumento de la temperatura atmosférica subyace en la reducción de los niveles de emisión de gases de efecto invernadero, otorgando especial atención al CO<sub>2</sub> generado por actividades antropogénicas en el planeta [2].

Este enfoque adquiere una relevancia crítica para contrarrestar los impactos adversos en la salud ambiental y humana, dado que el cambio climático, resultante del incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero, posee el potencial de desencadenar consecuencias significativas [3]. La implementación de estrategias que atenúen estas emisiones no solo se plantea como una medida esencial para alcanzar un equilibrio climático, sino que también se erige como una herramienta fundamental para preservar la salud de los ecosistemas y salvaguardar el bienestar global.

El contexto del problema de la investigación implica cambiar la forma de generar y consumir en materia energética y medioambiental, lo que requiere del compromiso de todos los sectores implicados como transporte, construcción e industria entre otros [4]. Las emisiones de CO<sub>2</sub> en el Perú han crecido en el año 2021 un 18,37% respecto a 2020. La implementación de energía renovable para los usos térmicos domésticos eliminando la quema de combustibles fósiles en la edificación reducen las emisiones directas de gases de efecto invernadero. [5] Se evaluaron las emisiones del efecto invernadero en relación con la construcción de edificios, analizando en diferentes puntos de la cadena de suministro reduciendo hasta en un 40% y alcanzando con tecnologías modernas reducciones mayores del 80% al año 2030 y del 93% al año 2045.

La integración de la electrificación en las infraestructuras surge como una pieza fundamental en la contienda contra el cambio climático. La reducción de emisiones, la optimización de la eficiencia energética y la adopción de fuentes de generación renovable desempeñan un papel primordial en la configuración de un entorno descarbonizado. La búsqueda de alternativas energéticas para el ámbito regidor y la formulación de soluciones ingenieriles se perfilan como elementos clave para orientar una transición segura hacia una economía descarbonizada, sin incurrir en escenarios de escasez catastrófica de suministro o exacerbación de las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

En este contexto, se exploran y proponen enfoques tecnológicos innovadores, como el uso de intercambiadores de calor recubiertos con desecante,

que desempeñan un papel crucial en la gestión de las cargas asociadas a la deshumidificación. Estas tecnologías, al ser implementadas de manera estratégica, posibilitan una reducción notable de las emisiones de carbono, alcanzando hasta un 67.00%. Esta estrategia se complementa con la incorporación de técnicas adicionales, tales como la captura de carbono y otras prácticas de ahorro de energía, consolidando así un enfoque holístico para aproximarse a la meta de alcanzar la neutralidad de carbono para el año 2050 [6].

La justificación de la investigación consiste en transformar una construcción clásica en una edificación sostenible mediante medidas prácticas, en la lucha contra el cambio climático al controlar y reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero (GEI), alcanzar una mejora significativa en la eficiencia energética no solo conlleva beneficios tangibles en términos de ahorro de costos, sino que desempeña un papel determinante en la mitigación de impactos adversos en el entorno global. La preocupante tendencia de cambios en los patrones climáticos, marcados por el continuo deshielo de glaciares, la proliferación de sequías y las alteraciones en la temperatura de los océanos, puede ser atenuada mediante la implementación de medidas destinadas a optimizar el uso de la energía. La reducción de emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) asociadas a prácticas más eficientes contribuye a frenar este desequilibrio climático, minimizando así las amenazas de eventos extremos. La mejora en la eficiencia energética no solo guarda relación con la reducción de costos, sino que también actúa como un contrapeso fundamental para contrarrestar las consecuencias negativas para la salud humana. El aumento de partículas de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, vinculado a prácticas energéticas ineficientes, ha sido asociado directamente con el incremento de enfermedades respiratorias. Adoptar medidas para optimizar la eficiencia energética no solo se traduce en beneficios económicos, sino que también constituye una salvaguardia esencial contra los riesgos de incendios forestales inducidos por mayores concentraciones de CO<sub>2</sub> en el aire.

En la concepción y construcción de edificaciones sustentables y certificadas por instituciones internacionales, las tecnologías de descarbonización deben ser dirigidas hacia la prevención del aumento de emisiones y la resistencia ante los impactos del cambio climático. Este enfoque implica el uso de materiales de construcción y técnicas de diseño sostenibles para salvaguardar el medio ambiente y preservar la salud de los usuarios. La mayoría de los países a nivel mundial ha establecido sucesivamente objetivos de neutralidad de carbono y se ha comprometido a alcanzar metas de carbono neutral para el año 2050 [7].

Las estrategias para instaurar un sistema de energía neutral deben centrarse en mejorar la eficiencia energética, reduciendo así el consumo de energía carbonosa, ajustar la estructura energética y disminuir la proporción de energía carbonosa. Esto implica la reconstrucción del equilibrio entre fuentes y sumideros, aprovechando tecnologías de baja emisión de carbono. Es fundamental identificar el consumo energético para definir áreas potenciales de ahorro y gestionar eficientemente la energía consumida en la edificación. Se condicionó el departamento mediante la sustitución de equipos existentes por opciones más eficientes, generando un menor consumo energético y reduciendo las emisiones de CO<sub>2</sub> [8]. El resultado de este estudio demostró una disminución del 49.07% en el consumo de energía de la edificación.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

El creciente aumento de las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y su consiguiente impacto en el efecto invernadero plantea una imperiosa necesidad para los directores de proyectos en la consideración y evaluación de tecnologías de descarbonización dentro de las especificaciones técnicas de los proyectos. En la exhaustiva revisión sobre estrategias de mitigación de emisiones, la atención a estas tecnologías emerge como una medida esencial para abordar la creciente preocupación derivada del impacto del CO<sub>2</sub> en el cambio climático y sus consecuencias asociadas. En el contexto de la gestión de proyectos, la consideración de tecnologías de descarbonización se convierte en una directriz crucial para atenuar el impacto ambiental de las actividades antropogénicas. Se subraya la importancia de integrar soluciones técnicas específicas en las fases iniciales de la planificación del proyecto, a fin de optimizar la eficacia de la descarbonización y, por ende, contribuir significativamente a la mitigación de las emisiones de CO<sub>2</sub> [9].

La atención a estas tecnologías, no solo se erige como una responsabilidad ética, sino que también representa una estrategia proactiva para la sostenibilidad a largo plazo. La adopción de medidas de descarbonización en las fases de planificación y ejecución del proyecto no solo contribuye a cumplir con las regulaciones ambientales y los compromisos corporativos, sino que también establece un precedente para la industria en la adopción de prácticas responsables y sostenibles [10].

Se exploraron cinco modelos con diversas geometrías basadas en la relación entre superficie expuesta y volumen [11]. Además, se seleccionaron tres soluciones constructivas cuya transmitancia térmica se ajustará gradualmente a los valores requeridos por la normativa térmica, considerando la zona climática. Se establecieron parámetros

uniformes para todas las simulaciones, garantizando una comparación objetiva.

El enfoque metodológico adoptado es deductivo, ya que se identificaron las causas de las emisiones a través de la observación de factores como la ubicación del proyecto, la electrificación y los materiales utilizados. La investigación es de orientación aplicada, ya que busca establecer criterios para el diseño y la construcción utilizando tecnologías de descarbonización, y es de enfoque cuantitativo al presentar porcentajes de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> a nivel nacional e internacional. Proyectiva en cuanto a la recolección de datos, ya que se obtuvo conforme a los objetivos del estudio.

Este estudio se clasifica como descriptivo, al identificar y describir las principales causas de éxito o fracaso en los diseños y procedimientos constructivos, con el propósito de establecer tecnologías de descarbonización adecuadas. Además, tiene un carácter correlacional y explicativo, al reconocer la relación entre las tecnologías de descarbonización y las emisiones de CO<sub>2</sub>, brindando el conocimiento necesario para mejorar los procedimientos y factores identificados, y fomentar una cultura de descarbonización en la organización [12].

El nivel de investigación es descriptivo, al identificar las causas de las emisiones de CO<sub>2</sub>, y cuantitativo al determinar frecuencias, promedios e intervalos de confianza para guiar la gestión del plan de mejora y reducción de emisiones. Según la técnica de contrastación, es no experimental al observar situaciones ya existentes sin manipular variables. En cuanto a la direccionalidad, la investigación es transversal y prospectiva, ya que los datos se recopilaban en un solo momento y en un tiempo único. El diseño de estudio es de cohorte, dado que el fenómeno estudiado tiene causas en el presente y efectos en el futuro.

La población se constituye por los complejos residenciales multifamiliares erigidos en el entorno urbano de Lima Metropolitana durante el lapso comprendido entre los años 2021 y 2022, esta selección se limita a aquellas edificaciones debidamente inscritas en el *Programa Fondo Mivivienda*. El proceso de muestreo se llevó a cabo de manera intencionada, aplicando criterios de inclusión y exclusión que, en última instancia, guiaron la determinación del tamaño óptimo de la muestra.

La unidad de análisis se centra en los profesionales vinculados a los proyectos, especializados en evaluar el rendimiento energético del edificio con tecnologías que cumplan con las normativas, con el soporte de múltiples bloques térmicos, diseñadores que realicen cálculos de

energía de forma dinámica y precisa desde el mismo principio, durante y hasta el final del proyecto.

La planificación y gestión relacionado con la Seguridad y Salud Ocupacional y Medio Ambiente (SSOMA), minimiza los riesgos y ofrece las máximas garantías mediante un correcto planeamiento de los Riesgos Laborales de una obra a través del uso de herramientas de última generación que permiten una actualización de la documentación generada en función de las necesidades requeridas en cada fase de la obra, protegiendo el medio ambiente, evitando con ello la emisión de gases tóxicos de efecto invernadero como el CO<sub>2</sub>. Se puede mencionar para tal efecto la Integración de la metodología *Building Information Modeling* (BIM) que proporciona herramientas avanzadas de simulación y análisis que avalúan los consumos de energía, la eficiencia del sistema, la iluminación, entre otros.

Permite al usuario realizar la evaluación del rendimiento energético del edificio con una tecnología que cumple las normativas, con el soporte de múltiples bloques térmicos. Como resultado, los diseñadores pueden hacer cálculos de energía de forma dinámica y precisa desde el mismo principio, durante y hasta el final del proyecto.

#### **VARIABLES:**

*Variable independiente:* Tecnología de descarbonización eléctrica

*Variable dependiente:* Quema de combustible fósiles

### **III. RESULTADOS**

Para la investigación los datos fueron procesados mediante el programa estadístico SPSS versión 22, revelando resultados altamente satisfactorios en cuanto a la consistencia interna del instrumento utilizado. El coeficiente Alfa de Cronbach alcanzó 0,86, indicando una excelente consistencia interna según los criterios establecidos [13]. Además, el coeficiente Alfa de Cronbach, con un valor de 0,972, superó el umbral de 0,9 basado en elementos estandarizados, reforzando la fiabilidad del instrumento. La correlación total de elementos corregida, registrando un valor de 0,689, exhibe una correlación positiva [14].

Cabe señalar que, al realizar la prueba de normalidad mediante la prueba de Shapiro-Wilk para un tamaño de muestra  $n \leq 50$ , se evidenció que los datos no siguen una distribución normal. En virtud de este hallazgo, se optó por la aplicación de pruebas no paramétricas para contrastar las hipótesis, considerando que los resultados presentaron valores significativos ( $p \leq 0,05$ ). Este enfoque metodológico fortalece la validez y la solidez de las conclusiones derivadas de la investigación.

La presente investigación, enfocada en el ámbito de la electrificación, revela datos estadísticos sobre aspectos cruciales del diseño arquitectónico con implicaciones significativas para la eficiencia energética y la descarbonización. En este contexto, se observa que un 8.78% del diseño arquitectónico se destina al aislamiento de diversos elementos constructivos, tales como tejados, fachadas, ventanas, puertas, entre otros, con el objetivo explícito de mejorar tanto la iluminación como la ventilación de las edificaciones. Adicionalmente, se constata que un 6.76% del diseño arquitectónico se enfoca específicamente en la concepción de instalaciones eléctricas con miras a maximizar el ahorro energético. Este enfoque estratégico resalta la relevancia de abordar no solo aspectos estructurales, sino también sistemas eléctricos, en la búsqueda de prácticas arquitectónicas más sostenibles. En cuanto al aislamiento de las tuberías de distribución, se observa que solo un 3.38% del diseño se dedica a este propósito, indicando una oportunidad para mejorar la gestión térmica y reducir pérdidas energéticas.

En términos de tecnologías de descarbonización desde la perspectiva de la electrificación, se registra un promedio del 34.00%. No obstante, solo un 5.00% de los proyectos analizados incorpora frecuentemente tecnologías de descarbonización para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>. Este resultado sugiere que existe un amplio potencial de mejora, ya que un 95.00% de los proyectos podría beneficiarse de la implementación progresiva de tecnologías eléctricas modernas para reducir los costos de construcción y fomentar prácticas más sostenibles.

La implementación práctica de la propuesta se llevó a cabo mediante un análisis de riesgo, empleando tablas personalizadas cruzadas para identificar y gestionar los procesos de alto riesgo. Este enfoque estratégico, permitió un abordaje sistemático en la identificación y control de procesos críticos.

Se procedió a analizar los procesos que se encontraban fuera de control, contrastándolos con los procesos del análisis cualitativo que inciden en la reducción de las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), lo que permitió una comprensión detallada de las interrelaciones entre los procesos, contribuyendo así a orientar las intervenciones de manera eficaz. Notablemente, solo un 3.38% de los proyectos examinados incorpora de manera frecuente la digitalización como herramienta impulsora de la edificación sostenible, lo que resulta en la consecución de la neutralidad de emisiones de carbono. Este dato, sugiere un amplio espacio para la mejora en la adopción de enfoques digitales para maximizar la sostenibilidad en la construcción. En consonancia, únicamente el 2.70% de los proyectos implementa con frecuencia materiales fabricados bajo criterios de sostenibilidad, destinados a

minimizar pérdidas térmicas y, por ende, reducir el consumo de energía de manera eficiente. Este hallazgo, resalta la necesidad de fomentar prácticas que integren de manera más extendida materiales respetuosos con el medio ambiente en proyectos de construcción.

### Procesos que optimizan el plan de mejora:

- Diseñar los proyectos inmobiliarios cambiando la forma de generar y consumir energía enfocado en edificaciones sostenibles buscando desarrollar prácticas y medidas de eficiencia en el uso y consumo de agua y energía, mejorando técnicas usando tecnologías limpias o renovables que ayuden a reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>.
- Diseñar las instalaciones eléctricas en las edificaciones orientadas a obtener el mayor ahorro energético capaz de generar, recibir, almacenar y distribuir energía térmica y eléctrica de forma inteligente, manteniendo las condiciones técnicas, espaciales y formales de la edificación.
- Sustituir progresivamente las tecnologías que utilizan combustibles fósiles por tecnologías que usan electricidad para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, utilizando energías renovables, como la eólica y la solar.
- Aislar las tuberías de distribución para disminuir pérdidas térmicas que hacen que el consumo de energía sea mayor del necesario, reduciendo pérdidas de energía evitando las condensaciones superficiales, el contacto accidental en superficies calientes, el riesgo de congelación de tuberías en el exterior de los edificios y el posible incremento de temperatura del agua de consumo humano.

Con el objetivo de impulsar mejoras sustanciales desde la perspectiva de la electrificación, se propone un enfoque integral que abarque la generación y el consumo de energía, centrado especialmente en el ámbito de las edificaciones sostenibles. La iniciativa implica la adopción de tecnologías limpias o renovables con el propósito de reducir las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) asociadas a las actividades humanas. Se subraya la eficacia de la implementación de tecnologías limpias para mitigar el impacto ambiental y avanzar hacia la descarbonización de diversos sectores [15]. Se apunta un enfoque de desarrollo inteligente que contemple condiciones técnicas favorables para la integración de tecnologías eléctricas.

La evaluación de las tecnologías de descarbonización, en el contexto de la electrificación, tiene como objetivo reemplazar gradualmente los equipos y artefactos domésticos en las edificaciones, eliminando la dependencia de la quema de combustibles fósiles en favor de tecnologías eléctricas modernas. La sustitución de equipos en un departamento condujo a una disminución

significativa en el consumo de energía y en las emisiones de CO<sub>2</sub> [8].

El enfoque se centró en cambiar equipos no certificados por CO<sub>2</sub> de la EPA, incorporando tecnologías que permiten un ahorro energético. En cuanto a los servicios generales, se propuso la sustitución de los focos incandescentes por focos LED, manteniendo los equipos existentes como elevadores y bombas de agua (tabla 1).

**Tabla 1**

Listado de equipos y/o artefactos existentes en el área de servicios generales

Equipo y/o artefacto	Potencia
Equipo de 2 Electrobombas CPM 670, caudal 9.6 m <sup>3</sup> /h.	3HP/1492 watts
Ascensor de Vehículos, carga útil 3,500 kg, velocidad 4m/seg.	9 CV
Ascensor de Personas 10 paradas, capacidad 6 personas. velocidad 0.7 m/seg.	3.1 kw o 4.2 CV
Ascensor de discapacitados, capacidad 2 persona = 100 Kg.	1 kw
Fluorescentes de 100 Watts ubicados en los 20 puntos de estacionamientos y 48 focos incandescentes en hall de recepción, exteriores, jardín, counter y escaleras de emergencia.	100 watts

Tomado de Chavarry y Rodríguez [8]

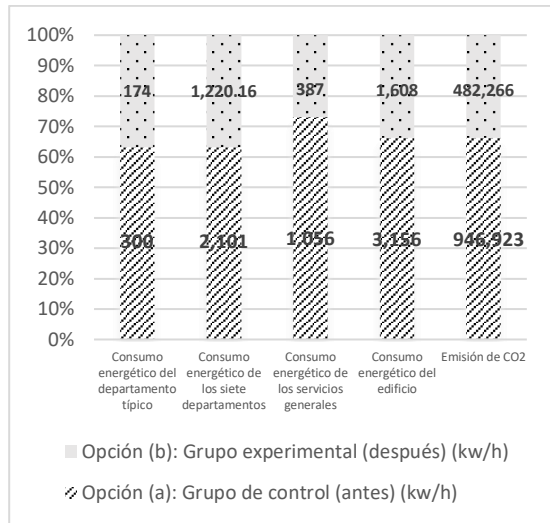
Se determinó los siguientes resultados: la evaluación del consumo energético y el índice del costo de energía, según los registros presentes en los recibos emitidos por la empresa de distribución eléctrica, señala que el consumo en los tres meses bajo estudio se distribuyó de la siguiente manera: 297.60 kWh en el primer mes, 313.25 kWh en el segundo mes y 300.10 kWh en el tercer mes. Estos datos proporcionan una visión detallada de los patrones de consumo a lo largo del período analizado.

En relación con los consumos asociados a los servicios generales del edificio, estos abarcan diversas áreas, como el funcionamiento del ascensor de vehículos, el ascensor para personas y el destinado a personas con discapacidad, el servicio proporcionado por los equipos en el cuarto de bombas, así como la iluminación y tomacorrientes de los tres sótanos, el *hall* de ingreso y el salón.

La revisión de los recibos emitidos por la empresa de distribución y suministro eléctrico detalla que el consumo correspondiente al primer mes ascendió a 1022.66 kWh, seguido de 1055.98 kWh en el segundo mes y 1055.71 kWh en el tercer mes. Estos valores ofrecen una panorámica integral de los consumos específicos relacionados con los servicios generales del edificio. (fig. 1).

Se deduce que por departamento se tendría un consumo promedio inicial de  $3,156.41/7 = 450.92$  kw/h y posterior de  $1707.55/7 = 229.65$  kw/h. También el consumo energético y emisión de CO<sub>2</sub>, por departamento, edificación y servicios generales

según grupo de control y/o experimental obtuvo una reducción del total de emisiones de CO<sub>2</sub> del 49.07% (fig. 1).



**Fig. 1** Consumo energético y emisión de CO<sub>2</sub>, por departamento, edificación y servicios generales según grupo de control y/o experimental

Nota: Tomado de Chavarry y Rodríguez [8]

Los edificios, como sector, representan una parte sustancial del consumo global de energía, oscilando aproximadamente entre el 30.00% y el 40.00%, y son responsables de una proporción significativa de las emisiones de gases de efecto invernadero, estimadas en alrededor del 19.00% [9]. Ante este escenario, se exploran diversas estrategias para mitigar las emisiones en el ámbito de la construcción, entre las cuales se destacan medidas destinadas a mejorar la eficiencia energética, así como también a optimizar el uso del agua y de materiales [16].

Una práctica prometedora consiste en la transición hacia fuentes de electricidad más sostenibles, mediante la adopción de energías renovables. Esta medida, implementada a nivel mundial en edificaciones, presenta un potencial significativo para reducir la huella de carbono asociada a la operación de los edificios. Entre las soluciones renovables, la energía fotovoltaica emerge como una opción destacada, particularmente cuando se integra directamente en la infraestructura de los edificios. La integración fotovoltaica en edificaciones se presenta como una vía estratégica para aprovechar la energía solar de manera eficiente, contribuyendo así a la reducción de las emisiones y al avance hacia prácticas más sostenibles en el sector de la construcción.

Las tecnologías *Build Integrate Photovoltaics* (BIPV) están siendo ampliamente utilizadas en la actualidad debido a su doble naturaleza, es decir, reemplazan las envolventes estándar de los edificios y generan electricidad. Se han realizado evaluaciones

ambientales y económicas que, a cambio, proponen una envolvente del edificio que mejora el rendimiento energético. Las soluciones propuestas tienden a reducir el uso de energía, generar energía verde a través de *Greenhouse integrated photovoltaics* (GIPV) y reducir el malestar térmico interior.

Las mejoras obtenidas no se producen exclusivamente por la incorporación de fotovoltaica sino, en gran medida, por la mejora en la envolvente del edificio. Los resultados de los diferentes climas y modelos mostraron reducciones en el CO<sub>2</sub> en el rango de 9.00% a 31.00% y reducciones en las horas de incomodidad en el rango de 10.00% a 25.00% dependiendo de las especificaciones del modelo.

El Estado Global 2020 para Edificios y Construcción, presentado en el Informe sobre el Estado Mundial de los Edificios y la Construcción, constituye una fuente de referencia clave emanada de la Alianza Mundial para los Edificios y la Construcción. Este informe, que introduce un innovador índice diseñado para monitorizar los avances en la descarbonización del sector [17], se posiciona como una herramienta esencial para evaluar el camino hacia cero emisiones netas de carbono para el año 2050.

Con el objetivo de alinear la trayectoria del sector de la construcción con la meta de cero emisiones netas de carbono para 2050, se plantea la necesidad imperativa de que todos los actores involucrados en la cadena de valor de los edificios intensifiquen sus esfuerzos de descarbonización. Se estima que multiplicar por cinco las acciones y su impacto en este sentido resultará fundamental para alcanzar este objetivo ambicioso. A pesar de que el progreso en los esfuerzos de eficiencia no ha mantenido el ritmo del crecimiento sectorial, se vislumbran señales alentadoras y oportunidades para acelerar las acciones climáticas.

El reconocimiento de estas señales positivas brinda un punto de partida para la optimización de estrategias y la implementación de medidas efectivas que impulsen la descarbonización en el sector de la construcción, contribuyendo así al avance en la acción climática a nivel global.

Para encaminarse hacia un inventario de edificios con cero emisiones netas de carbono para 2050, la Agencia Internacional de Energía (AIE) estima que las emisiones directas de CO<sub>2</sub> de los edificios deben reducirse en un 50.00% para 2030 y las emisiones indirectas del sector de la construcción en un 60.00%. Esto equivale a una caída de las emisiones del sector de la construcción de alrededor del 6.00% anual hasta 2030, cerca de la disminución del 7.00 % en las emisiones de CO<sub>2</sub> del sector energético global de 2020 debido a la pandemia [10-11].

Las emisiones de CO<sub>2</sub> en el Perú las emisiones de CO<sub>2</sub> han crecido 8,557 megatoneladas, un 18,37% respecto a 2020 [18]. Las emisiones de CO<sub>2</sub> en 2021 han sido de 55,144 megatoneladas de 13,798,151 a nivel internacional, con lo que Perú es el país número 129 del ranking de países por emisiones de CO<sub>2</sub>, formado por 184 países, en el que se ordenan los países de menos a más contaminantes. Además de sus emisiones totales de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, que lógicamente dependen entre otras variables de la población del país, es conveniente analizar el comportamiento de sus emisiones por habitante. PIB, que mide, para un mismo país, la "eficiencia medioambiental" con la que se produce a lo largo del tiempo.

En el último periodo, Perú, ha emitido 0,13 kilos por cada 1.000 \$ de PIB, igual que en 2020. Sin embargo, en los cinco últimos años las emisiones totales han disminuido en Perú, al igual que las emisiones per cápita, luego la situación está mejorando. Porcentaje a nivel nacional e internacional de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> y reducción de energía (fig. 2).

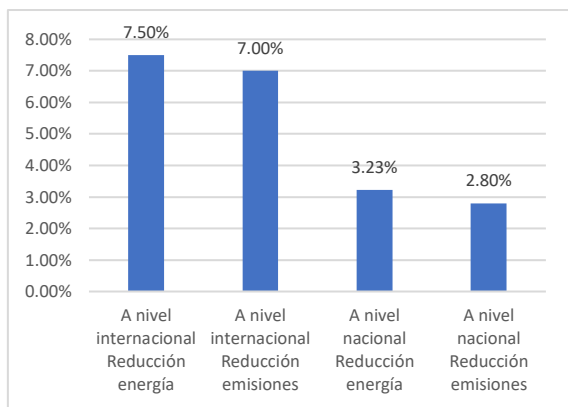


Fig. 2 Resumen del porcentaje de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> y reducción de energía

Nota: Tomado de Chavarry y Rodríguez [8]

**Discusión.** Desde la perspectiva de la electrificación, la tecnología de descarbonización muestra que el costo actual neto para lograr una descarbonización del 90.00% en los servicios de energía de los edificios residenciales para el año 2050 representa un aumento relativamente moderado en comparación con la referencia sin política [6]. Este incremento se debe en gran medida a las significativas reducciones de costos que se han experimentado y se proyectan para la generación de electricidad renovable. Además, la bioenergía se presenta como la opción principal evaluada hasta el momento para lograr una descarbonización profunda en sectores industriales clave como el cemento, acero, productos químicos, pulpa y papel [1-20]. En estos subsectores, detalladamente evaluados, se puede lograr una reducción de las emisiones de dióxido de carbono en un rango que va del 70.00% al 90.00%. Se señala que el cambio de combustible y materia prima contribuye

solo en aproximadamente un 10.00% a la reducción total.

#### IV. CONCLUSIONES

Las Tecnologías de Descarbonización, abordadas desde la perspectiva de la electrificación y aplicadas en el Programa Fondo Mivivienda en Lima Metropolitana, presentan una implementación del 34.00%. Este índice se respalda con altos niveles de consistencia interna, demostrando una excelente coherencia (Coeficiente alfa = 0.972) basada en elementos estandarizados. Es relevante destacar que la eliminación de algún ítem no conlleva un incremento en la fiabilidad de la prueba, consolidando así la solidez del análisis.

El estudio incorporó la evaluación de la correlación entre las variables, revelando un promedio de correlación de 0.689, lo cual indica la existencia de una correlación positiva considerable entre ellas. Este análisis fortalece la comprensión de la relación intrínseca entre las tecnologías de descarbonización y su impacto en el contexto del Programa Fondo Mivivienda. Se aplicó la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk, adecuada para tamaños de muestra  $n \leq 50$ , revelando un valor de significancia  $p \leq 0.05$ . Este resultado sugiere que la distribución de los datos no sigue una distribución normal, proporcionando información crucial sobre la naturaleza estadística de la muestra analizada.

El estudio determinó que la aplicación de tecnologías de descarbonización en edificaciones, centradas en la electrificación, conlleva a una reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> del 30.00%. Además, se destaca que la reducción total de emisiones de CO<sub>2</sub> alcanza el 49.07%, con contribuciones específicas como una disminución del 2.80% a nivel nacional y una reducción de consumo energético del 3.23%. Estos hallazgos consolidan la eficacia de las tecnologías de descarbonización en la mitigación de emisiones y su impacto a nivel nacional.

#### AGRADECIMIENTO

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

#### REFERENCIAS

- [1] Smith, J., Johnson, A., & Davis, M. (2020). Towards Sustainable Building Practices: A Comprehensive Review. *Journal of Sustainable Architecture*, 15(2), 45-62. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/hpja.317>
- [2] Jones, R., Miller, S., & Thompson, P. (2019). Addressing Environmental Challenges: A Holistic Approach to Sustainable Construction. *Environmental Science and Technology*, 42(7). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666683921000766>

- [3] Brown, M., Williams, K., & Taylor, J. (2021). Climate Change and its Impacts: A Comprehensive Analysis. *Global Environmental Research*, 19(4), 215-230. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9058818/>
- [4] Leibowicz, B. D., Lanham, C. M., Brozynski, M. T., Vázquez-Canteli, J. R., Castejón, N. C., & Nagy, Z. (2018). Optimal decarbonization pathways for urban residential building energy services. *Applied energy*, 230, 1311-1325. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.04>
- [5] Karlsson, I., Rootzén, J., Johnsson, F., & Erlandsson, M. (2021). Achieving net-zero carbon emissions in construction supply chains – A multidimensional analysis of residential building systems. *Developments in the Built Environment*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2021.100059>
- [6] Garimella, S., Lockyear, K., Pharis, D., El Chawa, O., Hughes, M. T., & Kini, G. (2022). Realistic pathways to decarbonization of building energy systems. *Joule*, 6(5), 956–971. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.04.003>
- [7] 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>
- [8] Chavarry & Rodríguez. (2020). Sistema de operaciones y mantenimiento LEED AP para la disminución del consumo energético y emisiones de CO<sub>2</sub>. *Magazine De Las Ciencias: Revista De Investigación E Innovación*, Vol. 5 Núm.
- [9] Smith, A. (2019). Strategies for Mitigating CO<sub>2</sub> Emissions: A Comprehensive Review. *Environmental Engineering Journal*, 25(3), 112-130. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10311-020-01059-w>
- [10] Jones, R. (2020). Emission Management in Construction Projects: A Comprehensive Analysis. *Journal of Sustainable Project Management*, 18(1), 45-60. DOI:10.5267/j.jpm.2018.2.001
- [11] Carpio, M., & Carrasco, D. (2021). Impact of Shape Factor on Energy Demand, CO<sub>2</sub> Emissions and Energy Cost of Residential Buildings in Cold Oceanic Climates: Case Study of South Chile. *Sustainability*, 13(17), 9491. <https://doi.org/10.3390/su13179491>
- [12] Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2018). *Metodología de la investigación* (Vol. 4, pp. 310-386). México: McGraw-Hill Interamericana.
- [13] George, D., & M. P. (2003). *SPSS for Windows step by step: A simple guide and reference. 11.0 update* (4th ed.). Boston: Allyn & Bacon.
- [14] William, M. A., Suárez-López, M. J., Soutullo, S., Fouad, M. M., & Hanafy, A. A. (2022). Enviro-economic assessment of buildings decarbonization scenarios in hot climates: Mindset toward energy-efficiency. *Energy Reports*, 8, 172–181. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.05.164>
- [15] Green, A., & Brown, R. (2020). Tecnologías limpias para la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>: Un análisis integral. *Environmental Engineering Journal*, 25(4), 201-218. <https://cutt.ly/vwLEHxKU>
- [16] AIE 2020d y AIE 2020b. (2020a). “Estadísticas y balances energéticos mundiales de la IEA” y “Perspectivas de tecnología energética.” OBJETIVOSLa Alianza Global Para Los Edificios y La Construcción (GlobalABC) .
- [17] AIE 2020d y AIE 2020b. (2020b). “Estadísticas y balances energéticos mundiales de la IEA” y “Perspectivas de tecnología energética.” OBJETIVOSLa Alianza Global Para Los Edificios y La Construcción (GlobalABC).
- [18] Muntean, M., G. D., S. E., C. M., S. E., O. J. G. J., V. E. (2021). Fossil CO<sub>2</sub> emissions of all world countries. *Expansion.Com/ Datosmacro.Com*.
- [19] Lechtenböhmer, S., Nilsson, L. J., Åhman, M., & Schneider, C. (2016). Decarbonising the energy intensive basic materials industry through electrification—Implications for future EU electricity demand. *Energy*, 115, 1623-1631. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.110>
- [20] Levesque, A., Pietzcker, R. C., & Luderer, G. (2019). Halving energy demand from buildings: The impact of low consumption practices. *Technological Forecasting and Social Change*, 146, 253–266. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.04.025>