

A systematic review of the literature: Impact of renewable energies to reduce the effects of carbon footprint in the Manufacturing Industry

Casahuaman Arias, Anggie Liliana¹  Quiroz Llapapasca, Angel Gabriel² 

U19304710@utp.edu.pe, U20301147@utp.edu.pe,

Universidad Tecnológica del Perú, Lima-Perú

Abstract– This systematic review aims to investigate how renewable energies influence the reduction of the carbon footprint and its effects in the manufacturing field, to do so the PRISMA technology has been used, and 26 articles have been analyzed, which mention the types of renewable energies, limitations, benefits, applied context and the percentage of the carbon footprint reduction. The studies highlight that photovoltaic energy, solar energy and biomass are the most effective for achieving the objective mentioned in the research. Finally, a section is developed where the results of the PRISMA investigation are compared, and final conclusions and recommendations are given.

Keywords-- Carbon footprint, Air pollution, Renewable energies, Manufacturing industry, Carbon Management

Una (RSL): Impacto de las energías renovables para reducir los efectos de la Huella de Carbono en la Industria Manufacturera

Casahuaman Arias, Anggie Liliana¹  Quiroz Llapapasca, Angel Gabriel² 
U19304710@utp.edu.pe, U20301147@utp.edu.pe,
Universidad Tecnológica del Perú, Lima-Perú

Resumen: Esta revisión sistemática tiene como objetivo investigar de qué forma las energías renovables influyen en la reducción de la HC (huella de carbono) y sus efectos en el ámbito manufacturero, para ello, se ha utilizado la metodología PRISMA y se han analizado 26 artículos, los cuales mencionan los tipos de energías renovables, las limitaciones, beneficios, el contexto aplicado y el porcentaje de reducción de la HC. Los estudios subrayan que la energía fotovoltaica, la energía solar y la biomasa son las más efectivas para el alcance del objetivo mencionado en la investigación. Por último, se desarrolla una sección donde se contrastaron los resultados de la investigación PRISMA y darán conclusiones y recomendaciones finales.

Palabras clave: Huella de carbono, Contaminación del aire, Energías renovables, Industria manufacturera, Gestión del carbono

I. INTRODUCCIÓN

El sector manufacturero ha demostrado ser de gran relevancia en países de América latina y Europa. Dado que, no solo tiene un rol protagónico en la generación de bienes materiales, asimismo es importante en la generación de empleos a gran magnitud, permitiendo un crecimiento económico estable. Por otra parte, los procesos que se ven involucrados en esta industria pasan por algunas dificultades en cuanto a la sostenibilidad, control y disminución de gases, que afectan al ambiente y contribuyen al cambio climático [1]. Esta situación es un agravante para el ambiente, por lo que, es importante desarrollar una eficiencia energética que promueva el uso de tecnologías renovables para reducir la HC, en ese sentido [2] para conseguir la eficiencia energética, es necesario que exista una transición energética completa, en donde, consideremos factores como las políticas ambientales, factores económicos y operativos que permitan frenar las emisiones. Entonces, las energías renovables representan una salida a la crisis del cambio climático, por ello es necesario que la transición energética sea exitosa para asegurar que la HC se reduzca a niveles que no representen riesgos a la salud ambiental ni humana, en ese sentido, las tecnologías en cuanto a energías son la mejor opción. Por esta razón [3], para lograr una economía libre carbono (CO₂), se tienen que brindar los incentivos adecuados, para que mitigar y capturar las emisiones de carbono y se vuelva una tarea indispensable, por ende, las tecnologías verdes serán mucho más rentables. En ese sentido, algunos de los mecanismos que ayudan a la captura y utilización de CO₂ son sistemas como el de pre-combustión, postcombustión, tecnologías de oxicombustibles y captura

directa de aire. Así pues, las cuestiones medioambientales provenientes de acciones practicadas en la industria de la manufactura son, la generación masiva de gas carbono (Co₂) y diferentes elementos gaseosos contaminantes, esto como resultado directo del funcionamiento intensivo de estos procesos. [4], la manufactura, al estar intrínsecamente ligada al empleo, las fuentes de energías de origen orgánico y ocupación de maquinaria pesada son uno de los principales agentes emisores de gas carbono a la estratosfera, por consiguiente, se agrava el cambio climático global y aumenta la aglutinación de co₂ en el aire. En consecuencia, se intensifica el calentamiento global y se perturba el equilibrio ecológico. Esta investigación está dirigida a determinar cómo la aplicación de las energías renovables minimiza los efectos de la HC en el ámbito manufacturero. Entonces, en [4] se mencionan que las tecnologías de captura y valorización de carbono son cruciales para mitigar las emisiones industriales, pero la incorporación de energías renovables representa una estrategia complementaria clave que ha demostrado resultados importantes en cuanto a la optimización de energía y la minimización de gases de carbono. En ese sentido, la justificación para esta nueva RSL radica en la necesidad de actualizar y consolidar el conocimiento existente en este campo, considerando los acelerados avances tecnológicos y los cambios en las políticas ambientales. A pesar de la existencia de estudios previos, las soluciones y enfoques más recientes pueden no haber sido integrados ni comparados exhaustivamente. Además, una nueva revisión permite identificar nuevas brechas de investigación que han surgido debido a la evolución de la industria.

El objetivo de esta investigación es mostrar cómo las energías renovables han contribuido a reducir los efectos de la HC en la industria manufacturera. Esto incluye identificar las principales energías renovables utilizadas, los tipos de aplicaciones, limitaciones y beneficios de la implementación y los resultados cualitativos y cuantitativos reportados en los estudios analizados.

La investigación cumple un orden ya predeterminado, en el apartado II se encuentra la metodología donde se aplicó PICO para determinar la búsqueda de fuentes a través de palabras clave. Después, en el apartado III se muestran los resultados de la investigación PICO. Luego, en el punto IV se elaboró la discusión donde se mencionan las medidas de

solución que plantean los autores en la literatura y, por último, en el punto V una conclusión que resume la información encontrada de manera sintetizada.

II. METODOLOGÍA

La revisión sistemática de literatura (RSL), se basa en una técnica de investigación que aborda de manera sintética y resumida fuentes de información de algún tema específico y coyuntural, según la literatura [5], una RSL es una investigación preexistente que usa procedimientos predeterminados para ejecutar procesos de identificación, análisis y comprensión para responder a la pregunta de investigación previamente elaborada. Además, una RSL se caracteriza, [5] por ser un estudio metódico, detallado y objetivo, que se pueda replicar con facilidad, dando paso a que otros estudiosos puedan revisar la investigación o reproducirla.

Entonces, se ha formulado la pregunta de investigación para la revisión sistemática de literatura, según el método PIOC. El “problema” es la HC, por ello, en la “intervención” se ha determinado que, una posible solución para mitigar dichos efectos es a través del uso de energías renovables. Además, el “contexto” se enfocará en el ámbito de la industria manufacturera, ya que, es un punto álgido que agrava la problemática. Por último, en la sección “resultados” se ha buscado cumplir con los objetivos planteados en la sección intervención, para así lograr la reducción de los efectos de la HC, a continuación, en la tabla 1 se muestran los puntos PIOC usados.

Tabla 1
Matriz PIOC

P (Problema / Población)	I (Intervención)	O (Resultados)	C (Contexto)
Huella de Carbono	Uso de energías renovables	Reducir los efectos de la huella de carbono	Industria manufacturera

A continuación, a partir de la aplicación del método PIOC, se ha formulado la siguiente pregunta:
¿De qué manera las energías renovables han reducido los efectos de la HC en la industria manufacturera?

A partir de esta pregunta de revisión se obtuvieron las siguientes sub-preguntas:

(RQ1) ¿Qué representa la HC?;

(RQ2) ¿Qué tipos de energías renovables se han aplicado?;

(RQ3) ¿Cómo se ha reducido los efectos de la HC?

(RQ4) ¿En qué tipos de industria manufacturera se ha investigado?

Entonces, con el objetivo de realizar una búsqueda más precisa, se utilizaron palabras clave específicas para cada uno de los componentes de la matriz PIOC, a fin de identificar y seleccionar artículos trascendentales para la investigación, en la tabla 2, se hace referencia a ello.

Tabla 2
Palabras Clave

P	Problema / Población	HC	
			Air pollution Carbon Management Greenhouse gases Greenhouse gas Gas Emissions Carbon Dioxide climate change climate effect Global warming Climate Adaptation Climate Mitigation Greenhouse Gas Emissions Emission Control
			Renewable energies sustainable energy Green energy clean Energy Alternative Energy energy sustainability Sustainable Production Energy transition Low Carbon Technologies Photovoltaic Systems Solar Energy Wind Energy Energy Innovation Circular economy
I	Intervención	Uso de energías renovables	
			Carbon footprint Sustainability Climate change Environmental Impact Emission Control Fossil Fuels Carbon Impact Reduce Carbon Footprint Decarbonization Emission Reduction
O	Resultados	Disminuir efectos de la huella de carbono	
			Manufacturing industry Manufacturing Sector Industrial Manufacturing Processes Manufacturing Company Manufacturing & Processing Manufacturing & Production Manufacturing & Assembly
C	Contexto	Industria manufacturera	

De conformidad con la fusión de las palabras clave asignadas para cada componente, se llevó a cabo una investigación exhaustiva con las palabras clave, con el fin de filtrar información que se relaciona con nuestra investigación y depurar archivos innecesarios. Este estudio cubrió el período entre los años 2020 y 2024, con énfasis en los artículos académicos publicados tanto en inglés como en chino. En consecuencia, se generó la siguiente búsqueda:

(TITLE-ABS-KEY ("Air pollution" OR "Greenhouse gases" OR "Greenhouse gas" OR "Gas Emissions" OR "Carbon Dioxide" OR "climate change" OR "climate effect" OR "Global warming" OR "climate Adaptation" OR "Climate Mitigation" OR "Greenhouse Gas Emissions" OR "Emission Control") AND TITLE-ABS-KEY ("Renewable energies" OR "sustainable energy " OR "Green Energy " OR "Clean Energy " OR "Alternative Energy " OR "energy sustainability" OR "Sustainable Production" OR "energy transition" OR "Low Carbon Technologies" OR "Photovoltaic Systems" OR "solar energy" OR "Wind Energy" OR "Energy Innovation" OR "circular economy")) AND TITLE-ABS-KEY ("Carbon footprint" OR "Sustainability" OR "Climate change" OR "Environmental Impact" OR "Emission Control" OR "Fossil Fuels" OR "Carbon Impact" OR "Reduce Carbon Footprint" OR "Decarbonization" OR "Emission Reduction") AND TITLE-ABS-KEY ("Manufacturing industry" OR "Manufacturing Sector " OR "Industrial manufacturing" OR "Manufacturing processes " OR "Manufacturing Company" OR "Manufacturing & Processing" OR "Manufacturing & Production" OR "Manufacturing & Assembly"))

Para acotar los artículos identificados y concentrar la información relevante, se establecieron criterios referidos a inclusión y exclusión, los cuales se mencionan en la (tabla 3). Estos criterios permitieron delimitar los estudios seleccionados y asegurar que sólo se considerarán aquellos que cumplieran con los requisitos necesarios para la investigación.

Tabla 3
Criterios de Inclusión y Exclusión

Criterios de Inclusión	Criterios de Exclusión
CI1: Las investigaciones abordan los efectos del cambio climático en la industria manufacturera.	CE1: Publicaciones que no mencionan efectos en la sostenibilidad Manufacturera.
CI2: Las investigaciones abordan los tipos de energías renovables.	CE2: Las investigaciones que abordan los tipos de energías tradicionales.

CI3: Los estudios abordan análisis cuantitativos que evalúan la magnitud de la huella de carbono.	CE3: Las investigaciones que han aplicado otros métodos para medir los gases de efecto invernadero (GEI).
CI4: Las investigaciones abordan procesos productivos que han generado impactos ambientales negativos.	CE4: Estudios que han abordado otros sectores, ajenos al sector manufacturero.

III. PROCESO DE SELECCIÓN DE DATOS

Para recopilar datos para llevar a cabo esta RSL, se empleó el método PRISMA, lo que facilitó una identificación meticulosa y sistemática de los estudios pertinentes. Inicialmente, se determinó un total de 580 fuentes registradas mediante la implementación de la fórmula de búsqueda en la plataforma Scopus. Posteriormente, se realizó un examen minucioso de los títulos y resúmenes de estos estudios, lo que permitió la exclusión de 263 artículos que no estaban asociados con la presente investigación. Entre los 317 artículos que permanecieron tras esta fase preliminar de depuración, se procedió a la eliminación de duplicados, es decir, aquellos estudios repetidos en diferentes bases de datos. Estos fueron eliminados utilizando Mendeley para garantizar que cada estudio fuese único dentro del conjunto de datos seleccionado. Durante esta fase, se excluyeron 176 artículos debido a su inaccesibilidad, lo que impidió su incorporación al marco analítico. Después, se realizó una evaluación para determinar si los 141 artículos restantes cumplían con los criterios de exclusión estipulados. Según el criterio inicial (CE1), que se refiere a las publicaciones que no mencionan efectos en la sostenibilidad manufacturera, se excluyeron 9 artículos. En cuanto al CE2, correspondiente a investigaciones que abordan tipos de energías renovables, se excluyeron 33 artículos. Para el CI3, enfocado en estudios que abordan análisis cuantitativos sobre la magnitud de la huella de carbono, se excluyeron 57 artículos, y, por último, en el CI4, se excluyeron 16 artículos debido a que se centraban exclusivamente en la industria manufacturera. Finalmente, tras aplicar los criterios de exclusión predeterminados y eliminar los estudios que no satisfacían los parámetros especificados, se incorporaron 26 artículos pertinentes que ofrecían información valiosa para el análisis y discusión del tema a investigar. En seguida, la figura 1 ilustra el diagrama de búsqueda.

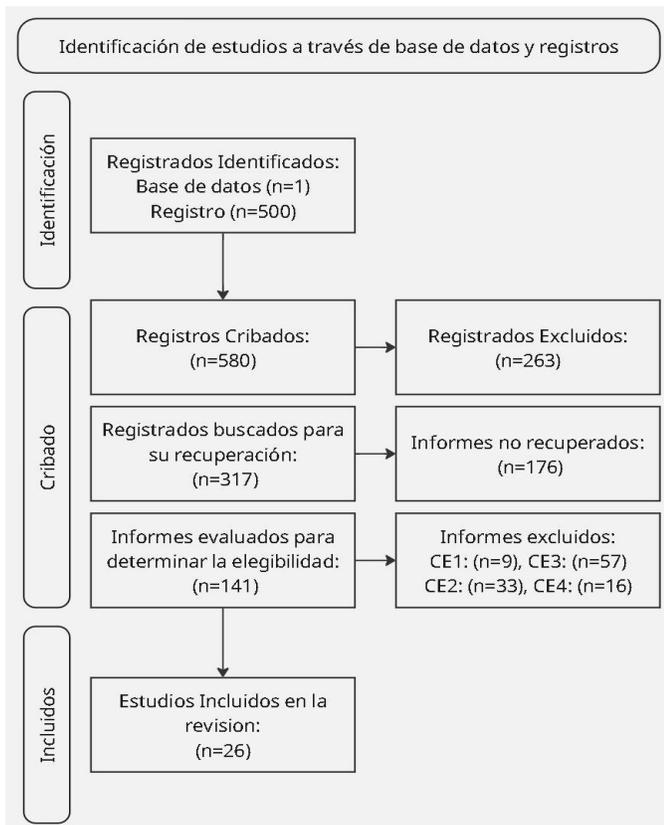


Fig.1 Diagrama PRISMA

Proceso de selecciones de fuentes por medio de criterios de inclusión y exclusión

IV. RESULTADOS

A continuación, en la siguiente sección se responderá a las preguntas PICO según las 26 fuentes encontradas según metodología PRISMA.

A. ¿Qué representa la HC? (RQ1)

En la tabla 4, se evidencian algunos conceptos que se pudieron rescatar de los estudios.

Tabla 4
Sub-preguntas de la RQ1

Preguntas	Contribuciones
Definición de HC	La HC es una forma de medir el número total de gases libres en el ambiente, denominados gases contaminantes (GEI), provocados principalmente por operaciones industriales manufactureras para la generación y consumo de energía, los comercios y el transporte público y privado [7, 10, 12, 16, 17, 18, 19, 21, 29, 31]: Aunque su nombre hace alusión al Carbono, su alcance es mayor, principalmente el CO ₂ , CH ₄ y N ₂ O [7, 9, 10, 13, 14, 15, 16, 17, 18].

Descripción de los principales gases de efecto invernadero asociados a la HC	Los gases libres en el medio que se relacionan con la cuantificación de la HC son Co ₂ , Ch ₄ N ₂ o y gases fluorados [7, 9, 10, 13, 14, 15,16,17, 18] los cuales son provocados por el uso excesivo de combustibles fósiles. Cabe recalcar que el Co ₂ es el gas con más concentración debido a la incineración para la producción de energía. [19, 21, 24, 27, 28, 30, 31]
--	---

Entonces, según las fuentes evaluadas, [10] la HC hace referencia a la acumulación de sustancias gaseosas en el ambiente, también conocidas como gases de efecto invernadero (GEI), y no se limita solo al carbono, sino que [16] están considerados otra cantidad de elementos como el CH₄, N₂O, y otros. El poder medir la HC nos otorga una visión amplia del sector manufacturero y la actividad antropogénica que causa el aumento de la HC, es por ello por lo que, es una herramienta fundamental para mantener un equilibrio de las actividades económicas. [10], [18], [7]

La medida exacta de los gases acumulados permite a las organizaciones y gobiernos, evaluar y tomar decisiones clave para controlar las emisiones mediante [30] el uso de tecnologías y estrategias en las actividades de los procesos industriales. Su uso involucra tener tecnologías, estrategias para optimizar procesos y adaptación a normativas. [32].

En cuanto a los tipos de gases, la Figura 2 que se presenta a continuación proporciona una representación visual de los gases más relevantes en la HC. A continuación, en la gráfica se destaca el porcentaje de incidencia de los gases en la atmósfera.

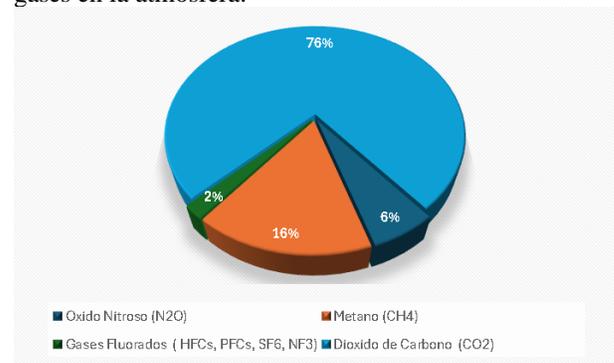


Fig. 2 Gases de efecto invernadero
Porcentaje de Principales gases de efecto invernadero

B. ¿Qué tipos de energías renovables se han aplicado? (RQ2)

Las energías renovables que se han aplicado en los estudios se evidencian en la (tabla 5)

Tabla 5
Sub-preguntas de la RQ2

Preguntas	Contribuciones
Descripción de los tipos de energías renovables aplicados	Las energías renovables que han sido implementadas y estudiadas según las investigaciones son la energía solar a través de un complejo sistema fotovoltaico, la energía eólica que usa sistemas de aspas ayudado por motores de turbinas, biomasa para la obtención de calor y el biogás para las industrias. [7, 8, 9, 10, 11, 12, 15, 16, 17, 20, 24, 25, 28, 29, 30]
Beneficios de cada tipo de energía renovable aplicado	Los beneficios de las energías verdes en el ámbito de la manufactura se observan principalmente en reducción significativa del Co2 conllevando a dejar de lado fuentes de energía no renovable [6, 7, 8, 10]. Las fuentes de energía solar y eólica ayudan a la empresa a tener mayor presencia en el mercado y reducen costos eléctricos, la biomasa y el biogás significan un modelo de aprovechamiento continuo de recursos, además, la biomasa ofrece equilibrio ambiental. [9, 11, 16]
Desafíos de cada tipo de energía aplicada	La adopción de energías renovables en la industria manufacturera enfrenta desafíos clave: altos costos iniciales de inversión, dependencia de condiciones climáticas (como luz solar para fotovoltaicos y viento para molinos), [6, 7, 9, 10, 11, 12, 15 la necesidad de cambios tecnológicos e infraestructurales significativos, barreras financieras y comportamentales, y la escasez de recursos ante la creciente presión ambiental limitan su expansión. [17, 18, 21, 23, 24, 25, 26, 31].
Energía renovable más utilizada	En las investigaciones se mencionan a la energía solar como la más utilizada en casi todas las empresas a través de un sistema fotovoltaico, además, la energía solar supone un amplia disponibilidad y eficiencia en áreas con alta temperaturas, además que su adaptabilidad resulta no ser tan compleja como otras energías. [7, 9, 15, 16, 20, 31].

De acuerdo con la literatura, la adopción de las energías renovables resulta ser un proceso largo, que ha venido incrementando como respuesta a la necesidad de mantener controlada la HC y promover actividades productivas más sostenibles [6], pero esta, varía según factores como el entorno económico, social y tecnológico que atraviesan las empresas [7].

Los estudios resaltan a la energía solar como una de las principales al ser adoptadas, por su disponibilidad, alta radiación solar y facilidad de implementación [9]. Así mismo, la energía eólica, se destaca por la adopción mediante el uso de aspas y turbinas y es utilizada en regiones donde el viento lo permite [8]. Por otro lado, la biomasa que utilizan residuos industriales como una fuente para la generación de calor [11]. Finalmente, el biogás que es aplicada en las industrias [16].

Los beneficios de la implementación permiten una reducción importante en los niveles de CO2 [10]. Además, mejoran la imagen de las organizaciones que las adoptan y permite el ahorro de costos operativos a largo plazo [7]. Pero los estudios señalan que existen desafíos iniciales al momento de adoptarse, uno de ellos es el alto costo de la inversión inicial en tema de infraestructura para la instalación y compra y adquisición de materiales [6]. Además, a esto se le agrega el factor climático necesario para que estas tecnologías tengan éxito [12].

En conclusión, las energías renovables son adaptables a las condiciones de cada grupo empresarial y según las condiciones en las que se encuentren, adaptan un tipo de energía. Sin embargo, la literatura muestra que la energía solar es la opción más consolidada en el mercado debido a sus eficiencia y facilidad para la implantación [15]. A continuación, se presenta la siguiente gráfica (Figura 3) donde se muestran los tipos de energías renovables aplicadas y su nivel de adopción en la industria manufacturera.

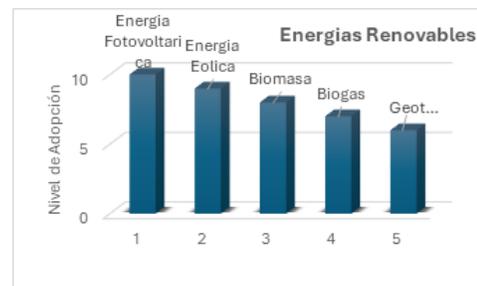


Fig. 3 Energías Renovables con mayor adopción
Tipos de Energías renovables que las empresas más implementan

C. ¿Cómo se ha reducido los efectos de la huella de carbono? (RQ3)

En la tabla 6, se describen algunos datos de la eficacia de la energía renovable, la cual se muestra a continuación.

Tabla 6
Sub-preguntas de la RQ3

Preguntas	Contribuciones
Datos cuantitativos obtenidos	La mitigación de los impactos asociados a la HC se ha logrado mediante la adopción de estrategias de descarbonización y la integración de los recursos de energía renovable, aunque los resultados varían considerablemente según el enfoque y el contexto de cada país. De acuerdo con los estudios, China se consolida como el principal emisor de dióxido de carbono, superando a Estados Unidos, en gran parte debido a la alta demanda energética de sus industrias, las cuales representan aproximadamente el 74,66 % del consumo energético industrial y el 49,93 % del consumo total del país, lo que refleja el impacto de sus procesos de producción intensivos en energía [10, 30]. Por otro lado, en Turquía, el sector energético fue responsable de emitir alrededor de 524 millones de toneladas de CO ₂ en 2020 [7, 11]. Simultáneamente, en el contexto de los Estados Unidos, el sector manufacturero es responsable de aproximadamente el 22% de las emisiones de GEI [17].
Porcentajes de reducción de emisiones de CO ₂ alcanzados	Las metodologías de descarbonización y la implementación de fuentes de renovables de energía en el sector manufacturero han mostrado discrepancias considerables en la mitigación de las emisiones de CO ₂ , con resultados que dependen del enfoque y el contexto de cada país

Con base en los análisis realizados, y al categorizar los hallazgos por continente, se determina que, dentro de Europa, Alemania emerge como una de las naciones que exhibe la influencia más significativa en la mitigación de las emisiones de CO₂. logrando una disminución de entre el 41% y el 88%. Seguida por el Reino Unido con un 30% y Letonia con un 25% [12, 20, 26]. Esta mejora puede atribuirse a la promulgación de políticas integrales de transición energética, el impulso de las energías limpias renovables y las estrictas regulaciones ambientales, que han obligado a las industrias a incorporar tecnologías más sostenibles y eficaces. En cuanto a Asia, China lidera las emisiones globales de CO₂, contribuyendo con un 27,3% de las emisiones totales en 2016, principalmente debido a la alta demanda energética de sus sectores industriales. Sin embargo, aún no se han consolidado datos precisos acerca de la disminución de GEI atribuible al uso de energías renovables [8, 10]. En cuanto a Turquía [7], el uso de energía fotovoltaica ha mostrado resultados significativos, pues en 2023, la HC se redujo a 1.799.482,72 toneladas de CO₂-eq, una diferencia notable en comparación con los datos de 2020. En América, países como Brasil y Estados Unidos han logrado una reducción de entre el 16% y el 20% en sus emisiones de CO₂ a través del uso de energía solar en sus procesos industriales. Por último, en Oceanía y África, la integración de las ER (energías verdes) han permitido una disminución de 13% en las emisiones globales,

entre los actores están la que se obtiene del viento y del sol [19, 21] en la siguiente gráfica (ver figura 4) se presenta información cuantitativa con respecto a las reducciones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) desglosados por continente.

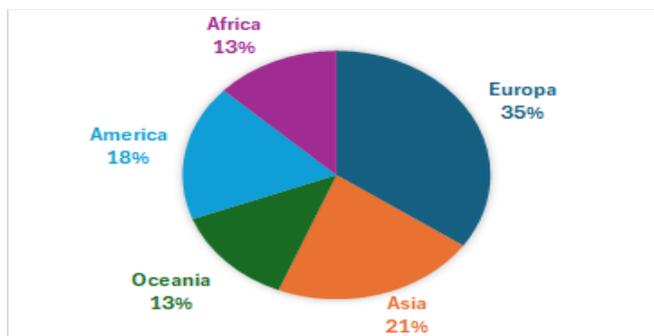


Fig. 4 Reducción de GEI por Continente
Distribución porcentual de información por continentes

D. ¿En qué tipos de industria manufacturera se ha investigado? (RQ4)

Los estudios mencionan distintas energías renovables que las empresas del sector manufacturero implementan, como se muestra en la tabla 7.

Tabla 7
Sub-preguntas de la RQ4

Preguntas	Contribuciones
Proceso en la industria manufacturera con mayor presencia de HC	Hay una conexión directa entre el uso de energía y la generación de emisiones de CO ₂ , lo que significa que, a mayor consumo energético, mayor será la cantidad de emisiones, también lo hacen las emisiones de carbono. Debido a esto, los procesos industriales que generan una mayor HC son aquellos que demandan grandes cantidades de energía, como la fundición de metales, la extracción de hierro y la generación intensiva de energía a partir de fuentes fósiles [4, 8, 10, 12, 13, 17, 20, 22, 25, 30]. Asimismo, el empleo de combustibles fósiles en maquinaria y vehículos, tanto en las fábricas como en la cadena de suministro, incrementa considerablemente este impacto ambiental.
	[11,7,9,14,18] La incorporación de energías renovables en la industria manufacturera representa un enfoque fundamental para avanzar hacia metodologías de producción más sostenibles y mitigar la huella de carbono. A pesar de que

Integración de energías renovables en los diversos procesos industriales	algunos sectores siguen dependiendo de fuentes de energía no renovables, los estudios empíricos indican las energías renovables (eólica, solar y biomasa) junto con la electrificación de los procesos operativos y el despliegue de tecnologías avanzadas, tiene el potencial de reducir considerablemente las emisiones de CO ₂ . [15,20,25,30]
--	--

En relación con las contribuciones mostradas en la tabla 7, se observa que los procesos industriales con mayor presencia de HC son aquellos que demandan altos niveles de consumo energético. Existe una conexión directa entre el uso de energía y la generación de emisiones de CO₂: a mayor consumo, mayor será la cantidad de emisiones. Así, los procesos de fundición de metales, la extracción de hierro y la generación intensiva de energía a partir de fuentes fósiles son identificados como principales fuentes de huella de carbono [4, 8, 10, 12, 13, 17, 20, 22, 25, 30]. Además, el uso de combustibles fósiles en maquinaria y vehículos, tanto en las fábricas como en la cadena de suministro, incrementa considerablemente este impacto ambiental.

Respecto a la integración de energías renovables en los diversos procesos industriales [11, 7, 9, 14, 18], la incorporación de fuentes como la eólica, solar y biomasa representa un enfoque fundamental para avanzar hacia metodologías de producción más sostenibles y mitigar la huella de carbono. Aunque algunos sectores siguen dependiendo de fuentes no renovables, los estudios empíricos indican que la electrificación de los procesos operativos y el despliegue de tecnologías avanzadas tienen el potencial de reducir considerablemente las emisiones de CO₂ [15, 20, 25, 30].

Ampliando esta información, se observa que la mayoría de las investigaciones revisadas se han centrado en la industria siderúrgica, sector responsable de una gran parte de las emisiones industriales debido a los procesos de reducción del hierro. La disminución de emisiones en este sector se ha logrado principalmente mediante la transición hacia proveedores de electricidad renovable y la sustitución del carbón por biomasa, una fuente de energía más sostenible. De manera similar, en la fabricación de transformadores y en la producción de metales no ferrosos como el aluminio y el cobre, se han identificado elevadas emisiones de CO₂ debido al uso de electricidad proveniente de fuentes fósiles para los procesos de fundición y procesamiento.

Asimismo, la industria química, responsable de la producción de plásticos y fertilizantes, genera importantes emisiones debido a su alto consumo energético, proveniente en gran medida de fuentes fósiles. En el caso de la fabricación de cemento, la industria se enfrenta a un desafío adicional, ya que

el proceso de calcinación del carbonato de calcio produce CO₂ como subproducto. A esto se suman las emisiones derivadas de los combustibles fósiles empleados para generar el calor necesario en el proceso. En respuesta a estas problemáticas, en los tres sectores mencionados se ha implementado la energía fotovoltaica como una alternativa clave. Esta tecnología, al aprovechar la luz solar para generar electricidad, permite reducir la dependencia de fuentes fósiles, contribuyendo a una significativa disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Finalmente, las industrias alimentarias también representan una fuente importante de emisiones, debido a la energía utilizada en la producción, procesamiento, envasado y transporte de alimentos. El alto consumo energético asociado con la cocción, refrigeración y conservación de alimentos, que generalmente proviene de fuentes fósiles, contribuye a una HC considerable en este sector. La Figura 5 muestra un diagrama circular que ilustra los tipos de industrias manufactureras en las cuales se ha recopilado más información para (RSL).

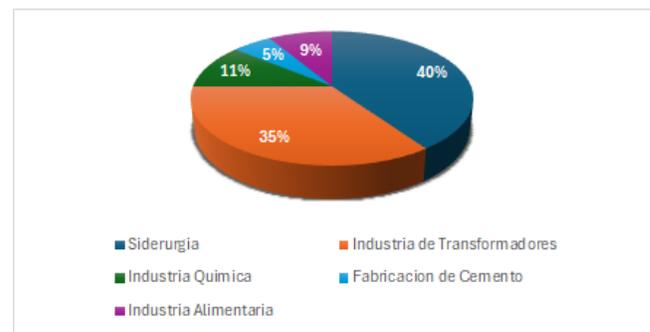


Fig. 5 Porcentaje de las industrias que mayor número de tecnologías adoptaron.

Las energías renovables que han sido implementadas y estudiadas según las investigaciones son la energía solar a través de un complejo sistema fotovoltaico, la energía eólica que usa sistemas de aspas ayudado por motores de turbinas, biomasa para la obtención de calor y el biogás para las industrias.

V. DISCUSIÓN

Los estudios destacan que la huella de carbono, definida como la medición de gases de efecto invernadero (GEI), son liberadas al ambiente directa o indirectamente por actividades manufactureras, por ello, es clave para evaluar el impacto ambiental y guiar estrategias de mitigación del cambio climático [7, 10, 12, 16, 17]. La mayoría de los autores coinciden en que el dióxido de carbono (CO₂) es el principal contribuyente, seguido por el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O), derivados de la quema de combustibles fósiles [7, 16]. Sin embargo, algunos estudios amplían el alcance al incluir óxidos de nitrógeno (NO_x) y los hidrofluorocarbonos (HFC)

como emisiones relevantes en ciertos procesos industriales [16].

En los estudios revisados, se evidencia que la aplicación de energías renovables en el sector manufacturero depende de factores como las características de los procesos y las condiciones tecnológicas disponibles. Las energías más utilizadas incluyen la solar, reconocida por su versatilidad y capacidad para reducir emisiones, seguida de la eólica, efectiva en entornos con viento favorable, y la biomasa, destacada por su neutralidad en carbono al reutilizar residuos orgánicos [10, 12, 20,30]. Por el contrario, en [7,14] hacen mención que la biomasa y el biogás son fuentes de energía importante reduce el consumo de combustibles contaminantes. A pesar de ello, las energías verdes enfrentan desafíos significativos, como los altos costos de implementación, la dependencia de factores climáticos, el impacto ambiental en fauna y la falta de infraestructura adecuada [10, 12, 22]. A pesar de estas barreras, la adopción de estas tecnologías es fundamental para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero y avanzar hacia un modelo industrial más sostenible.

En la presente revisión sistemática, se evidencia que algunos autores [9, 16, 20, 25, 26], destacan que la reducción de los efectos de la HC se ha logrado principalmente mediante la integración de tecnologías como la energía fotovoltaica, eólica, biomasa, biogás y geotérmica en procesos productivos clave, lo que ha permitido disminuir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Sin embargo, otros subrayan la imperiosa necesidad de establecer políticas estrictas y contar con gobiernos que promuevan incentivos efectivos para garantizar una transición energética sostenible y acelerar la adopción de estas tecnologías en la industria manufacturera [6, 13, 23, 27].

En [8, 9, 12, 30] se evidencia que Europa y Asia representan los continentes con el mayor porcentaje de reducción de GEI, alcanzando el 35 % y el 21 % respectivamente. Este avance se atribuye al despliegue de tecnologías renovables combinado con iniciativas de eficiencia energética, lo que ha facilitado una disminución significativa de las emisiones. Sin embargo, los resultados obtenidos son heterogéneos y están condicionados por factores como las políticas públicas y la capacidad de inversión en avances tecnológicos. A diferencia de estos continentes, América, África y Oceanía reportan porcentajes de reducción menores, de 18 %, 13 % y 13 % respectivamente, evidenciando una brecha en la adopción de tecnologías renovables [14, 17, 21]. Este contraste también se refleja en la cantidad de investigaciones publicadas, siendo Europa y Asia las regiones con mayor número de estudios enfocados en la aplicación de ER en la industria manufacturera. Se sugiere, para futuras investigaciones analizar el papel de la transferencia tecnológica y la cooperación internacional en la aceleración de

la adopción de energías renovables en regiones con menor capacidad de inversión.

Por último, este estudio ha identificado que las investigaciones se han concentrado principalmente en sectores industriales con altos niveles de consumo energético y emisiones, como la siderurgia, la fabricación de transformadores y la industria química, debido a los procesos productivos que generan una alta huella de carbono, como la fundición y la automatización [7, 22, 25, 29]. En contraste, sectores como la producción de metales no ferrosos, la fabricación de cemento, las industrias alimentarias y la automotriz, aunque también relevantes, han recibido menor atención [9, 10, 19]. Esto podría estar relacionado con su menor impacto directo en las emisiones, pero aún representan desafíos en términos de eficiencia energética y sostenibilidad. Se sugiere para futuras investigaciones explorar sectores con menor impacto directo en las emisiones, como la fabricación de cemento y la industria automotriz.

VI. CONCLUSIONES

En conclusión, la HC reúne varias especies de gases al ambiente, entre los que se encuentran el (CO₂), (CH₄) y el (N₂O) que son producidos principalmente por actividades de la industria manufacturera. Por ello, es crucial priorizar la adopción de tecnologías limpias y mejorar la eficiencia energética para reducir estas emisiones de manera efectiva. Se recomienda implementar estrategias globales de monitoreo y reducción de GEI, enfocadas en procesos críticos.

Las energías más aplicadas en la industria manufacturera son (la solar, eólica y biomasa), debido a su capacidad para reducir emisiones y su facilidad para adaptarse a cualquier medio. Sin embargo, su implementación enfrenta barreras como altos costos iniciales, dependencia climática y limitaciones de infraestructura. A pesar de estos desafíos, estas energías ofrecen una oportunidad clave para descarbonizar el sector. Es recomendable fomentar la inversión en infraestructura renovable y en programas de formación técnica para optimizar su adopción y maximizar sus beneficios.

La incorporación de estas soluciones verdes ha demostrado su eficacia para mitigar las emisiones de (GEI), particularmente en Europa y Asia; sin embargo, siguen existiendo disparidades notables en áreas caracterizadas por una capacidad de inversión limitada. Las emisiones más importantes están en el sector manufactura y se han convertido en los principales beneficiarios de esta transición. Se recomienda fomentar políticas que faciliten el cambio constante a energías limpias en industrias de alta emisión, especialmente en regiones con capacidad de inversión limitada.

Finalmente, quienes son parte de la manufactura y emiten gran cantidad de gases son la siderurgia, la fabricación

de transformadores y la producción de cemento, se caracterizan por su alta demanda energética. Estos procesos industriales requieren grandes cantidades de energía debido a las elevadas temperaturas necesarias y la complejidad de los materiales utilizados, lo que resulta en una significativa emisión de CO₂. La intensidad energética inherente a estas industrias es un elemento fundamental que contribuye a su considerable HC destacando la necesidad urgente de adoptar soluciones más sostenibles para mitigar su impacto ambiental. Se recomienda analizar en detalle el tipo de industria para diseñar estrategias específicas que faciliten la implementación adecuada de energías, optimizando su impacto en cada sector.

REFERENCIAS:

- [1] Belyak, et al., “Renewable energy expansion under taxes and subsidies: A transmission operator’s perspective,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 451, p. 141955, Apr. 2024. doi: 10.1016/j.jclepro.2024.141955.
- [2] Wehbi, “Powering the Future: An Integrated Framework for Clean Renewable Energy Transition,” *Sustainability*, vol. 16, no. 13, p. 5594, Jun. 2024. doi: 10.3390/su16135594.
- [3] Podder, Patra, Pattnaik, Nanda, y Dalai, “A Review of Carbon Capture and Valorization Technologies,” *Energies*, vol. 16, no. 6, p. 2589, Mar. 2023. doi: 10.3390/en16062589.
- [4] Kolmasiak, “Decarbonization of Production Systems in Foundries,” *Archives of Foundry Engineering*, vol. 24, no. 2, p. 149276, Jun. 2024. doi: 10.24425/afe.2024.149276.
- [5] Lopes, Acosta, y Rojas, “Humor and learning: A systematic literature review,” *Revista de la Facultad de Ciencias Económicas y Sociales*, vol. 28, no. Especial, p. 38823, 2024. doi: 10.31876/rcs.v28i.38823.
- [6] D. Koch y A. Sauer, “Identifying and dealing with interdependencies and conflicts between goals in manufacturing companies’ sustainability measures”, *Sustainability*, vol. 16, núm. 9, p. 3817, 2024.
- [7] M. Güldürek y B. Esenboğa, “Assessment of corporate carbon footprint and energy analysis of transformer industry”, *Sustainability*, vol. 16, núm. 13, 5800, 2024.
- [8] S. Ma, Y. Huang, Y. Liu, X. Kong, L. Yin, y G. Chen, “Edge-cloud cooperation-driven smart and sustainable production for energy-intensive manufacturing industries”, *Appl. Energy*, vol. 337, núm. 120843, p. 120843, 2023.
- [9] H. M. Hsollah, H. Hassan, y R. Mohamad, “The impact of solar photovoltaic (PV) adoption on corporate image and business sustainability in Malaysian small and medium enterprises (SMEs)”, *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, vol. 31, núm. 1, pp. 334–354, 2023.
- [10] Y. Xue, J. Fan, Z. Wu, y J. Xu, “Measuring industrial green total factor productivity in the context of the ‘two-carbon’ target: A case study of energy revolution reform pilot area, China”, *Energy Sci. Eng.*, vol. 11, núm. 8, pp. 2751–2762, 2023.
- [11] F. Tüzün, P. Derin-Güre, y B. C. Zırh, “Drivers and challenges of solar photovoltaics (PV) adoption by Turkish manufacturers”, *Environ. Dev. Sustain.*, 2024.
- [12] R.-H. Hechelmann, A. Paris, N. Buchenau, y F. Ebersold, “Decarbonisation strategies for manufacturing: A technical and economic comparison”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 188, núm. 113797, p. 113797, 2023.
- [13] J. Retegi Albusua, J. I. Igartua López, y B. Kamp, “Classification of industrial sectors based on their profiles of greenhouse gas emissions and policy implications”, *J. Ind. Eng. Manag.*, vol. 16, núm. 2, p. 425, 2023. doi: 10.3926/jiem.5375
- [14] V. L. Menezes, K. C. Gomes, y M. Carvalho, “Evaluation of the manufacturing processes for solar selective surfaces based on CrxOy from a carbon footprint perspective”, *Cleaner Materials*, vol. 3, núm. 100035, p. 100035, 2022. doi: 10.1016/j.clema.2021.100035
- [15] F. Skärin, C. Rösiö, y A.-L. Andersen, “An explorative study of circularity practices in Swedish manufacturing companies”, *Sustainability*, vol. 14, núm. 12, p. 7246, 2022.
- [16] S. Materi, A. D’Angola, D. Enescu, y P. Renna, “Reducing energy costs and CO₂ emissions by production system energy flexibility through the integration of renewable energy”, *Prod. Eng.*, vol. 15, núm. 5, pp. 667–681, 2021.
- [17] M. Patterson, P. Singh, y H. Cho, “The current state of the industrial energy assessment and its impacts on the manufacturing industry”, *Energy Rep.*, vol. 8, pp. 7297–7311, 2022.
- [18] L. Čerdancova, K. Dolge, E. Kudurs, y D. Blumberga, “Energy efficiency benchmark in textile manufacturing companies”, *Environ. Clim. Technol.*, vol. 25, núm. 1, pp. 331–342, 2021.
- [19] N. Warzywoda, P. Dargusch, y G. Hill, “How meaningful are modest carbon emissions reductions targets? The case of Sumitomo electrical group’s short-term targets towards longer-term net zero”, *Sustainability*, vol. 14, núm. 7, p. 4287, 2022.
- [20] S. Kiessling, H. Gohari Darabkhani, y A.-H. Soliman, “Greater energy independence with sustainable steel production”, *Sustainability*, vol. 16, núm. 3, p. 1174, 2024.
- [21] M. Bensouda y M. Benali, “From ‘fairly good’ to ‘optimal’ energy efficiency practices within the Moroccan manufacturing sector: Are financial resources sufficient?”, *Int. J. Energy Econ. Policy*, vol. 13, núm. 3, pp. 478–488, 2023.
- [22] I. Karaiskos, V. Bozoudis, y I. Sebos, “Action plan for the mitigation of greenhouse gas emissions in the manufacturing sector of the Hellenic army”, *Environ. Ecol. Res.*, vol. 12, núm. 1, pp. 86–95, 2024.
- [23] D. Szabo, M. Dragomir, M. Țițu, D. Dragomir, S. Popescu, y S. Tofană, “Sustainable low-carbon production: From strategy to reality”, *Sustainability*, vol. 15, núm. 11, p. 8516, 2023.
- [24] D. Kirikkaleli, K. R. Abbasi, y M. O. Oyeibanji, “The asymmetric and long-run effect of environmental innovation and CO₂ intensity of GDP on consumption-based CO₂ emissions in Denmark”, *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, vol. 30, núm. 17, pp. 50110–50124, 2023.
- [25] K. Dolge y D. Blumberga, “Key factors influencing the achievement of climate neutrality targets in the manufacturing industry: LMDI decomposition analysis”, *Energies*, vol. 14, núm. 23, 8006, 2021.
- [26] A. Jäger-Waldau, I. Kougias, N. Taylor, y C. Thiel, “How photovoltaics can contribute to GHG emission reductions of 55% in the EU by 2030”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 126, núm. 109836, p. 109836, 2020.
- [27] L. C. Vieira, M. Longo, y M. Mura, “Are the European manufacturing and energy sectors on track for achieving net-zero emissions in 2050? An empirical analysis”, *Energy Policy*, vol. 156, núm. 112464, p. 112464, 2021.
- [28] U. S. Malaysia, I. Indriana, I. Nor Asmat, U. S. Malaysia, S. R. Rahmat, y U. S. Malaysia, “The effect of agriculture, manufacturing and transportation on environmental quality in Indonesian selected provinces”, *J. Sustain. Sci. Manag.*, vol. 17, núm. 2, pp. 187–204, 2022.
- [29] R. Agrawal, P. Priyadarshinee, A. Kumar, S. Luthra, J. A. Garza-Reyes, y S. Kadyan, “Are emerging technologies unlocking the potential of sustainable practices in the context of a net-zero economy? An analysis of driving forces”, *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, 2023.
- [30] H. Fu, Y. Shi, y Y. Zeng, “Estimating smart grid’s carbon emission reduction potential in China’s manufacturing industry based on decomposition analysis”, *Front. Energy Res.*, vol. 9, 2021.
- [31] A. Tanveer, H. Song, M. Faheem, A. Daud, y S. Naseer, “Unveiling the asymmetric impact of energy consumption on environmental mitigation in the manufacturing sector of Pakistan”, *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, vol. 28, núm. 45, pp. 64586–64605, 2021.