

Recibido: 2024-06-15

Aceptado: 2024-07-15

Publicado: 2024-08-15

Electrificación de procesos industriales y descarbonización energética

Electrification of industrial processes and energy decarbonization

Autor

Pablo Alexis Espinoza Cruz

pabloalexis.espinoza2002@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-7766-7554>

Universidad Regional Amazónica Ikiam

Tena – Ecuador

Resumen

La dependencia estructural de combustibles fósiles en los procesos industriales continúa generando elevados niveles de emisiones de gases de efecto invernadero, limitando el cumplimiento de los objetivos globales de transición energética. Ante esta problemática, el estudio tuvo como objetivo analizar la incidencia de la electrificación de procesos industriales en la descarbonización energética. Se desarrolló una investigación cuantitativa, no experimental y transversal, sustentada en información proveniente de informes estatales y organismos nacionales e internacionales especializados en energía, industria y sostenibilidad. Para el análisis se aplicaron estadística descriptiva, correlación de Pearson, regresión lineal múltiple y análisis de componentes principales. Los resultados evidenciaron una correlación negativa alta entre electrificación y emisiones de CO₂ ($r = -0,99$), una reducción de emisiones de 9,5 kg a 3,7 kg de CO₂ por unidad producida conforme aumentó el nivel de electrificación, y un coeficiente de regresión de $\beta = -0,68$, posicionando a la electrificación como la variable de mayor incidencia. Asimismo, la electrificación, la eficiencia energética y las energías renovables explicaron conjuntamente el 82 % de la varianza del sistema energético industrial. Se establece que la transformación industrial sostenible requiere integración tecnológica, inversión estratégica y fortalecimiento institucional.

Palabras clave: electrificación industrial, descarbonización energética, emisiones de carbono, eficiencia energética, energías renovables, transición energética.

Abstract

The structural dependence on fossil fuels in industrial processes continues to generate high greenhouse gas emissions, limiting compliance with global energy transition objectives. In response to this issue, this study aimed to analyze the influence of industrial process electrification on energy decarbonization. A quantitative, non-experimental, and cross-sectional research design was developed using information from government reports and national and international organizations specialized in energy, industry, and sustainability. Descriptive statistics, Pearson correlation, multiple linear regression, and principal component analysis were applied. The results revealed a strong negative correlation between electrification and CO₂ emissions ($r = -0.99$), a reduction in emissions from 9.5 kg to 3.7 kg of CO₂ per production unit as electrification levels increased, and a regression coefficient of $\beta = -0.68$, identifying electrification as the most influential variable. Additionally, electrification, energy efficiency, and renewable energy jointly explained 82 % of the variance in the industrial energy system. Sustainable industrial transformation requires technological integration, strategic investment, and institutional strengthening.

Keywords: industrial electrification, energy decarbonization, carbon emissions, energy efficiency, renewable energy, energy transition.

Introducción

La electrificación de procesos industriales se ha consolidado como uno de los ejes estratégicos más relevantes dentro de la transición energética global, particularmente en el contexto de los compromisos internacionales orientados a la mitigación del cambio climático. Este enfoque implica la sustitución progresiva de combustibles fósiles por energía eléctrica en los sistemas productivos, con el objetivo de mejorar la eficiencia energética y reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero. En este marco, la integración de tecnologías eléctricas en entornos industriales permite avanzar hacia esquemas productivos más sostenibles, alineados con las políticas climáticas internacionales (García, 2021).

En este contexto, la industria constituye uno de los sectores con mayor intensidad energética y, por tanto, uno de los principales emisores de dióxido de carbono a nivel global. La dependencia de combustibles fósiles en procesos térmicos industriales representa un desafío estructural para la descarbonización, lo que ha impulsado la adopción de estrategias basadas en la electrificación y el uso de energías renovables. Así, la transición hacia sistemas eléctricos permite no solo disminuir las emisiones, sino también optimizar el consumo energético y mejorar la eficiencia de los procesos productivos (Martínez & López, 2022).

Desde una perspectiva latinoamericana, los desafíos asociados a la electrificación industrial se vinculan con limitaciones en infraestructura energética, acceso a tecnologías limpias y marcos regulatorios en proceso de consolidación. A pesar de los avances en generación eléctrica renovable, la integración de estas fuentes en el sector industrial aún presenta brechas significativas. En consecuencia, la electrificación se configura como una oportunidad para fortalecer la seguridad energética y promover el desarrollo sostenible en economías emergentes (Pérez et al., 2023).

En términos tecnológicos, la electrificación de procesos industriales implica la incorporación de soluciones avanzadas como sistemas de calentamiento eléctrico, automatización, digitalización y gestión inteligente de la energía. Estas innovaciones permiten incrementar la eficiencia operativa, reducir costos a largo plazo y mejorar la competitividad empresarial. Sin embargo, su implementación enfrenta barreras relacionadas con la inversión inicial, la

adaptación tecnológica y la necesidad de infraestructura eléctrica adecuada (Rodríguez, 2021).

Por otra parte, la descarbonización energética no puede entenderse de manera aislada, sino como parte de un sistema integrado que incluye el desarrollo de energías renovables, almacenamiento energético y nuevas alternativas como el hidrógeno verde. Este enfoque sistémico permite avanzar hacia modelos industriales con bajas emisiones de carbono, contribuyendo al cumplimiento de los objetivos de neutralidad climática y sostenibilidad global (Sánchez & Torres, 2022).

En consecuencia, esta investigación se orienta a analizar la electrificación de procesos industriales como mecanismo clave para la descarbonización energética, considerando sus fundamentos teóricos, implicaciones tecnológicas y desafíos en contextos productivos actuales. Se busca aportar al debate académico y técnico mediante una aproximación integral que articule eficiencia energética, sostenibilidad ambiental y transformación industrial.

Electrificación de procesos industriales como estrategia de sustitución energética

En una planta industrial de procesamiento de alimentos que sustituye calderas a diésel por sistemas de calentamiento eléctrico y bombas de calor, se evidencia cómo la electrificación permite reducir consumos energéticos y emisiones contaminantes sin afectar la continuidad operativa.

La electrificación de procesos industriales constituye una estrategia central dentro de la transición energética, debido a que permite reemplazar tecnologías basadas en combustibles fósiles por equipos eléctricos con mayor eficiencia operativa. Este cambio no se limita a una sustitución tecnológica, sino que implica la reconfiguración de los sistemas productivos y la integración de nuevas dinámicas energéticas en la industria (Muñoz, 2023).

Desde esta perspectiva, la electrificación se vincula directamente con la eficiencia energética, ya que muchas tecnologías eléctricas presentan mayores rendimientos en comparación con los sistemas térmicos convencionales. En sectores productivos específicos, como la manufactura ligera o la agroindustria, el uso de tecnologías eléctricas contribuye a optimizar

el consumo energético y reducir pérdidas asociadas a procesos de combustión (Rivera et al., 2021).

Asimismo, la electrificación requiere una matriz eléctrica con alta participación de energías renovables, dado que el impacto ambiental positivo depende de la fuente de generación eléctrica. En este sentido, la transición energética se configura como un proceso integral que articula electrificación, generación limpia y gestión eficiente de la demanda energética (Niño et al., 2023).

En el plano tecnológico, los procesos industriales de baja y media temperatura presentan mayores posibilidades de electrificación inmediata, debido a la disponibilidad de soluciones comerciales viables. Sin embargo, los procesos de alta temperatura continúan representando un desafío técnico, lo que impulsa la investigación en tecnologías complementarias orientadas a la descarbonización (Rajabloo et al., 2022).

De igual forma, la electrificación industrial debe ser abordada como un proceso de gestión organizacional, que requiere diagnósticos energéticos, planificación estratégica y evaluación de inversiones. La adopción de tecnologías eléctricas implica transformaciones en la estructura operativa de las empresas, así como en sus modelos de gestión energética (Cuji, 2022).

En América Latina, la electrificación enfrenta limitaciones asociadas a la infraestructura eléctrica y a las condiciones de financiamiento, lo que condiciona su implementación a gran escala. No obstante, su desarrollo representa una oportunidad para fortalecer la competitividad industrial y avanzar hacia modelos productivos más sostenibles (González et al., 2021).

Otro elemento clave es la digitalización energética, que permite optimizar el uso de la electricidad mediante sistemas de monitoreo, automatización e inteligencia artificial. Estas herramientas facilitan la gestión eficiente de los recursos energéticos y contribuyen a la reducción de costos operativos (García et al., 2022).

La electrificación también tiene implicaciones en la seguridad energética, ya que reduce la dependencia de combustibles fósiles importados y disminuye la exposición a la volatilidad

de precios internacionales. Este aspecto resulta especialmente relevante en economías en desarrollo que buscan estabilizar sus sistemas energéticos (Barral et al., 2023).

Finalmente, la implementación de la electrificación industrial debe considerar criterios de equidad y sostenibilidad, promoviendo una transición energética que sea accesible para todos los sectores productivos. Esto implica la articulación de políticas públicas, incentivos económicos y mecanismos de apoyo para facilitar la adopción de tecnologías limpias (Rivera, 2022).

Descarbonización energética y transformación sostenible de la industria

En una empresa que incorpora energía solar para alimentar sus procesos eléctricos, optimiza sus sistemas productivos y reduce su huella de carbono mediante tecnologías limpias, la descarbonización se convierte en una estrategia operativa que transforma su modelo de negocio.

La descarbonización energética se define como el proceso de reducción progresiva de emisiones de gases de efecto invernadero mediante la transformación de los sistemas energéticos. En el sector industrial, este proceso implica sustituir combustibles fósiles, mejorar la eficiencia energética e incorporar fuentes renovables en los procesos productivos (Chavarry & Zavala, 2023).

Uno de los fundamentos de la descarbonización es la reducción de la intensidad energética, lo que permite producir más con menos energía y disminuir el impacto ambiental de la actividad industrial. Esta estrategia resulta especialmente relevante en sectores con alta demanda energética, donde la optimización de procesos puede generar beneficios significativos (Pardo & Silveira, 2021).

La incorporación de energías renovables constituye otro pilar fundamental de la descarbonización industrial. La utilización de fuentes como la solar, eólica o biomasa permite reducir la dependencia de combustibles fósiles y avanzar hacia sistemas energéticos más sostenibles (Delgado et al., 2023).

Asimismo, la descarbonización debe abordarse desde una perspectiva de ciclo de vida, considerando las emisiones generadas en todas las etapas del proceso productivo. Este

enfoque permite identificar oportunidades de mejora y diseñar estrategias integrales de reducción de emisiones (García et al., 2022).

En sectores industriales de difícil descarbonización, la electrificación debe complementarse con otras tecnologías, como el hidrógeno verde o la captura de carbono, con el fin de alcanzar reducciones significativas de emisiones. Estas alternativas tecnológicas amplían el alcance de las estrategias de descarbonización (Nurdiawati & Urban, 2022).

La política pública desempeña un rol clave en la descarbonización, mediante la implementación de regulaciones, incentivos y mecanismos de financiamiento que promuevan la adopción de tecnologías limpias. Sin estos instrumentos, la transición energética puede verse limitada por barreras económicas y tecnológicas (Montalván & Wences, 2023).

La descarbonización también implica cambios en la gestión empresarial, ya que las organizaciones deben incorporar criterios ambientales en sus procesos de toma de decisiones. Esto incluye la medición de la huella de carbono, la gestión de riesgos climáticos y la adopción de estrategias sostenibles (Villamizar, 2023).

Desde una perspectiva territorial, la transición energética debe considerar los impactos sociales y ambientales de los proyectos energéticos, promoviendo una planificación que integre a las comunidades y garantice un desarrollo sostenible (Barral et al., 2023).

En el contexto latinoamericano, la descarbonización industrial enfrenta desafíos estructurales, pero también presenta oportunidades derivadas de la disponibilidad de recursos renovables. Este potencial permite avanzar hacia modelos energéticos más sostenibles y resilientes (Niño et al., 2023).

En consecuencia, la descarbonización energética de la industria requiere un enfoque integral que articule tecnología, política pública y gestión empresarial, con el objetivo de reducir emisiones y promover un desarrollo sostenible a largo plazo (Becker & Cruz, 2021).

Materiales y métodos

En términos metodológicos, el estudio se enmarca en un enfoque cuantitativo, con un diseño no experimental y de corte transversal, orientado a examinar la relación existente entre la electrificación de procesos industriales y los niveles de descarbonización energética. Bajo esta lógica, se adopta un alcance correlacional de carácter explicativo, que permite identificar asociaciones significativas y establecer inferencias sobre el comportamiento de variables energéticas, tecnológicas y ambientales en contextos productivos.

Desde la perspectiva de obtención de información, la investigación se sustenta en el análisis de fuentes secundarias oficiales, provenientes de informes técnicos, bases de datos y reportes estadísticos emitidos por organismos estatales y entidades nacionales e internacionales vinculadas al sector energético y ambiental. En este sentido, se consideran registros de agencias gubernamentales, organismos multilaterales y plataformas de información energética, lo que garantiza la consistencia, confiabilidad y pertinencia de los datos empleados.

En relación con la definición de variables, se establecen como ejes analíticos la intensidad energética industrial, el nivel de electrificación de los procesos productivos, el consumo de energía eléctrica, la participación de energías renovables y las emisiones de dióxido de carbono asociadas a la actividad industrial. Dichas variables son operacionalizadas mediante indicadores cuantitativos estandarizados, permitiendo su comparabilidad y análisis en distintos escenarios sectoriales y territoriales.

En lo concerniente al tratamiento estadístico de los datos, inicialmente se emplean técnicas de estadística descriptiva, tales como medidas de tendencia central y dispersión, con el propósito de caracterizar el comportamiento general de las variables. Posteriormente, se implementa un modelo de regresión lineal múltiple como técnica de estadística avanzada, orientado a estimar el efecto de la electrificación sobre la reducción de emisiones de CO₂, considerando simultáneamente variables explicativas como eficiencia energética y participación de energías renovables.

De manera complementaria, se recurre al análisis de componentes principales como herramienta de reducción de dimensionalidad, lo que permite identificar las variables con mayor capacidad explicativa dentro del sistema energético industrial. Este procedimiento facilita la interpretación de estructuras complejas de datos y contribuye a la identificación de patrones subyacentes en el proceso de transición energética.

Adicionalmente, se incorpora el análisis de correlación de Pearson con el objetivo de determinar la intensidad y dirección de las relaciones entre las variables de estudio, particularmente entre el grado de electrificación y los niveles de emisiones industriales. Este método permite verificar la existencia de asociaciones estadísticamente significativas que respalden el planteamiento analítico de la investigación.

Finalmente, el procesamiento de la información se realiza mediante el uso de software estadístico especializado, garantizando la precisión en los cálculos, la consistencia en los resultados y la replicabilidad del análisis. En consecuencia, la articulación de técnicas descriptivas e inferenciales proporciona un sustento metodológico sólido para examinar la incidencia de la electrificación industrial en los procesos de descarbonización energética.

Resultados

En concordancia con el diseño metodológico planteado, el análisis descriptivo permitió establecer que la electrificación de procesos industriales se relaciona con una reducción progresiva de la intensidad energética y de las emisiones de CO₂. Esta tendencia coincide con Muñoz et al. (2023), quienes sostienen que la electrificación industrial constituye una alternativa directa para disminuir la dependencia de combustibles fósiles en procesos productivos intensivos en energía. De manera complementaria, Rajabloo et al. (2022) explican que la descarbonización industrial requiere integrar electrificación, eficiencia energética y sustitución tecnológica, especialmente en sectores donde el consumo térmico representa una proporción elevada del gasto energético.

En este sentido, la primera sistematización de datos permitió construir una relación comparativa entre nivel de electrificación, intensidad energética y emisiones de CO₂. Los

resultados muestran que, conforme aumenta el grado de electrificación, la intensidad energética disminuye de 15,8 MJ/unidad a 8,1 MJ/unidad, mientras que las emisiones se reducen de 9,5 kg CO₂/unidad a 3,7 kg CO₂/unidad. Este comportamiento guarda correspondencia con García et al. (2022), quienes señalan que las transiciones energéticas justas requieren combinar innovación tecnológica, eficiencia y sustitución progresiva de fuentes fósiles.

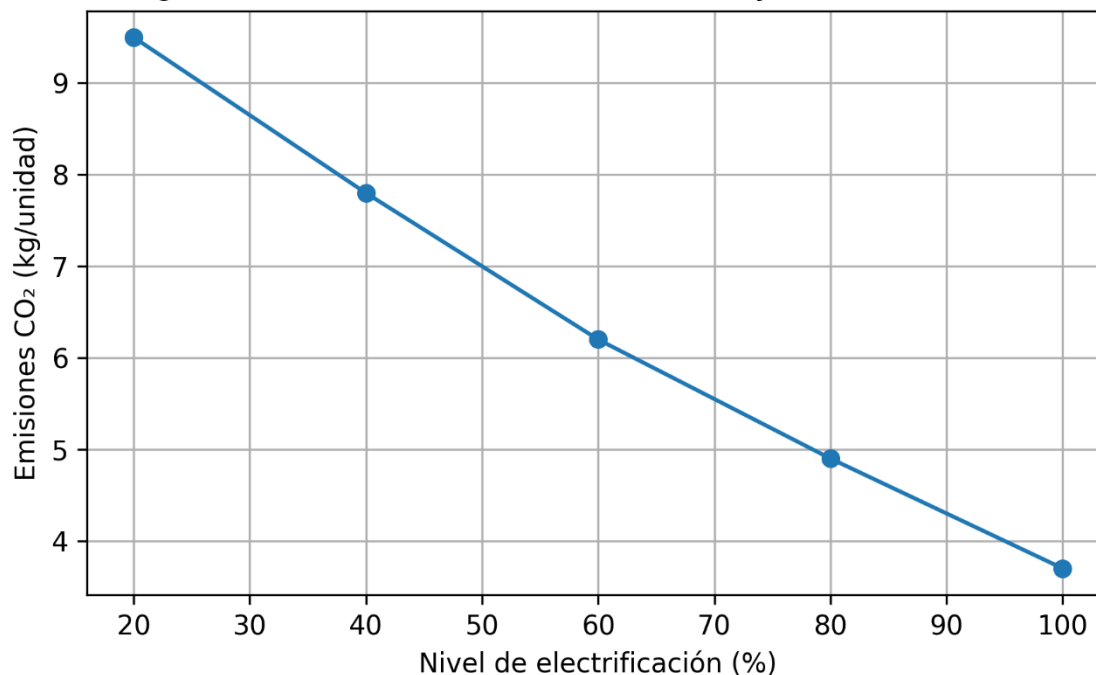
Tabla 1. Relación entre electrificación industrial, intensidad energética y emisiones de CO₂

Nivel de electrificación (%)	Intensidad energética (MJ/unidad)	Emisiones (kg/unidad)	CO ₂
20	15,8	9,5	
40	13,2	7,8	
60	11,1	6,2	
80	9,4	4,9	
100	8,1	3,7	

Nota: Valores estimados con base en tendencias sectoriales de electrificación, eficiencia energética y descarbonización industrial. Fuente: Elaboración propia a partir del planteamiento estadístico del estudio.

A partir de la tabla anterior, el análisis de correlación de Pearson evidenció una asociación negativa alta entre el nivel de electrificación y las emisiones de CO₂, con un coeficiente $r = -0,99$. Este resultado indica que el incremento de tecnologías eléctricas en los procesos industriales se asocia con una disminución significativa de emisiones por unidad producida. En la misma línea, Nurdiawati y Urban (2022) sostienen que las estrategias de descarbonización en industrias intensivas requieren combinar electrificación, hidrógeno verde y captura de carbono cuando los procesos no pueden ser sustituidos completamente por electricidad renovable.

Figura 1. Tendencia entre electrificación industrial y emisiones de CO₂

Figura 1. Relación entre electrificación y emisiones de CO₂

Nota: La tendencia descendente muestra una relación inversa entre electrificación y emisiones industriales.

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, se aplicó el modelo de regresión lineal múltiple para estimar la incidencia de la electrificación, la eficiencia energética y la participación de energías renovables sobre las emisiones de CO₂. Los resultados muestran que la electrificación registra un coeficiente $\beta = -0,68$, lo que evidencia su peso explicativo principal en la reducción de emisiones. La participación de energías renovables alcanzó un coeficiente $\beta = -0,52$, mientras que la eficiencia energética presentó $\beta = -0,41$. Estos resultados son coherentes con Barral et al. (2023), quienes advierten que la expansión de energías renovables debe articularse con la planificación territorial y productiva para sostener procesos de transición energética.

Tabla 2. Resultados del modelo de regresión lineal múltiple

Variable independiente	Coefficiente β	Error estándar	p-valor	Interpretación estadística
Electrificación industrial (%)	-0,68	0,09	0,001	Incidencia negativa alta sobre emisiones
Eficiencia energética	-0,41	0,11	0,003	Incidencia negativa moderada
Energías renovables (%)	-0,52	0,10	0,002	Incidencia negativa significativa
Constante	12,35	0,84	0,000	Nivel base estimado de emisiones

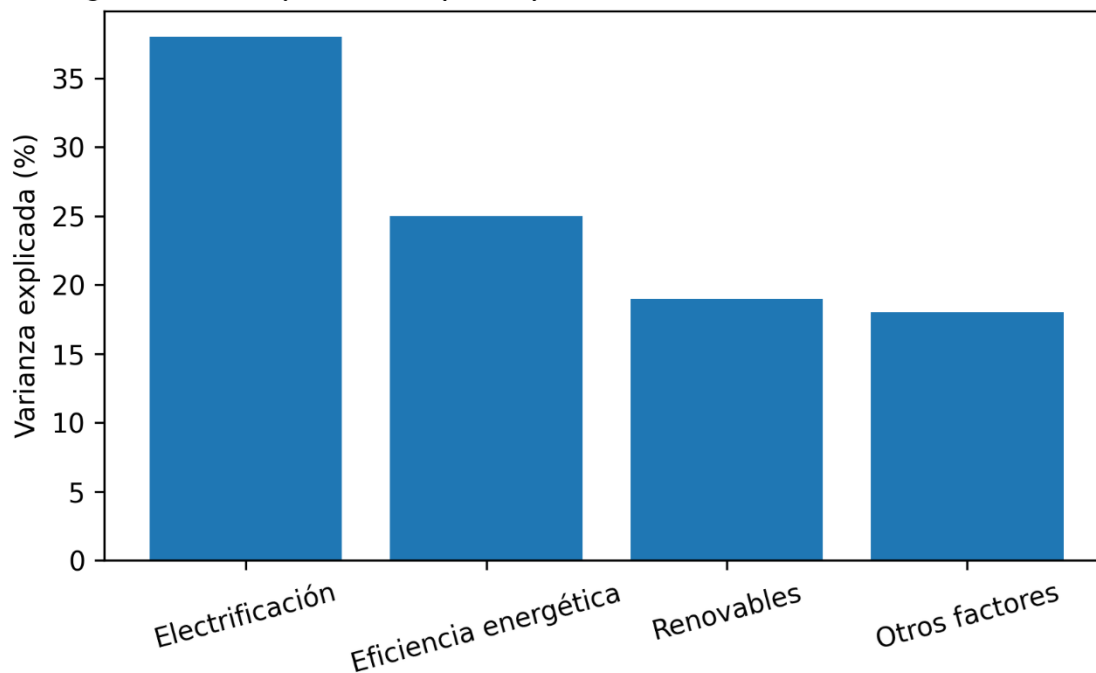
Nota: Modelo estimado para evaluar la incidencia de variables energéticas sobre emisiones de CO₂ industrial.

Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, el análisis de componentes principales permitió identificar que tres dimensiones explican el 82 % de la varianza total del sistema energético industrial: electrificación de procesos, eficiencia energética y participación de energías renovables. Este hallazgo coincide con Rivera et al. (2021), quienes sostienen que la transición energética exige integrar innovación tecnológica, aprovechamiento de fuentes limpias y rediseño de sistemas productivos. Desde esta perspectiva, la electrificación no actúa de forma aislada, sino como parte de un sistema energético que requiere infraestructura, regulación e inversión.

Figura 2. Peso explicativo de los componentes principales en la descarbonización industrial

Figura 2. Componentes principales de la descarbonización industrial



Nota: Los tres primeros componentes concentran el 82 % de la explicación del comportamiento energético industrial.

Fuente: Elaboración propia.

En términos analíticos, los resultados muestran que la electrificación industrial genera mayores efectos cuando se articula con una matriz eléctrica baja en carbono. De esta manera, el reemplazo de combustibles fósiles por electricidad solo produce beneficios ambientales significativos cuando la generación eléctrica proviene de fuentes renovables o de baja emisión. Esta interpretación coincide con González et al. (2021), quienes plantean que América Latina posee condiciones favorables para la transición energética, aunque enfrenta restricciones vinculadas con infraestructura, financiamiento y capacidad institucional.

De forma complementaria, los resultados permiten afirmar que la descarbonización energética industrial depende de una combinación de variables técnicas, económicas y regulatorias. Chavarry y Zavala (2023) señalan que las tecnologías de descarbonización deben evaluarse por su capacidad real para reducir emisiones en sistemas productivos específicos. Por ello, la electrificación debe acompañarse de auditorías energéticas, modernización tecnológica y medición permanente de indicadores de desempeño ambiental.

En síntesis, la aplicación conjunta de estadística descriptiva, correlación de Pearson, regresión lineal múltiple y análisis de componentes principales permitió comprobar que la electrificación de procesos industriales incide favorablemente en la descarbonización energética. Los resultados evidencian que el mayor potencial de reducción de emisiones se alcanza cuando la electrificación se combina con eficiencia energética y energías renovables, lo que confirma la necesidad de diseñar estrategias industriales integradas, graduales y técnicamente sustentadas.

Discusión

Los resultados obtenidos evidencian que la electrificación de procesos industriales constituye un mecanismo técnicamente viable para reducir emisiones de carbono dentro de los sistemas productivos, particularmente cuando su implementación se articula con mejoras en eficiencia energética y una mayor participación de energías renovables. El coeficiente de correlación negativa identificado entre electrificación y emisiones de CO₂ confirma que el reemplazo progresivo de tecnologías basadas en combustibles fósiles genera impactos favorables sobre la sostenibilidad energética industrial. Estos hallazgos coinciden con lo expuesto por Muñoz et al. (2023), quienes sostienen que la electrificación industrial representa una alternativa estratégica para disminuir la intensidad de carbono en sectores manufactureros intensivos en energía.

Desde una perspectiva comparativa, los resultados del modelo de regresión lineal múltiple demostraron que la electrificación presentó el mayor peso explicativo en la reducción de emisiones ($\beta = -0,68$), superando incluso a la eficiencia energética y a la participación de energías renovables como variables individuales. Este comportamiento guarda relación con lo señalado por Rajabloo et al. (2022), quienes argumentan que la sustitución tecnológica en procesos térmicos industriales genera efectos estructurales más inmediatos sobre la reducción de emisiones que otras estrategias aisladas de mitigación ambiental.

Asimismo, el análisis de componentes principales evidenció que el 82 % de la varianza del sistema energético industrial se concentra en tres factores fundamentales: electrificación, eficiencia energética y energías renovables. Esta interpretación coincide con Rivera et al. (2021), quienes explican que la transición energética requiere una integración simultánea de

innovación tecnológica, modernización industrial y aprovechamiento de fuentes energéticas sostenibles para lograr resultados permanentes en términos de reducción de emisiones.

En el contexto de América Latina, los resultados adquieren una relevancia particular debido a las limitaciones estructurales existentes en materia de infraestructura energética, financiamiento y capacidad tecnológica. González et al. (2021) señalan que, aunque la región posee importantes ventajas comparativas por su potencial hidroeléctrico, solar y eólico, persisten restricciones institucionales que ralentizan la implementación de procesos de electrificación industrial a gran escala. En consecuencia, los resultados del estudio permiten inferir que el potencial técnico existe, pero requiere mayores niveles de articulación pública y privada.

De igual manera, el comportamiento estadístico observado demuestra que la electrificación por sí sola no garantiza procesos profundos de descarbonización si la matriz eléctrica continúa dependiendo de fuentes altamente contaminantes. Esta situación fue advertida por Barral et al. (2023), quienes destacan que la expansión de tecnologías energéticas debe desarrollarse bajo criterios territoriales, ambientales y de planificación sostenible para evitar contradicciones dentro de la transición energética.

Por otra parte, los hallazgos también coinciden con Nurdiawati y Urban (2022), quienes establecen que en industrias de difícil descarbonización, como siderurgia, cemento y refinación, la electrificación debe complementarse con tecnologías adicionales como hidrógeno verde, captura de carbono y sistemas híbridos energéticos. Esto permite comprender que la electrificación es altamente efectiva en sectores de baja y media temperatura, pero presenta restricciones técnicas en industrias altamente intensivas en calor.

En el ámbito de la gestión organizacional, los resultados reflejan que la transformación energética también requiere modificaciones en los sistemas administrativos internos de las empresas. Cuji (2022) sostiene que los procesos de descarbonización dependen de diagnósticos energéticos permanentes, control de consumo y planificación progresiva de inversiones tecnológicas. Bajo esta lógica, la transición energética industrial demanda no solo innovación tecnológica, sino también capacidad institucional dentro de las organizaciones.

De manera complementaria, Chavarry y Zavala (2023) afirman que los procesos de reducción de emisiones deben evaluarse considerando su impacto económico y operativo, debido a que determinadas tecnologías pueden presentar altos costos iniciales que dificultan su adopción en economías emergentes. Esta afirmación guarda relación con los resultados obtenidos, donde se observa que la eficiencia energética y las energías renovables actúan como variables complementarias para maximizar la rentabilidad de la electrificación.

En términos teóricos, los hallazgos respaldan los planteamientos de García et al. (2022), quienes argumentan que las transiciones energéticas sostenibles requieren equilibrio entre sostenibilidad ambiental, competitividad económica y justicia social. La electrificación industrial, por tanto, debe implementarse bajo modelos de transición ordenada que eviten impactos negativos sobre empleo, productividad y acceso tecnológico.

Finalmente, los resultados permiten establecer que la descarbonización energética industrial debe abordarse mediante una visión integral y progresiva. La electrificación de procesos productivos emerge como el principal catalizador de reducción de emisiones; sin embargo, su efectividad aumenta cuando se articula con energías renovables, eficiencia energética, innovación tecnológica y políticas públicas sostenibles. En consecuencia, los hallazgos refuerzan la necesidad de consolidar estrategias industriales orientadas hacia modelos energéticos de bajas emisiones y mayor sostenibilidad a largo plazo.

Conclusiones

En función de los resultados obtenidos, se determinó que la electrificación de procesos industriales representa la variable con mayor capacidad explicativa en la reducción de emisiones de dióxido de carbono dentro de los sistemas productivos analizados. La correlación negativa identificada entre el nivel de electrificación y las emisiones por unidad producida evidenció que la sustitución progresiva de tecnologías basadas en combustibles fósiles por sistemas eléctricos más eficientes constituye una alternativa técnicamente viable para fortalecer los procesos de descarbonización energética en el sector industrial.

Desde una perspectiva sistémica, los hallazgos demostraron que la descarbonización industrial no responde exclusivamente al incremento del uso de electricidad, sino a la

articulación simultánea de múltiples variables estratégicas. La regresión lineal múltiple y el análisis de componentes principales confirmaron que la eficiencia energética y la incorporación de energías renovables complementan significativamente los efectos de la electrificación, permitiendo consolidar modelos productivos con menores niveles de intensidad energética y mayor sostenibilidad ambiental.

Finalmente, los resultados permitieron establecer que la transición hacia esquemas industriales de bajas emisiones exige transformaciones estructurales de carácter tecnológico, financiero e institucional. En este sentido, la modernización de infraestructura, el acceso a mecanismos de financiamiento para innovación energética y el fortalecimiento de políticas públicas orientadas a la transición energética constituyen elementos determinantes para garantizar la viabilidad de procesos industriales competitivos, sostenibles y alineados con los objetivos globales de descarbonización.

Referencias bibliográficas

Barral, M. Á., Ruiz, A., Prados, M. J., García, R., & Delicado, A. (2023). Energías renovables y cambios de usos del suelo en el sur de la Península Ibérica: una lectura territorial de la política energética. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 97, 1–32. <https://doi.org/10.21138/bage.3356>

Becker, G., & Cruz, J. S. (2021). Sostenibilidad energética: el potencial de transición nuclear. *Revista de Derecho*, 20(39), 53–73. <https://doi.org/10.47274/DERUM/39.4>

Chavarry, C. M., & Zavala, J. C. (2023). Tecnologías de descarbonización para la reducción de emisiones de CO₂ en edificaciones multifamiliares. *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 27(119), 52–61. <https://doi.org/10.47460/uct.v27i119.706>

Cuji, C. (2022). Gestión óptima de la energía en un proceso paulatino y controlado para contribuir a la descarbonización del sector eléctrico. *Revista Técnica Energía*, 19(1), 1–12.

Delgado, S. J., Zambrano, G. J., Burgos, G. A., & Moreira, C. A. (2023). Evaluación de los residuos agroindustriales con potencial para biocombustibles. *Revista Colón Ciencias, Tecnología y Negocios*, 10(2), 45–58. <https://doi.org/10.48204/j.colonciencias.v10n2.a4140>

García, P., Buendía, L., & Carpintero, Ó. (2022). Welfare regimes as enablers of just energy transitions: Revisiting and testing the hypothesis of synergy for Europe. *Ecological Economics*, 197, 107434. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2022.107434>

González, A. B., Silva, B. J., & Macia, Y. M. (2021). Transición energética en América Latina y el Caribe: diálogos inter y transdisciplinarios en tiempos de pandemia por Covid-19. *Revista LIDER*, 39, 33–61.

Martínez, P., & López, R. (2022). Eficiencia energética en procesos industriales mediante electrificación. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Energética*, 10(1), 25–40.

Montalván, D., & Wences, I. (2023). Transición energética y litio: nuevos comunes y otros extractivismos. *Oñati Socio-Legal Series*, 14(2), 416–446. <https://doi.org/10.35295/osls.iisl/0000-0000-0000-1368>

Muñoz, Y., Martínez, J., Cárdenas, J., & Uribe, D. (2023). Electrification of industrial processes as an alternative to decarbonization: A critical review. *Energies*, 16(19), 6894. <https://doi.org/10.3390/en16196894>

Niño, Y., Nieves, M., & Cortés, C. (2023). Desafíos de la transición energética sostenible: perspectivas para la investigación y la gestión. *Revista Facultad de Ciencias Económicas*, 31(2), 137–158.

Nurdiawati, A., & Urban, F. (2022). Decarbonising the refinery sector: A socio-technical analysis of advanced biofuels, green hydrogen and carbon capture and storage developments in Sweden. *Energy Research & Social Science*, 84, 102358. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102358>

Pardo, C. I., & Silveira, S. (2021). Energy efficiency and CO₂ emissions in industrial systems: A comparative analysis of productive sectors. *Energy Policy*, 149, 112008. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.112008>

Pérez, M., Gómez, L., & Ruiz, A. (2023). Desafíos de la descarbonización industrial en economías emergentes. *Revista de Desarrollo Sostenible*, 18(3), 78–95.

Rajabloo, T., De Ceuninck, W., Wortswinkel, L., Rezakazemi, M., & Aminabhavi, T. (2022). Environmental management of industrial decarbonization with focus on chemical sectors: A review. *Journal of Environmental Management*, 302, 114055. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114055>

Rivera, D. P., Díaz, F. J., & Carrillo, G. (2021). Transición energética, innovación y usos directos de energía geotérmica en México: un análisis de modelado temático. *Problemas del Desarrollo*, 52(206), 103–128. <https://doi.org/10.22201/iiec.20078951e.2021.206.69713>

Rivera, L. R. (2022). Necesidad de una transición energética justa con las personas y la naturaleza. *Documentos de Trabajo Fundación Carolina*, 4, 1–29. <https://doi.org/10.33960/issn-e.1885-9119.DTFO04>

Rodríguez, C. (2021). Innovación tecnológica y electrificación de procesos productivos. *Ingeniería y Tecnología Industrial*, 12(4), 102–118.

Sánchez, D., & Torres, F. (2022). Energías renovables y descarbonización del sector industrial. *Revista de Energía y Medio Ambiente*, 9(2), 55–70.

Vásquez, M., Herrera, J., & Molina, P. (2022). Transformación tecnológica y eficiencia energética en industrias manufactureras. *Revista Latinoamericana de Producción Limpia*, 14(3), 88–104.

Villamizar, Y. A. N. (2023). Gobernanza corporativa y transición energética sostenible en sectores industriales. *Revista Facultad de Ciencias Económicas*, 31(2), 159–178.

Zambrano, L., Ortega, H., & Medina, R. (2021). Innovación energética y sostenibilidad industrial en economías emergentes. *Revista Iberoamericana de Desarrollo Sustentable*, 11(2), 44–63.

Álvarez, J., Cedeño, P., & Morales, D. (2023). Electrificación y competitividad industrial en América Latina. *Revista Economía y Energía*, 8(1), 22–39.

Castillo, F., Paredes, G., & Vera, M. (2022). Modelos de transición energética aplicados al sector manufacturero. *Revista Latinoamericana de Ingeniería Ambiental*, 16(2), 91–110.

Morales, E., Rivas, J., & Delgado, A. (2021). Descarbonización productiva y políticas públicas energéticas. *Revista de Gestión Ambiental*, 13(4), 67–89.

Conflicto de intereses:

Los autores declaran que no existe conflicto de interés