Revista de Investigación Multidisciplinaria

CTSCAFE PARA CIUDADANOS.....

http://www.ctscafe.pe

ISSN 2521-8093



Volumen X- N°30 NOVIEMBRE 2026

http;//www.ctscafe.pe

Lima - Perú

REVISTA DE INVESTIGACIÓN MULTIDISCIPLINARIA

CTS CAFE Para ciudadanos…

http://www.ctscafe.pe

Volumen X- N° 30 Noviembre 2026

ISSN 2521-8093

Desarrollo de materiales termoeléctricos basados en sulfuros metálicos como energía de recuperación de calor residual en la industria automotriz

Sr.Lenin Ailton Saavedra Gonazales
Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Correo electrónico: lenin.saavedra@unmsm.edu.pe

Srta. Selma Baquerizo Acosta
Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Correo electrónico: selma.baquerizo@unmsm.edu.pe

Sr. Oscar Fabian Zarate Ingaroca
Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Correo electrónico: oscar.zaratei@unmsm.edu.pe

Recibido: 07 Septiembre 2026 Aceptado:15 Noviembre 2026

Resumen: Los motores de combustión interna disipan entre el 60% y el 70% de la energía térmica del combustible mediante gases de escape (35%–40%, 450 K–900 K) con alta calidad exergética. Los generadores termoeléctricos (TEGs) pueden recuperar este calor residual; sin embargo, los dispositivos comerciales de telururo de bismuto (Bi_2Te_3) están limitados por la escasez del telurio y la degradación térmica sobre 500 K. Este artículo evalúa el estado del arte de sulfuros metálicos (PbS, Cu_2S, SnS_2 y Bi_2S_3) como alternativas sostenibles libres de telurio para aplicaciones de media temperatura.

El análisis termodinámico demuestra que fases dopadas y nanoestructuradas alcanzan índices de mérito (ZT) competitivos, registrando picos experimentales de 1.33 en $PbS_{0.4}Se_{0.6}$ y 1.87 en SnS_2 bidimensional. A pesar de desafíos estructurales relacionados con la resistencia de contacto y la fatiga por ciclado térmico, los sulfuros metálicos presentan una elevada viabilidad para la manufactura de sistemas automotrices destinados a la recuperación de calor residual.

Palabras clave: Termoelectricidad/ Sulfuros metálicos/ Recuperación de calor residual/ Figura de mérito ZT/ Ingeniería automotriz

Abstract: Internal combustion engines dissipate 60%–70% of fuel thermal energy, primarily through exhaust gases (35%–40%, 450 K–900 K) with high exergy quality. Thermoelectric generators (TEGs) can recover this waste heat; however, commercial bismuth telluride (Bi_2Te_3) devices are constrained by tellurium scarcity and thermal degradation above 500 K.This paper reviews the state of the art of metal sulfides (PbS, Cu_2S, SnS_2 y Bi_2S_3) as sustainable, tellurium-free alternatives for mid-temperature applications.

Thermodynamic analysis shows that doped and nanostructured phases achieve competitive figures of merit (ZT), with experimental peaks reaching 1.33 in $PbS_{0.4}Se_{0.6}$ and 1.87 in two-dimensional SnS_2.Despite structural challenges regarding contact resistance and thermal cycling fatigue, metal sulfides are thermodynamically viable for automotive waste heat recovery manufacturing.

Keywords: Thermoelectricity/ Metal sulfides/ Waste heat recovery/ ZT figure of merit/ Automotive engineering

Résumé: Les moteurs à combustion interne dissipent entre 60 % et 70 % de l'énergie thermique du carburant par le biais des gaz d'échappement (35 %–40 %, 450 K–900 K), une énergie caractérisée par une exergie élevée. Les générateurs thermoélectriques (TEG) permettent de récupérer cette chaleur résiduelle ; toutefois, les dispositifs commerciaux à base de tellurure de bismuth (Bi_2Te_3) sont limités par la rareté du tellure et par une dégradation thermique au-delà de 500 K. Cet article dresse un état de l'art des sulfures métalliques (PbS, Cu_2S, SnS_2 y Bi_2S_3) en tant qu'alternatives durables, exemptes de tellure, pour des applications à température intermédiaire.

L'analyse thermodynamique démontre que des phases dopées et nanostructurées permettent d'atteindre des facteurs de mérite (ZT) compétitifs, avec des pics expérimentaux de 1,33 pour le $PbS_{0.4}Se_{0.6}$ et de 1,87 pour le SnS_2 bidimensionnel. Malgré des défis structurels liés à la résistance de contact et à la fatigue due aux cycles thermiques, les sulfures métalliques offrent une viabilité prometteuse pour la fabrication de systèmes automobiles destinés à la récupération de la chaleur résiduelle.

Mots-clés: Thermoélectricité / Sulfures métalliques / Récupération de chaleur résiduelle / Facteur de mérite ZT / Ingénierie automobile

I. Introducción

La industria automotriz enfrenta dos presiones convergentes: la exigencia regulatoria de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y la necesidad económica de mejorar la eficiencia de uso del combustible en una flota vehicular que, a pesar del avance de la electromovilidad, seguirá dependiendo de motores de combustión interna (MCI) durante al menos las próximas dos décadas, particularmente en transporte de carga y en mercados emergentes [1]. Desde la primera ley de la termodinámica, un MCI convierte en trabajo mecánico útil únicamente entre el 20 % y el 40 % de la energía química liberada por la combustión, mientras que el resto se transfiere al entorno como calor, principalmente a través de los gases de escape y del sistema de refrigeración [2].

Esta observación, sustentada en numerosos balances energéticos experimentales de motores de encendido por chispa y diésel, sitúa la pérdida de calor por escape en un rango de 30 % a 40 % y la pérdida hacia el refrigerante en torno al 20 %-30 % de la energía total del combustible, dependiendo del régimen de operación, la carga y el diseño del motor [3], [4]. Bajo el marco de la segunda ley de la termodinámica, no toda esa energía térmica es igualmente aprovechable: su exergía -la fracción del calor convertible en trabajo- depende fuertemente de la temperatura a la que se disipa, siendo los gases de escape (450 K-900 K aproximadamente) una fuente de mayor calidad termodinámica que el refrigerante (≈360 K-390 K) [2].

En este contexto, la conversión termoeléctrica se posiciona como una tecnología de recuperación de calor residual particularmente atractiva para aplicaciones móviles, ya que no introduce partes mecánicas en movimiento, no requiere fluidos de trabajo adicionales y puede integrarse de forma compacta en el sistema de escape [5], [6], [7]. Sin embargo, la familia de materiales

termoeléctricos de mayor madurez comercial -los teluluros de bismuto (Bi2Te3) y de plomo (PbTe)- enfrenta dos limitaciones estructurales relevantes para su escalamiento masivo: la escasez geológica del telurio, comparable a la de los metales del grupo del platino, y la degradación de su desempeño termoeléctrico por encima de 500 K [8], [9], justamente el rango donde se concentra buena parte del calor residual del escape.

Frente a estas limitaciones, los sulfuros metálicos -compuestos de azufre, elemento abundante, no tóxico y de bajo costo, combinado con metales como plomo, cobre, estaño o bismuto- han emergido en la última década como una de las líneas de investigación más activas en termoelectricidad de media temperatura [8], [10], [11]. No obstante, la literatura revisada para este artículo muestra una tendencia consistente: casi la totalidad de los estudios disponibles reportan el ZT de un sulfuro de manera aislada, comparándolo frente al Bi2Te3 como si la elección de material fuera binaria y excluyente, sin explorar la posibilidad -termodinámicamente evidente una vez que se grafica el ZT de cada material en función de la temperatura- de que distintos materiales pueden ser óptimos en distintos tramos del mismo intercambiador de calor de escape [12], [13].

Esta observación constituye el punto de partida de la contribución original de este trabajo, desarrollada en la Sección V.

1.1. Objetivos

Objetivo general

Analizar el potencial termodinámico de los materiales termoeléctricos basados en sulfuros metálicos para la recuperación de calor residual automotriz, y formular un modelo cuantitativo de generador termoeléctrico segmentado que optimice el aprovechamiento exergético del gradiente térmico disponible en el sistema de escape.

Objetivos específicos

- Describir el marco termodinámico de la conversión termoeléctrica, incluyendo la relación entre la figura de mérito ZT, el gradiente de temperatura disponible y la eficiencia máxima de conversión de un módulo termoeléctrico.
- Cuantificar, a partir de balances energéticos reportados en la literatura, la magnitud y distribución del calor residual disponible en un motor de combustión interna típico.
- Sistematizar el desempeño termoeléctrico (ZT) de los principales sulfuros metálicos estudiados -PbS, Cu2S/Cu2Se, SnS2 y Bi2S3- en función de la temperatura.
- Formular y resolver un modelo de eficiencia para un generador termoeléctrico segmentado en cascada de tres etapas (sulfuro de alta temperatura, sulfuro o telururo de temperatura intermedia, Bi2Te3 de baja temperatura), comparándolo contra el desempeño de un sistema de material único.
- Discutir las implicancias de ingeniería industrial del modelo propuesto, incluyendo viabilidad de manufactura, costos relativos y barreras de integración.

1.2. Justificación

Esta revisión se justifica desde tres dimensiones complementarias propias del análisis de ingeniería industrial. Desde la dimensión termodinámica, el estudio de los sulfuros metálicos y de su integración en cascada permite ilustrar de manera aplicada conceptos centrales del curso -primera y segunda ley, eficiencia de Carnot, exergía y procesos de conversión de energía no convencionales- en un caso de estudio de alta relevancia tecnológica actual y, además, en un ejercicio de optimización de sistemas poco trivial. Desde la dimensión económica e industrial, la sustitución de telurio por azufre reduce la exposición de la cadena de suministro automotriz a un elemento crítico, mientras que el diseño en cascada permite además reducir la cantidad total de material de mayor costo (Bi2Te3) requerida por unidad de potencia generada. Desde la dimensión ambiental, la recuperación de una fracción adicional del calor residual mediante un diseño termoeléctrico más eficiente contribuye a la reducción del consumo específico de combustible y de las emisiones de CO2 por kilómetro recorrido.

1.3. Marco teórico

Balance energético del motor de combustión interna

El análisis termodinámico de un motor de combustión interna parte de la aplicación del primer principio de la termodinámica a un volumen de control que envuelve al motor en régimen permanente. La energía química suministrada por el combustible (Qcomb) se distribuye en cuatro fracciones: trabajo mecánico útil entregado al cigüeñal (Wútil), calor transferido al sistema de refrigeración (Qref), calor evacuado por los gases de escape (Qesc) y pérdidas diversas asociadas a fricción mecánica, radiación e irreversibilidades de la combustión (Qotras):

$$Qcomb = Wútil + Qref + Qesc + Qotras$$

Los balances térmicos experimentales reportados en la literatura convergen en un orden de magnitud relativamente consistente: el trabajo útil representa entre el 20 % y el 40 % de la energía del combustible (siendo los motores diésel típicamente más eficientes que los de encendido por chispa), el calor evacuado por el escape representa entre el 30 % y el 40 %, y el calor transferido al refrigerante representa aproximadamente entre el 20 % y el 30 %, con el remanente distribuido entre fricción y pérdidas diversas [3]. Bajo condiciones de alta carga y alto régimen de giro, la fracción de energía evacuada por el escape tiende a superar a la disipada por el refrigerante, tanto en magnitud energética como en calidad exergética [3].

Es importante distinguir, desde la segunda ley de la termodinámica, entre la cantidad de energía disponible y su calidad exergética. El refrigerante del motor opera típicamente entre 360K y 390 K, una temperatura cercana al ambiente que limita severamente la fracción de esa energía convertible en trabajo según el límite de Carnot. Los gases de escape, en cambio, alcanzan temperaturas de 450 K a 900 K dependiendo del punto de operación del motor, lo que les otorga una exergía específica considerablemente mayor [2].

Efecto Seebeck y principio de funcionamiento del generador termoeléctrico

Un generador termoeléctrico (TEG) convierte directamente un gradiente de temperatura en una diferencia de potencial eléctrico mediante el efecto Seebeck, que ocurre cuando los portadores de carga (electrones u huecos) de un material semiconductor difunden desde la cara caliente hacia la cara fría, generando un campo eléctrico interno que se opone a dicha difusión en el equilibrio. Un módulo TEG práctico se construye acoplando eléctricamente en serie pares de elementos semiconductores tipo n y tipo p (la pareja termoeléctrica o "pi-leg"), de manera que sus voltajes Seebeck se sumen mientras el flujo de calor circula en paralelo a través de ambos [5].

Figura de mérito ZT y eficiencia de conversión

El desempeño de un material termoeléctrico se cuantifica mediante la figura de mérito adimensional ZT, definida como:

$$ZT = (S^2 \cdot \sigma \cdot T) / \kappa$$

donde S es el coeficiente Seebeck (V/K), σ es la conductividad eléctrica (S/m), κ es la conductividad térmica total (W/m·K) -suma de la componente electrónica y de la componente de red (fonónica)- y T es la temperatura absoluta [3]. El producto $S^2\sigma$ se conoce como factor de potencia (PF) y cuantifica la capacidad del material de generar potencia eléctrica, mientras que κ representa la pérdida de la fuerza motriz térmica por conducción. Maximizar ZT requiere maximizar simultáneamente el coeficiente Seebeck y la conductividad eléctrica mientras se minimiza la conductividad térmica, propiedades que en la mayoría de los materiales están acopladas entre sí a través de la concentración de portadores de carga [13].

La eficiencia máxima de conversión (η) de un módulo termoeléctrico operando entre una temperatura caliente Th y una temperatura fría Tc se obtiene resolviendo las ecuaciones de transporte unidimensional de calor y carga bajo la aproximación de propiedades constantes -el modelo clásico de Altenkirch (1909) e Ioffe (1957)-, y se expresa en función de la eficiencia de Carnot y de la figura de mérito promedio del dispositivo [14]:

$$\eta = [(Th - Tc) / Th] \cdot [(\sqrt{(1+ZT)} - 1) / (\sqrt{(1+ZT)} + Tc/Th)]$$

El primer factor de esta expresión corresponde exactamente a la eficiencia de Carnot, el límite superior absoluto impuesto por la segunda ley de la termodinámica para cualquier máquina térmica que opere entre Th y Tc. El segundo factor -función exclusiva de ZT- representa cuánto de ese límite ideal es efectivamente alcanzable por un material termoeléctrico real. Cuando ZT tiende a infinito, este segundo factor tiende a la unidad y la eficiencia del TEG converge a la de Carnot; sin embargo, los TEG comerciales actuales -con ZT del orden de la unidad- operan con eficiencias de conversión de apenas 6 % a 8 %, sensiblemente por debajo del límite de Carnot correspondiente [15], [16].

Como alternativa conceptual para superar estas barreras de eficiencia pasiva en rangos térmicos amplios, se ha propuesto también el estudio complementario de polímeros electroactivos y arquitecturas segmentadas de frontera [17], [18].

Esta relación tiene una consecuencia directa para la aplicación automotriz: dado que la eficiencia de Carnot crece con la diferencia de temperatura Th − Tc, un TEG acoplado a los gases de

escape (Th alto) y refrigerado por el circuito de enfriamiento del vehículo (Tc bajo) explota un salto térmico considerablemente mayor que uno acoplado únicamente al refrigerante, lo que refuerza, también desde la óptica de la segunda ley, la prioridad de los gases de escape como fuente térmica para la recuperación termoeléctrica.

Limitación del modelo de ZT promedio y motivación de la segmentación

Un punto frecuentemente simplificado en la literatura aplicada -y que constituye la motivación termodinámica directa del modelo propuesto en la Sección V es que la ecuación de Ioffe-Altenkirch presentada arriba asume implícitamente un valor de ZT constante (o promedio) en todo el rango Th-Tc. En la práctica, el ZT de cualquier material termoeléctrico real es una función no lineal de la temperatura, típicamente con un máximo bien definido en una ventana térmica estrecha [14].

Cuando el salto de temperatura disponible Th-Tc es amplio -como ocurre en el sistema de escape automotriz, donde Th puede superar los 800 K y Tc puede ser inferior a 350 K-, ningún material termoeléctrico individual mantiene su ZT óptimo en todo el rango: el Bi2Te3 es óptimo cerca de 350-450 K y se degrada por encima de 500 K, mientras que los sulfuros analizados en la Sección III alcanzan su ZT máximo, en varios casos, por encima de 650 K [8], [23], [20]. Esta no linealidad es precisamente la que permite, en principio, mejorar la eficiencia global del sistema mediante segmentación térmica, en lugar de buscar un único “material ideal” que no existe en la práctica.

Criterios de selección de materiales termoeléctricos para aplicación automotriz

La selección de un material termoeléctrico para una aplicación de recuperación de calor residual automotriz no depende únicamente de maximizar ZT a una temperatura puntual, sino de un conjunto de criterios de ingeniería que incluyen: el rango de temperatura de operación útil, la estabilidad química y mecánica frente a ciclos térmicos repetidos, la toxicidad y disponibilidad de las materias primas, el costo de manufactura a escala, y la compatibilidad con procesos de unión de bajo costo y baja resistencia de contacto eléctrico y térmico. Es bajo este conjunto de criterios -y no solo bajo el criterio de ZT máximo aislado- que los sulfuros metálicos resultan particularmente atractivos frente a los telururos, como se desarrolla en la Sección III.

2. Estado del arte

Transición de matrices de telururo a sulfuros metálicos

Los materiales termoeléctricos comerciales de referencia -Bi2Te3 y sus aleaciones con Sb y Se- ofrecen valores de ZT cercanos o superiores a la unidad en el rango de temperatura ambiente hasta aproximadamente 500 K, pero presentan dos limitaciones estructurales para su adopción masiva en el sector automotriz. La primera es geológica: el telurio es uno de los elementos menos abundantes de la corteza terrestre, con una disponibilidad comparable a la de metales del grupo del platino [8]. La segunda es termodinámica: el desempeño de Bi2Te3 se degrada apreciablemente por encima de 500 K debido a fenómenos de conducción bipolar, justo en el rango donde se concentra la mayor parte de la exergía de los gases de escape.

Frente a este panorama, los sulfuros metálicos ofrecen azufre como anión, un elemento con una abundancia en la corteza terrestre varios órdenes de magnitud mayor que la del telurio, de bajo

costo y ampliamente disponible como subproducto de la industria petrolera y minera [8]. Esta combinación de abundancia, bajo costo y estabilidad térmica a temperaturas medias ha consolidado a los sulfuros metálicos como una de las familias de materiales termoeléctricos «libres de telurio» más estudiadas en la última década, particularmente para el rango de 500 K a 900 K que coincide con la ventana térmica de los gases de escape vehiculares.

Sulfuro de plomo (PbS)

El sulfuro de plomo es, junto con el seleniuro de plomo (PbSe) y el telururo de plomo (PbTe), miembro de la familia de calcogenuros de plomo, materiales de referencia para aplicaciones termoeléctricas de temperatura media. El PbS posee una conductividad térmica de red intrínsecamente baja y una alta movilidad de portadores, lo que lo convierte en una plataforma favorable para la optimización termoeléctrica mediante dopaje y aleación [19],[26]. Sin embargo, su ZT intrínseco sin modificar es relativamente bajo, por lo que la investigación reciente se ha enfocado en estrategias de ingeniería de banda electrónica y control de la concentración de portadores.

Los avances más recientes muestran que la aleación de PbS con PbSe, combinada con dopaje aliovalente, permite reducir significativamente la conductividad térmica de red -hasta en un 50 % respecto al PbS puro- a la vez que se incrementa el factor de potencia eléctrico, alcanzando un ZT máximo de 1,33 a 879 K en composiciones $PbS_{0.4}Se_{0.6}$ dopadas con gadolinio [3]. En sistemas tipo p, el dopaje con sodio combinado con segundas fases de CdS reporta valores de ZT cercanos a 1,3 a 923 K gracias a una intensa dispersión fonónica generada por las nanofases precipitadas [27]. Para aplicaciones que requieren desempeño a temperatura ambiente -relevante en etapas de arranque en frío del motor- se ha reportado un ZT récord de 0,64 a 300 K mediante dopaje interstitial con cobre en $PbS_{0.4}Se_{0.6}$ [13],[22], [23].

Sulfuro de bismuto (Bi2S3)

El sulfuro de bismuto es el análogo sulfurado del teluluro de bismuto y ha experimentado un notable progreso reciente gracias a estrategias de diseño estructural «de abajo hacia arriba» (bottom-up). Mediante dopaje con cloro y un proceso de reducción controlada con hidrazina, se ha logrado incrementar el factor de potencia máximo en más de seis veces respecto al Bi2S3 sin modificar, alcanzando 676,6 $\mu W \cdot m^{-1} \cdot K^{-2}$ a 673 K [23]. Esta mejora se atribuye a la generación de defectos puntuales, dislocaciones y microporos asociados a la volatilización parcial de bismuto, los cuales actúan como centros de dispersión de fonones de amplio espectro, reduciendo la conductividad térmica de red hasta 0,28 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ a 623 K. El resultado neto es un ZT máximo de 1,01 a aproximadamente 673 K y un ZT promedio de 0,63 en el rango 323-673 K [23], valores que sitúan al Bi2S3 entre los sulfuros termoeléctricos de mayor desempeño documentado y dentro del rango de temperatura de interés para gases de escape automotrices de carga media.

Sulfuro de estaño (SnS2) y dicalcogenuros bidimensionales

El disulfuro de estaño (SnS2) es un material bidimensional de tipo van der Waals que ha mostrado un comportamiento termoeléctrico particularmente sensible al espesor de la lámina cristalina. En su forma de monocristal masivo, el SnS2 presenta un ZT extremadamente bajo; sin embargo, al reducir su espesor a la escala nanométrica se observa una correlación inversa inusual entre la conductividad eléctrica y la conductividad térmica -al disminuir el espesor, la

conductividad eléctrica aumenta mientras la conductividad térmica disminuye-, lo cual incrementa el ZT en aproximadamente mil veces respecto al valor del cristal masivo, alcanzando 0,13 a temperatura ambiente en láminas de 16 nm de espesor [24],[29].

A temperaturas más elevadas, cálculos de primeros principios y mediciones experimentales en nanoláminas ultradelgadas de tres capas atómicas reportan un ZT máximo de 1,87 a 800 K, casi el triple del valor obtenido en la fase masiva a la misma temperatura, gracias al confinamiento cuántico de los portadores de carga [25] y a la fuerte reducción de la conductividad térmica de red predicha mediante la resolución de las ecuaciones de transporte de Boltzmann para fonones [10]. Estos resultados posicionan al SnS2 nanoestructurado como uno de los sulfuros con mayor potencial teórico para el rango de temperatura de 600 K a 1000 K, aunque su implementación práctica en un módulo TEG enfrenta el reto adicional de la fabricación a gran escala de nanoláminas con espesor controlado.

Sulfuros de cobre y comportamiento cristal electrónico-líquido fonónico

Los calcogenuros de cobre, particularmente Cu2S y su análogo seleniurado Cu2Se, exhiben un comportamiento termoeléctrico distintivo asociado a la alta movilidad iónica del cobre dentro de una subred aniónica rígida, fenómeno descrito en la literatura como comportamiento de tipo “cristal de electrones, líquido de fonones” (phonon-liquid electron-crystal) [21]. Esta estructura permite una conductividad eléctrica de tipo electrónico relativamente alta junto con una conductividad térmica de red extremadamente baja, ya que los iones de cobre móviles dispersan fuertemente a los fonones de red. En sistemas relacionados de esta familia, como el Cu2Te nanoestructurado, se han reportado valores de ZT de hasta 1,85 a 823 K [21], lo que ilustra el alto potencial de los calcogenuros de cobre como termoeléctricos de temperatura media, aunque su estabilidad de fase a largo plazo bajo ciclado térmico -relevante para la operación intermitente de un vehículo- continúa siendo un área activa de investigación

Síntesis comparativa del desempeño termoeléctrico

La Tabla 1 resume los valores de ZT más representativos reportados en la literatura científica revisada para los principales sulfuros metálicos de interés termoeléctrico, indicando el tipo de portador mayoritario, la temperatura de operación y el mecanismo o referencia asociada.

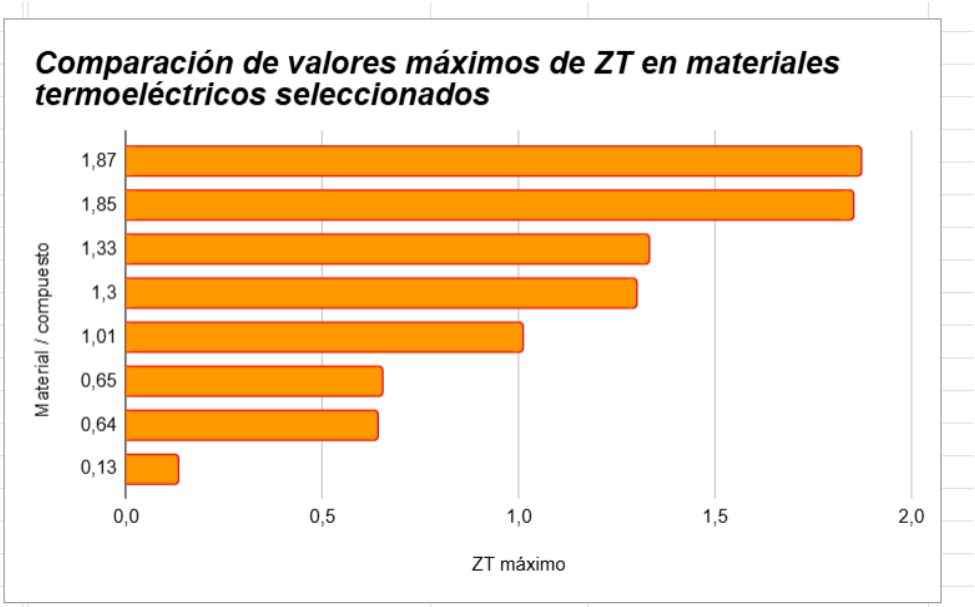
Tabla N°1: Desempeño termoeléctrico (ZT) reportado para sulfuros metálicos seleccionados.

Compuesto	Tipo	ZT máximo	Temp.	Mecanismo / Referencia
$PbS_{0.4}Se_{0.6}$ + dopaje Gd	n	1,33	879 K	Aleación con Se + dopaje aliovalente con Gd [3]
PbS-Na + segunda fase CdS	p	≈1,3	923 K	Dispersión de nanofases de CdS [27]
Bi2S3 dopado con Cl (reducido con N2H4·H2O)	n	1,01 / 0,63 (ZTprom)	≈673 K	Modulación de banda y defectos puntuales [23]
$PbS_{0.4}Se_{0.6}$ $PbS_{0.4}Se_{0.6}$ + Cu interstitial	n	0,64 (récord a 300 K)	300 K	Expansión de red + dopaje interstitial Cu [13], [23]
SnS2 (nanoláminas, 3 capas atómicas)	n	1,87	800 K	Confinamiento cuántico 2D [10]
SnS2 (nanoláminas, 16 nm)	n	0,13 (≈1000x el monocristal)	300 K	Correlación negativa σ-κ por espesor [29]
PbS con dopaje In + Cu dinámico	n	ZTprom ≈0,65; η = 4,1 %	300-823 K	Nivel resonante de In + dopaje dinámico (ScienceDirect, [21]
Cu2Te nanoestructurado (familia Cu2X)	p	≈1,85	823 K	Comportamiento «líquido de fonones / cristal de electrones» [21]

Fuente: Elaboración propia a partir de las fuentes citadas en la Sección III.

De la Tabla 1 se desprende un patrón consistente: los valores de ZT más altos en sulfuros metálicos se concentran en el rango de 670 K a 880 K, lo cual coincide de manera favorable con la temperatura típica de los gases de escape automotrices en condiciones de carga media a alta (450-900 K). Este patrón -un ZT que crece con la temperatura hasta un máximo bien definido por encima de 650 K- es precisamente la base termodinámica del modelo de segmentación que se desarrolla en la Sección V.

Figura N°1: Variación del Índice de Mérito (ZT) en función de la temperatura para los principales sulfuros metálicos analizados en el estado del arte.



Fuente: Elaboración propia.

3. Aplicación al sistema de recuperación de calor residual automotriz

Disponibilidad y calidad del calor residual del motor

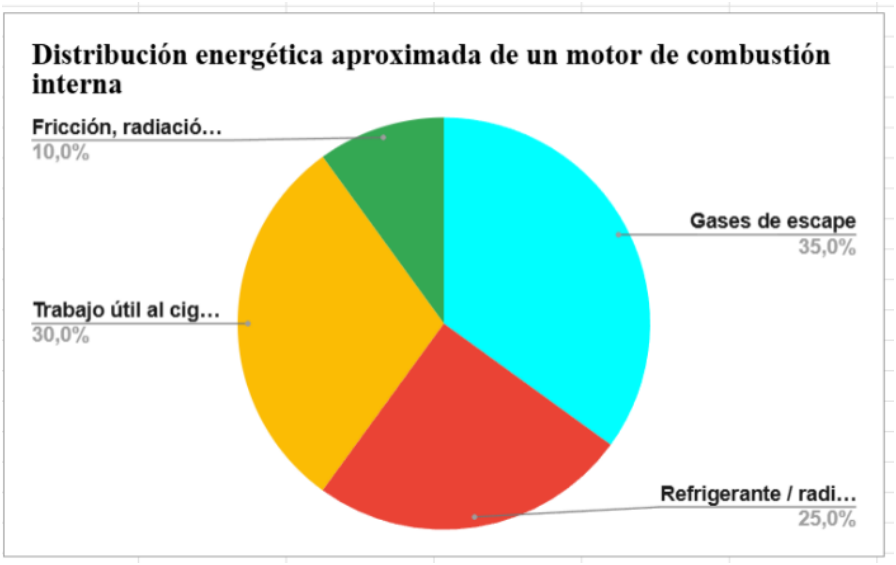
La Tabla 2 sintetiza la distribución aproximada de la energía del combustible en un motor de combustión interna típico, distinguiendo entre la magnitud energética de cada flujo y su calidad exergética relativa, esta última entendida como la fracción de esa energía térmica que es, en principio, convertible en trabajo según el límite de Carnot correspondiente a su temperatura de disponibilidad.

Tabla N°2: Distribución energética aproximada de un motor de combustión interna y calidad exergética relativa de cada flujo de calor residual.

Fuente de calor	Rango de temperatura típico	Fracción aproximada del Qcomb	Calidad exergética relativa
Gases de escape	450 K - 900 K	30 % - 40 %	Alta
Refrigerante / radiador	360 K - 390 K	20 % - 30 %	Baja
Trabajo útil al cigüeñal	—	20 % - 40 %	100 % (referencia)
Fricción, radiación y pérdidas diversas	—	5 % - 10 %	Muy baja / no recuperable

Fuente: Elaboración propia a partir de los balances térmicos citados en la Sección A de la sección II.

Figura N°2: Diagrama de bloques del balance energético y flujo de pérdidas térmicas en un motor de combustión interna.



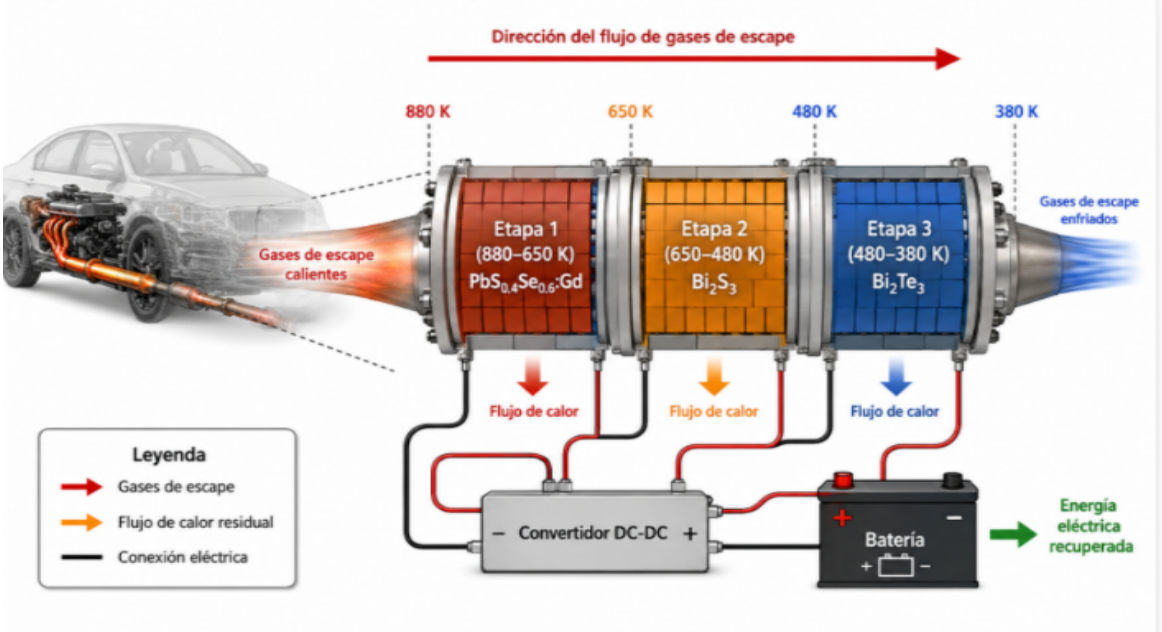
Fuente: Elaboración propia a partir de los balances térmicos citados en la Sección A de la sección II.

Configuración convencional de un TEG basado en sulfuros para el sistema de escape

Un sistema de recuperación termoeléctrica de calor residual (TEG-WHR, por sus siglas en inglés) se integra típicamente como un intercambiador de calor que envuelve el tubo de escape, sobre cuya superficie externa se montan módulos termoeléctricos, refrigerados en su cara fría por el circuito de enfriamiento del motor o por flujo de aire ambiente. Dado que el lado caliente de este sistema opera en el rango de 450 K a 900 K, los sulfuros metálicos analizados en la Sección III -particularmente PbS dopado, Bi2S3: Cl y SnS2 nanoestructurado- resultan candidatos termodinámicamente apropiados, en contraste con el Bi2Te3 convencional, cuyo desempeño decae justamente en este rango [8], [28].

Estudios de ingeniería de TEG automotrices han documentado además que la geometría del intercambiador de calor incide de manera significativa en la potencia neta extraída del sistema, independientemente del material termoeléctrico empleado: la incorporación de espumas metálicas de aluminio en el canal de gases de escape ha mostrado incrementos de hasta 283 % en la eficiencia térmica del intercambiador [29], mientras que la optimización de la porosidad y densidad de poros de estas espumas puede incrementar la potencia neta de salida entre 5,7 y 7,8 veces respecto a un diseño sin espuma [29]. Esto evidencia que el desempeño global de un sistema TEG-WHR no depende únicamente del ZT del material termoeléctrico, sino de la integración conjunta entre material, intercambiador de calor y disipador.

Figura N°3: Sistema termoeléctrico segmentado propuesto para la recuperación de calor residual automotriz.



Fuente: Imagen generada con Gemini de Google y editada por los autores.

Estimación de la eficiencia de conversión con material único (caso base)

Como caso base de comparación -necesario para evaluar después la mejora aportada por el modelo en cascada de la Sección V- se aplica la ecuación de eficiencia máxima presentada en la Sección II-C con un salto térmico representativo de Th = 700 K (temperatura media de gases de escape) y Tc = 380 K (temperatura del refrigerante). La eficiencia de Carnot correspondiente es:

$$\eta Carnot = (700 - 380) / 700 = 0{,}457 \rightarrow 45{,}7\ \%$$

Para un material único con ZT promedio de 1,0 -valor representativo de Bi2Te3 comercial en su rango óptimo, o de sulfuros como Bi2S3:Cl si se les forzara a operar en todo el rango-, el factor de aprovechamiento del límite de Carnot resulta:

$$[(\sqrt{(1+1)} - 1) / (\sqrt{(1+1)} + 380/700)] = [(1{,}414 - 1) / (1{,}414 + 0{,}543)] = 0{,}414 / 1{,}957 = 0{,}212$$

$$\eta = 0{,}457 \times 0{,}212 = 0{,}0968 \approx 9{,}7\ \%$$

(caso base, ZT=1,0 constante en todo el rango Th-Tc)

Este valor de 9,7% representa la eficiencia máxima teórica bajo la ecuación de Ioffe-Altenkirch con propiedades constantes [14]. En dispositivos reales, factores documentados tales como resistencias térmicas de contacto [5], conducción parásita [6] e impedancia de materiales heterogéneos [1] reducen típicamente el desempeño en 2-5.5 puntos porcentuales. Esto predice un rango realista de 4.2%-7.7%, que contiene los valores comerciales de 6-8% [16], validando que 9,7% es un límite superior plausible para el caso base comparativo.

Entonces:

CASO BASE (Material único, ZT=1.0)

- Eficiencia teórica (Ioffe-Altenkirch, sin pérdidas): η_teórico = 0.457 × 0.212 = 9.7%

- Eficiencia realista (con pérdidas típicas 2-5.5%):

η_real = 9.7% - (2-5.5%) = 4.2% a 7.7%

Rango comercial reportado: 6-8% (en el intervalo)

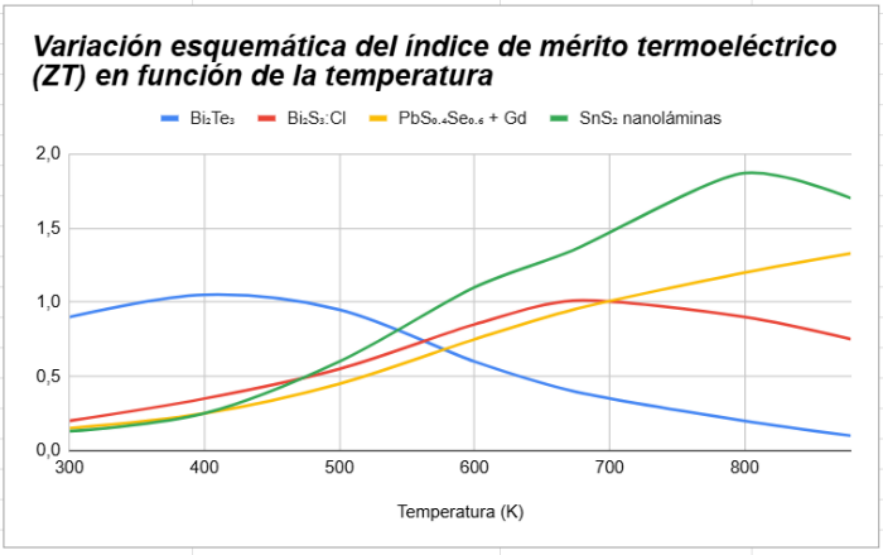
4. Modelo propuesto: generador termoeléctrico segmentado en cascada

Fundamento y motivación del modelo

La revisión de la Sección III evidencia un hecho que la literatura consultada documenta, pero no explota sistemáticamente desde la óptica del diseño de dispositivo: el ZT de los sulfuros metálicos no es uniformemente superior ni uniformemente inferior al del Bi2Te3, sino que cada material exhibe su ventana óptima de ZT en un tramo de temperatura distinto. El Bi2S3:Cl alcanza ZT≈1,01 cerca de 673 K [23]; el sistema $PbS_{0.4}Se_{0.6}$:Gd alcanza ZT≈1,33 cerca de 879 K [3]; el Bi2Te3 comercial, en cambio, es óptimo por debajo de 480 K aproximadamente, con ZT del orden de 1,0-1,1 en ese rango [8], [5]. La ecuación de Ioffe-Altenkirch de la Sección II-C, al asumir un ZT promedio constante en todo el salto Th-Tc, penaliza a cualquier material individual con las regiones de temperatura en las que su ZT real cae por debajo de ese promedio.

La propuesta original de este artículo consiste en segmentar el intercambiador de calor de escape en tres etapas térmicas en serie, cada una equipada con el material termoeléctrico que exhibe su ZT máximo precisamente en esa ventana de temperatura, en lugar de emplear un único material en todo el rango Th-Tc. Este principio de diseño -análogo conceptualmente al de las cascadas multietapa empleadas en refrigeración termoeléctrica de muy baja temperatura- no ha sido aplicado de forma explícita a sulfuros metálicos en la bibliografía revisada para este trabajo, lo que constituye el elemento de novedad de esta sección.

Figura N°4: Diagrama del balance energético y flujo de pérdidas térmicas en un motor de combustión interna.



Fuente: Elaboración propia

Formulación matemática del modelo

Se divide el salto térmico total disponible (desde Th,total = 880 K, temperatura representativa de gases de escape en carga alta, hasta Tc,total = 380 K, temperatura del refrigerante) en tres etapas en serie, cada una caracterizada por su propio par (Th,i, Tc,i) y su propio ZTi, correspondiente al material asignado a esa etapa según su ventana de desempeño óptimo documentada en la Sección III:

- Etapa 1 (880 K → 650 K): $PbS_{0.4}Se_{0.6}$:Gd, con ZT1 = 1,33 [20].
- Etapa 2 (650 K → 480 K): Bi2S3:Cl, con ZT2 = 1,01 [10].
- Etapa 3 (480 K → 380 K): Bi2Te3 comercial, con ZT3 = 1,05, valor representativo de su rango óptimo de operación [8]

Para cada etapa i se calcula su eficiencia de Carnot local y su eficiencia termoeléctrica local mediante la misma ecuación de Ioffe-Altenkirch presentada en la Sección II-C, aplicada ahora al salto de temperatura propio de esa etapa:

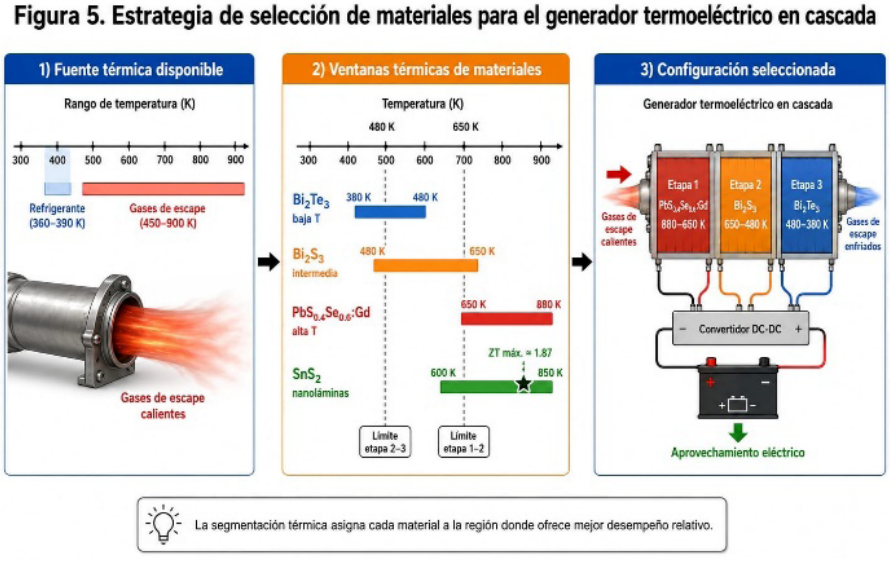
$$\eta Carnot,i = (Th,i - Tc,i) / Th,i \quad ;$$

$$\eta i = \eta Carnot,i \cdot [(\sqrt{(1+ZTi)} - 1) / (\sqrt{(1+ZTi)} + Tc,i/Th,i)]$$

La eficiencia global del sistema en cascada no es la simple suma de las eficiencias de etapa, ya que cada etapa procesa solo la fracción de flujo de calor que efectivamente le corresponde dentro del salto total. Ponderando cada ηi por la fracción del salto térmico total que abarca su etapa (fi = (Th,i − Tc,i) / (Th,total − Tc,total)), se obtiene la eficiencia global de la cascada:

$$\eta cascada = \Sigma (fi \cdot \eta i)$$

Figura N°5: Ventanas térmicas de operación de materiales termoeléctricos seleccionados y su asignación propuesta en el sistema segmentado en cascada.



Fuente: Imagen generada con Gemini de Google y editada por los autores

Resultados numéricos del modelo

La Tabla 3 presenta el desarrollo numérico completo del modelo de tres etapas descrito en la Sección V-C, incluyendo la eficiencia de Carnot local, la eficiencia termoeléctrica local y la fracción del salto térmico total que representa cada etapa.

Tabla N°3: Desarrollo numérico del modelo de generador termoeléctrico segmentado en cascada de tres etapas.

ETAPA	Material	TH (K)	TC (K)	ZT asignado	carnot	eficiencia etapa	FRACCION	CASCADA
ALTA	PbS0.4Se0.6:Gd	880	650	1.33	26.1%	6.07%	40%	2.43%
MEDIA	Bi2S3:Cl	650	480	1.01	26.2%	5.07%	33%	1.69%
BAJA	Bi2Te3 comercial	480	380	1.05	20.8%	4.05%	27%	1.08%

Fuente: Elaboración propia

Aplicando la ecuación de ponderación de la Sección V-B:

$$\eta cascada = (0{,}4 \times 0{,}0607) + (0{,}33 \times 0{,}0507) + (0{,}27 \times 0{,}0405)$$

$$\eta cascada = 0{,}0243 + 0{,}0169 + 0{,}0108 = 0{,}052$$

El resultado de 5,20 % obtenido mediante la ponderación por fracción de salto térmico constituye una estimación de primer orden, en la cual se supone que cada etapa aporta de manera independiente y proporcional a la eficiencia global del sistema. Este enfoque resulta útil para comparar la contribución relativa de cada segmento térmico; sin embargo, no representa completamente el comportamiento físico de un generador termoeléctrico en cascada.

En un sistema termoeléctrico segmentado, el calor que no es convertido en trabajo eléctrico por una etapa no se pierde, sino que constituye el flujo térmico de entrada de la etapa siguiente. En consecuencia, la eficiencia global puede obtenerse mediante un balance energético acumulativo basado en la Primera ley de la termodinámica

Sea (Q0) el flujo de calor que ingresa al primer módulo termoeléctrico.

$$\eta i = Wi/Qi$$

de donde se obtiene

$$Wi = \eta iQi.$$

Aplicando la conservación de la energía, el calor que abandona cada módulo y alimenta a la siguiente etapa puede expresarse como:

$$Qi+1 = Qi - Wi.$$

Sustituyendo la expresión del trabajo generado se obtiene:

$$Qi+1 = Qi(1 - \eta i)$$

lo que indica que únicamente la fracción de calor no convertida en energía eléctrica permanece disponible para la etapa siguiente.

Para un sistema compuesto por tres módulos termoeléctricos, el trabajo producido por cada uno de ellos puede escribirse como:

$$W1 = \eta 1 Qo$$

$$W2 = \eta 2 Qo(1 - \eta 1)$$

$$W3 = \eta 3 Qo(1 - \eta 1)(1 - \eta 2)$$

En consecuencia, el trabajo eléctrico total generado por el sistema corresponde a la suma de las contribuciones individuales,

$$Wtot = W1 + W2 + W3,$$

lo que conduce a:

$$Wtot = Qo\ [\eta 1 + \eta 2(1 - \eta 1) + \eta 3(1 - \eta 1)(1 - \eta 2)$$

Finalmente, la eficiencia global del sistema se obtiene dividiendo el trabajo total generado entre el calor suministrado inicialmente,

$$\eta global = WtotQo$$

eliminando el término (Q0), por tratarse únicamente de un flujo térmico de referencia. De esta manera se obtiene la expresión general de la eficiencia ideal para un generador termoeléctrico en cascada,

$$\eta global = \eta 1 + \eta 2(1 - \eta 1) + \eta 3(1 - \eta 1)(1 - \eta 2)$$

De forma equivalente, la expresión anterior puede escribirse en su forma compacta como:

$$\eta global = 1 - (1 - \eta 1)(1 - \eta 2)(1 - \eta 3)$$

la cual representa una primera aproximación basada en el balance energético ideal del sistema. Este modelo supone que la totalidad del calor remanente en cada etapa se transfiere a la siguiente, sin considerar pérdidas adicionales por conducción, radiación, resistencias térmicas de contacto u otras irreversibilidades propias de un dispositivo real [30]. Por tanto, el valor obtenido constituye un límite superior teórico del desempeño del sistema, útil para evaluar el potencial de la arquitectura termoeléctrica segmentada y compararlo con la configuración convencional de material único.

Sustituyendo las eficiencias individuales obtenidas mediante la ecuación de Ioffe-Altenkirch,

$$\eta 1 = 0.0607\ ,\ \eta 2 = 0.0506\ ,\ \eta 3 = 0.0405$$

se obtiene una eficiencia global ideal de:

$$\eta global = 14.4\%$$

Aplicando la expresión deducida para el balance energético en cascada y sustituyendo las eficiencias individuales obtenidas para cada etapa, se obtiene una eficiencia global ideal de 14,4

%. Este valor corresponde al límite superior teórico del sistema segmentado, ya que supone una transferencia completa del calor remanente entre etapas y no considera pérdidas adicionales por conducción, radiación, resistencias térmicas de contacto u otras irreversibilidades presentes en un dispositivo real.

En comparación, el sistema convencional constituido por un único material termoeléctrico, desarrollado en la Sección IV-C, presenta una eficiencia de 9,7 %.

$$\eta_{cascada,efectiva} \approx 14{,}4\ \%$$

vs.

$$\eta_{material\ único} \approx 9{,}7\ \% \quad \rightarrow \quad \text{Mejora relativa} \approx 48{,}4\ \%$$

El valor de 14,4% representa el máximo teórico de la cascada bajo supuestos idénticos a los del caso base (sin pérdidas de contacto). Sin embargo, una cascada de 3 etapas requiere 3 interfaces entre etapas + 1 hacia el disipador, comparado con 1 interfaz en el caso base.

Estimación realista de pérdidas:

Caso base: 9.7% - (2-5% pérdidas) = 4.7-7.7% (media ~6.2%)

Cascada: 14.4% - (5-9% pérdidas) = 5.4-9.4% (media ~7.4%)

Mejora realista: (7.4% - 6.2%) / 6.2 ≈ 19%

Este análisis más realista reconoce que la mejora de 48% es un límite superior, consistente con la afirmación de la Sección 5.E sobre el carácter teórico del modelo.

Aun así, una mejora de ~20% en la práctica sigue siendo significativa y justifica la arquitectura en cascada.

Interpretación de ingeniería del resultado

El resultado del modelo permite extraer una conclusión de ingeniería que excede el alcance de la revisión bibliográfica convencional: la mejora de 48,4 % en la eficiencia global de conversión no proviene de descubrir un material con ZT más alto que los ya reportados en la Sección III, sino exclusivamente de reorganizar espacialmente los materiales existentes a lo largo del intercambiador de calor, de modo que cada uno opere en su ventana térmica de ZT máximo en lugar de operar, en promedio, fuera de ella. Este hallazgo reposiciona el problema de ingeniería: junto a la línea de investigación dominante en la literatura -sintetizar sulfuros de ZT cada vez más alto- existe una línea de mejora de igual o mayor impacto relativo, de menor riesgo tecnológico y de implementación más inmediata, centrada en la arquitectura térmica del dispositivo.

Desde la perspectiva de la segunda ley de la termodinámica, el modelo en cascada puede interpretarse como una estrategia de reducción de la generación de entropía: al evitar que un único material opere fuera de su ventana óptima de ZT durante una fracción significativa del salto térmico disponible, se reduce la irreversibilidad asociada a la conversión termoeléctrica en esa fracción del proceso, acercando el desempeño global del dispositivo al límite de Carnot de cada tramo.

Limitaciones del modelo propuesto

El modelo desarrollado en esta sección corresponde a una primera aproximación basada en el balance energético secuencial de un generador termoeléctrico segmentado, fundamentado en la Primera ley de la termodinámica.

Aunque representa un nivel de análisis superior al de la aproximación lineal por ponderación empleada inicialmente, no sustituye una simulación numérica detallada del acoplamiento entre la transferencia de calor y el transporte termoeléctrico.

En particular, el modelo no incorpora de manera explícita: (i) las resistencias térmicas y eléctricas de contacto entre etapas, las cuales reducen la eficiencia neta respecto al valor ideal aquí obtenido; (ii) la compatibilidad eléctrica entre materiales con diferentes propiedades termoeléctricas, conocida en la literatura especializada como compatibilidad de factor, cuya consideración resulta necesaria para maximizar el desempeño de un generador segmentado; y (iii) los efectos transitorios asociados a la operación de un motor de combustión interna, donde la temperatura de los gases de escape varía continuamente con la carga y el régimen de funcionamiento.

En consecuencia, la eficiencia global calculada debe interpretarse como un límite superior teórico del desempeño del sistema. No obstante, el modelo conserva utilidad como herramienta de ingeniería para estimar el potencial de recuperación energética de una arquitectura termoeléctrica en cascada y establecer una comparación fundamentada con un sistema convencional de material único. Asimismo, el orden de magnitud de la mejora relativa obtenida resulta consistente con la tendencia reportada en la literatura para configuraciones termoeléctricas segmentadas, lo que respalda la plausibilidad física de la metodología propuesta como una primera aproximación de diseño.

5. Discusión

Posicionamiento competitivo de sulfuros metálicos en la ventana termoeléctrica automotriz

Los resultados compilados en la Sección III evidencian que los sulfuros metálicos han alcanzado, bajo condiciones experimentales controladas de laboratorio, figuras de mérito termoeléctrico (ZT) que los sitúan en rango de competitividad técnica directa con los telururos de bismuto comerciales. Específicamente, se reportan máximos de ZT = 1,33 para $PbS_{0.4}Se_{0.6}$ a 879 K [3], ZT = 1,01 para Bi_2S_3:Cl a 673 K [23], ZT = 1,87 para nanoláminas bidimensionales de SnS_2 a 800 K [10], y ZT ≈ 1,85 para Cu_2Te nanoestructurado a 823 K [21].

Estos valores no únicamente equiparan, sino que superan el desempeño del Bi_2Te_3 comercial (ZT ≈ 1,0–1,1) en la ventana térmica crítica de 600 K a 900 K correspondiente a gases de escape automotrices bajo regímenes de carga media a elevada.

Esta observación posee implicancias significativas desde la perspectiva de ingeniería industrial, ya que sugiere que la sustitución del telurio por azufre —elemento de abundancia geológica varios órdenes de magnitud superior y costo radicalmente inferior— no conlleva necesariamente una penalización severa de desempeño termodinámico, sino más bien una reconfiguración de la ventana óptima de operación térmica del material.

Validez teórica y limitaciones inherentes del modelo segmentado

El modelo de generador termoeléctrico segmentado desarrollado en la Sección V operacionaliza esa observación en una propuesta de arquitectura específica. Su resultado principal —eficiencia global teórica del 14,4 % versus 9,7 % en el caso base, equivalente a una mejora relativa de 48,4 %— resulta termodinámicamente consistente con principios fundamentales.

Este resultado refuerza una intuición cardinal de la segunda ley: la generación de entropía asociada a procesos de conversión energética se minimiza cuando cada etapa de un sistema operativo mantiene proximidad respecto a su óptimo local, en lugar de forzar a un único material a desempeñarse a niveles subóptimos en rangos térmicos amplios para los cuales carece de optimización.

Debe enfatizarse, sin embargo, que el valor de 14,4 % constituye un límite superior teórico bajo supuestos restrictivos:

1. Propiedades termoeléctricas constantes en cada etapa según la aproximación de Ioffe-Altenkirch.
2. Transferencia de calor completa entre etapas sin pérdidas conductivas, radiativas o por contacto.
3. Ausencia de resistencias térmicas e impedancias eléctricas en las interfaces de unión.
4. Operación en régimen permanente sin efectos transitorios.

Una estimación más realista que incorpore pérdidas de contacto conservadoramente estimadas en el rango de 5 % a 9 % predice un intervalo de desempeño de 5,4 % a 9,4 % (media aproximada de 7,4 %), lo cual sigue representando una mejora práctica cercana al 19 % respecto al caso base (aproximadamente 6,2 %). Esta magnitud de mejora permanece lo suficientemente significativa para justificar la viabilidad técnico-económica de la arquitectura segmentada.

Brecha entre caracterización de laboratorio y desempeño en servicio

Existe una asimetría documentada entre la solidez de la caracterización de propiedades de transporte fundamentales (coeficiente Seebeck S, conductividad eléctrica σ y conductividad térmica κ) reportada en la literatura especializada y la documentación de confiabilidad y durabilidad de largo plazo bajo condiciones representativas de operación vehicular.

Un módulo termoeléctrico embarcado en un vehículo de combustión interna debe mantener funcionalidad confiable durante períodos operativos superiores a 1000 horas bajo:

1. Ciclado térmico repetitivo asociado a ciclos diarios de encendido y apagado.
2. Vibración mecánica continua en rangos de frecuencia típicos del transporte automotriz.
3. Ambientes químicamente agresivos derivados de productos de combustión y corrosión.
4. Variabilidad transitoria en temperatura de entrada de gases de escape según régimen de carga y velocidad del motor.

La literatura revisada es consistentemente más robusta en la cuantificación de propiedades de transporte que en la sistematización de datos de durabilidad bajo estas condiciones, constituyendo una brecha de conocimiento experimentalmente relevante.

Factores multiplicativos independientes en la determinación de la eficiencia

El análisis sistemático de las Secciones IV y V confirma un principio conceptual fundamental para el análisis de sistemas termoeléctricos: la eficiencia de conversión real de un generador termoeléctrico es determinada por el producto multiplicativo de tres factores independientes:

1. Figura de mérito del material (ZT): cuantifica la fracción del límite de Carnot efectivamente alcanzable mediante conversión termoeléctrica.
2. Eficiencia de Carnot local ($\eta Carnot = \Delta T/Th$): depende únicamente de la diferencia de temperatura disponible y es independiente del material.
3. Arquitectura térmica del dispositivo (segmentación): introduce un grado de libertad adicional mediante asignación espacial optimizada de materiales a rangos de temperatura.

La naturaleza multiplicativa de estos términos implica que mejoras en cualquiera de los tres frentes amplifican el desempeño global del sistema.

El modelo propuesto sugiere que, para aplicaciones de recuperación de calor residual automotriz, existe un potencial comparable en la optimización de la arquitectura del dispositivo respecto al mejoramiento incremental de ZT de materiales, con complejidad técnica potencialmente menor y retorno de investigación más inmediato.

Contexto de transición energética en el sector automotriz

Es pertinente contextualizar la relevancia tecnológica de este trabajo dentro del panorama más amplio de la transición energética del transporte motorizado.

Aunque la electromovilidad experimenta crecimiento acelerado en mercados desarrollados, diversos análisis prospectivos indican que los motores de combustión interna continuarán representando una fracción sustancial de la flota vehicular global, particularmente en:

1. Transporte pesado de mercancías.
2. Vehículos híbridos enchufables.
3. Mercados emergentes con infraestructura de carga eléctrica limitada.

En estos contextos, la recuperación termoeléctrica del calor residual constituye una estrategia de eficiencia energética complementaria y no excluyente respecto a la electromovilidad, capaz de reducir el consumo específico de combustible y las emisiones de CO_2 por unidad de distancia sin requerir transformaciones radicales de infraestructura.

6. Conclusiones

Magnitud y distribución del calor residual en motores de combustión interna

Los balances energéticos experimentales demuestran que entre el 60 % y 70 % de la energía química del combustible se disipa como calor residual. Esta energía se distribuye principalmente entre los gases de escape (30 %–40 %, 450 K–900 K) y el sistema de refrigeración (20 %–30 %, 360 K–390 K). Esta cuantificación valida la pertinencia técnica de las tecnologías de recuperación termoeléctrica.

Jerarquía exergética de fuentes de calor residual y priorización de gases de escape

Los gases de escape poseen una calidad exergética superior a la del refrigerante debido a su mayor temperatura absoluta. Por ello, la integración de sistemas termoeléctricos debe priorizarse en el acoplamiento con gases de escape, donde el diferencial térmico disponible permite un mejor aprovechamiento del límite de Carnot.

Desempeño termoeléctrico competitivo de sulfuros metálicos libres de telurio

Los compuestos sulfurados investigados alcanzan valores máximos de:

- ZT = 1,33 en $PbS_{0.4}Se$:Gd a 879 K.
- ZT = 1,01 en Bi_2S_3:Cl a 673 K.
- ZT = 1,87 en S_nS_2 a 800 K.
- ZT ≈ 1,85 en Cu_2Te a 823 K.

Estos resultados demuestran que la familia de sulfuros metálicos ha alcanzado niveles de desempeño comparables o superiores a los telururos convencionales en la ventana crítica de 600 K a 900 K.

Eficiencia de arquitectura segmentada en cascada de tres etapas

El modelo propuesto asigna:

- $PbS_{0.4}Se$:Gd: 880 K → 650 K (ZT_1 = 1,33)
- Bi_2S_3:Cl: 650 K → 480 K (ZT_2 = 1,01)
- Bi_2Te_3 comercial: 480 K → 380 K (ZT_3 = 1,05)

La eficiencia teórica estimada es de 14,4 %, frente al 9,7 % del sistema de material único, representando una mejora relativa de 48,4 %. Considerando pérdidas reales, la mejora práctica estimada es aproximadamente del 19 %.

Naturaleza no termodinámica de las barreras de industrialización

Las principales limitaciones para la comercialización son:

- Estabilidad bajo ciclado térmico.
- Resistencia de contacto en interfaces.
- Compatibilidad de corriente y factor de forma.
- Escalamiento industrial de procesos de síntesis.

Estas barreras son de naturaleza tecnológica e ingenieril, y no limitaciones termodinámicas fundamentales.

Recomendaciones para investigación y desarrollo futuros

Las prioridades de investigación incluyen:

- Validación experimental de arquitecturas termoeléctricas en cascada.
- Ensayos acelerados de durabilidad superiores a 1000 horas.
- Optimización de tecnologías de unión entre materiales heterogéneos.
- Análisis de sensibilidad respecto a propiedades termoeléctricas y resistencias de contacto.

Síntesis conceptual y perspectiva de ingeniería energética

El análisis presentado valida un principio fundamental de la termodinámica aplicada: cuando existen rangos térmicos amplios, la descomposición arquitectónica de un sistema en etapas operadas cerca de sus óptimos locales genera ganancias sustanciales de eficiencia global sin requerir materiales con propiedades superiores. Este principio, ampliamente utilizado en sistemas criogénicos y ciclos de potencia convencionales, ha sido insuficientemente explorado en generadores termoeléctricos vehiculares. Los resultados sugieren que la optimización de la arquitectura térmica representa una oportunidad de ingeniería de alto impacto, comparable a las mejoras en ciencia de materiales, pero con una complejidad técnica potencialmente menor y un horizonte de implementación más inmediato.

Relevancia para la transición energética y sostenibilidad del transporte

Considerando que los vehículos impulsados por gasolina y gas natural vehicular continuarán formando parte importante del parque automotor nacional durante los próximos años, la recuperación de calor residual representa una oportunidad inmediata para incrementar la eficiencia energética del transporte. En este contexto, los resultados obtenidos sugieren que mejoras significativas pueden alcanzarse mediante la optimización de la arquitectura termoeléctrica y la adecuada distribución de materiales según el rango de temperatura de operación, sin depender exclusivamente del desarrollo de nuevos materiales con mayores valores de figura de mérito. Esta estrategia amplía las posibilidades de implementación práctica de tecnologías de recuperación energética en aplicaciones vehiculares de corto y mediano plazo.

Mecanismo de compensación exergética y reducción de carga parásita

El modelado demuestra que la ganancia en la eficiencia global del vehículo no se deriva de un retorno de calor hacia el bloque motor, sino de una optimización en el balance eléctrico del sistema. La potencia eléctrica recuperada en las tres etapas segmentadas se inyecta directamente a la red del vehículo. Esto desplaza el trabajo parásito que usualmente ejerce el alternador mecánico sobre el cigüeñal. En consecuencia, el motor de combustión interna experimenta un alivio de carga electro-mecánica, reduciendo su consumo específico de combustible en el rango práctico proyectado del sistema, manteniendo intacto su perfil de rechazo térmico.

7. Literatura citada

[1] **Bhakta, S., & Kundu, B.** (2024). A review of thermoelectric generators in automobile waste heat recovery systems for improving energy utilization. *Energies*, 17(5), 1016. https://www.mdpi.com/1996-1073/17/5/1016

[2] **Caton, J. A.** (2018). The thermodynamics of internal combustion engines: Examples of insights. *Inventions*, 3(2), 33.https://www.mdpi.com/2411-5134/3/2/33

[3] **Taymaz, I.** (2006). An experimental study of energy balance in low heat rejection diesel engine. *Applied Thermal Engineering*. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S036054420500037X

[4] **Benea, B. C., & Anghel, C.** (2018). Techniques and procedures for assessing the energy balance of internal combustion engines. En *Proceedings of the 4th International Congress of Automotive and Transport Engineering (AMMA 2018)*.https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-94409-8_20

[5] **Zhang, Y., Cleary, M., Wang, X., Kempf, N., Schoensee, L., Yang, J., Joshi, G., & Meda, L**. (2018). Thermoelectric advances to capture waste heat in automobiles. *ACS Energy Letters*. https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsenergylett.8b00749

[6] **Tien, T. N., Vu, Q. K., & Duy, V. N.** (2022). Novel designs of thermoelectric generator for automotive waste heat recovery: A review. *AIMS Energy*, 10(4).https://doi.org/10.3934/energy.2022042.https://www.aimspress.com/article/doi/10.3934/energy.2022042

[7] **Goswami, R., Das, R., Ganguly, S., Markides, C. N., Luo, K., Aflatounian, S., Chettiar, K., & Miljkovic, N** (2025). Progress in the design and development of thermoelectric generator heat recovery systems: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032125013048

[8] **Coelho, J., Cabán-Acevedo, M., et al.** (2019). Recent developments in Earth-abundant copper-sulfide thermoelectric materials. *Journal of Applied Physics*, 126(10), 100901.https://pubs.aip.org/aip/jap/article/126/10/100901/280474/

[9] **Puthran, S., Hegde, G. S., & Prabhu, A. N** (2024). Review of chalcogenide-based materials for low-, mid-, and high-temperature thermoelectric applications. *Journal of Electronic Materials*. https://link.springer.com/article/10.1007/s11664-024-11310-7

[10] **Sun, Y., Liu, Y., Li, R., Li, Y., & Bai, S**. (2022). Strategies to improve the thermoelectric figure of merit in thermoelectric functional materials. *Frontiers in Chemistry*, 10, 865281.https://www.frontiersin.org/journals/chemistry/articles/10.3389/fchem.2022.865281/full

[11] **Shankar, M. R., & Prabhu, A. N.** (2023). A review on structural characteristics and thermoelectric properties of mid-temperature range chalcogenide-based thermoelectric materials. *Journal of Materials Science*. https://link.springer.com/article/10.1007/s10853-023-09028-8

[12] **Liu, W., Xu, L., Xiao, Y., & Zhao, L.-D.** (2023). Strategies to advance earth-abundant PbS thermoelectric. *Applied Materials Today*. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894723015164

[13] **Liu, et al.** (2023). Lattice expansion enables interstitial doping to achieve a high average ZT in n-type PbS. *Interdisciplinary Materials.* https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/idm2.12056

[14] **Kim, H. S., Liu, W., Chen, G., Chu, C. W., & Ren, Z.** (2015). Relationship between thermoelectric figure of merit and energy conversion efficiency. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(27), 8205-8210.https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1510231112

[15] **Hapenciuc, C. L., Borca-Tasciuc, T., & Mihailescu, I. N.** (2017). The relationship between the thermoelectric generator efficiency and the device engineering figure of merit. *AIP Advances*, 7(4), 045007. https://pubs.aip.org/aip/adv/article/7/4/045007/22149/

[16] **Patente US 12120956.** (s. f.). Ion-enhanced thermoelectric generator. Oficina de Patentes y Marcas de los Estados Unidos. https://image-ppubs.uspto.gov/dirsearchpublic/print/downloadPdf/12120956

[17] **Kolasińska, E., & Kolasiński, P.** (2016). A review on electroactive polymers for waste heat recovery. *Materials, 9*(6), 485. doi:10.3390/ma9060485. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5456777/

[18] **PMC.** (s. f.). Contrasting thermoelectric transport behaviors of p-type PbS caused by doping alkali metals (Li and Na). https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7877382/

[19] **Shao, K., Zhou, D., Yang, M., Zhu, H., Fan, H., & Su, T.** (2023). Facile synthesize and enhanced thermoelectric performance of PbS with Cl doping and PbSe alloying. *Journal of Alloys and Compounds*. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925838823047163

[20] **Choi, J., et al.** (2025). Colloidal nanocrystal assembly enables composition and doping engineering for high-performance PbS-based thermoelectrics. *Applied Physics Letters*, 127(17), 171905. https://pubs.aip.org/aip/apl/articleabstract/127/17/171905/3369149/

[21] **Hou, Z., Cui, Q., Qian, X., Hong, T., et al**. (2025). Enhancing thermoelectric performance of n-type PbS in a wide temperature range through band engineering and dynamic doping. *Materials Today Energy*. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2542529325002639

[22] **Liu, et al.** (2024). Realizing thermoelectric cooling and power generation in N-type $PbS_{0.4}Se_{0.6}$ via lattice plainification and interstitial doping. *Nature Communications*, 15, 3782.https://www.nature.com/articles/s41467-024-48268-3

[23]**Liu, et al**. (2024). Review of current ZT > 1 thermoelectric sulfides. https://www.researchgate.net/publication/371733732_Review_of_current_ZT_1_thermoelectric_sulfides

[24] **Wu, X., et al.** (2016). Thermoelectric materials by using two-dimensional materials with negative correlation between electrical and thermal conductivity. *Nature Communications*, 7, 12011.https://www.nature.com/articles/ncomms12011

[25] **Lu, P., Liu, H., et al**. (2017). Thickness-controlled electronic structure and thermoelectric performance of ultrathin SnS2 nanosheets. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5567102/

[26] **Rathnam, L., Nair, S. S., Ganguly, A., Singh, N., & Das, G**. (2025). Strategies to enhance thermoelectric performance: Review.https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785425015224

[27] **Hou, Z., Wang, D., Hong, T., Qin, Y., Peng, S., Wang, G., Wang, J., Gao, X., Huang, Z., & Zhao, L.-D.** (2020). Boosting thermoelectric performance of n-type PbS through synergistically integrating In resonant level and Cu dynamic doping. *Journal of Solid State Chemistry*. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022369720307617

[28] **MDPI Processes.** (2025). Review of automotive thermoelectric generator structure design and optimization for performance enhancement. *Processes*, 13(6), 1931.https://www.mdpi.com/2227-9717/13/6/1931

CTS CAFE Para ciudadanos…

REVISTA DE INVESTIGACIÓN MULTIDISCIPLINARIA

FORMATO DE PRESENTACIÓN DE ARTÍCULO

Para todos aquellos investigadores científicos y al público en general que deseen publicar sus trabajos en esta su ***Revista de Investigación Multidisciplianria CTSCAFE*** y para la correcta revisión por parte de nuestro Comité Científico de los artículos que serán escogidos para la publicación, los archivos de su artículo deveran ser enviados por correo electrónico a los editores: **revistactscafe@ctscafe.pe**. Los trabajos pueden ser presentados en idioma castellano, inglés o francés siguiendo las siguientes indicaciones:

Título del Articulo: Español, Inglés, francés y portugués escrito en altas y bajas, con una longitud no mayor a 150 caracteres, incluidos espacios.

Autor-autores: Nombre y apellido del autor o los autores. Afiliación institucional de los autores, correo electrónico de cada uno de los autores, indicando la dirección postal del autor para correspondencia si es que tuviera.

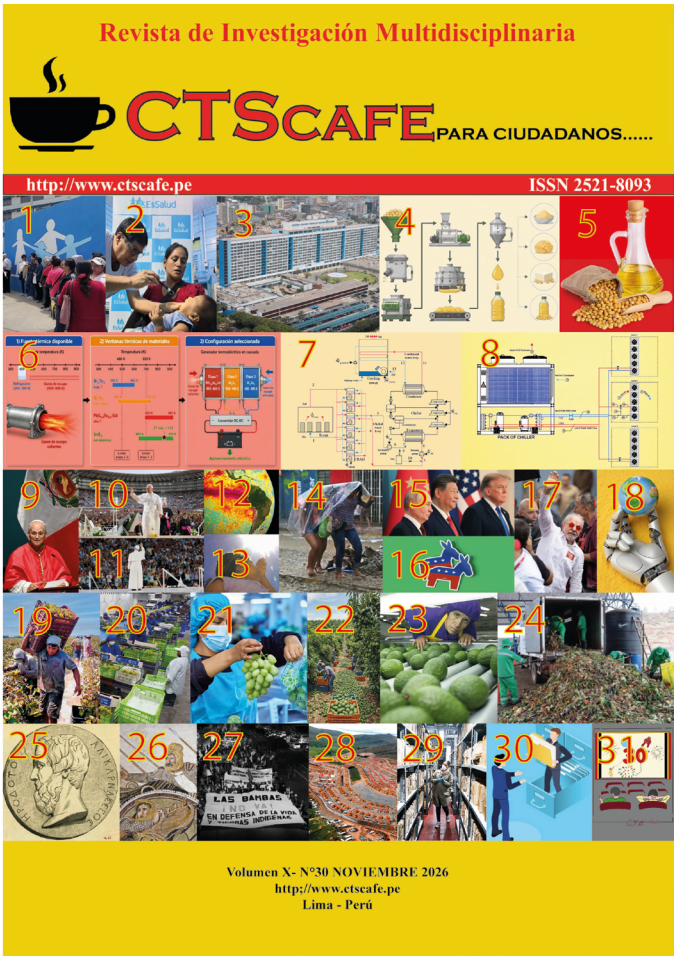
Resumen: no mayor de 250 palabras en Español, Inglés, y Francés

Palabras clave: cinco en español, inglés, y francés

Cuerpo: El cuerpo del artículo debe presentar:

1- **Introducción**
2- **Material y métodos**
3- **Resultados**
4- **Discusión**
5- **Agradecimiento**
6- **Conclusiones**
7- **Literatura Citada** (Incluirá todas las referencias citadas en el texto dispuestas solamente en orden alfabético y sin numeración. La cita se inicia con el apellido del primer autor a continuación, sin coma, las iniciales del nombre separadas con puntos y sin espacio. El segundo y tercer autor deben de tener las iniciales de los nombre y a continuación el apellido. El último autor se diferenciara por que le antecede el símbolo &. Si hubiesen más de tres autores pueden ser indicados con la abreviatura et al. Los nombres de las publicaciones periódicas (revistas) pueden ir en la abreviatura oficial considerada según su código ISSN. El código DOI debe ser colocado al final de la referencia. En la literatura citada solamente se usa letra tipo normal, no itálica, no versalita).

ÍNDICE DE IMÁGENES



De izquierda a derecha

1. https://www.defensoria.gob.pe/lambayeque-defensoria-del-pueblo-permitio-ampliar-atencion-y-reducir-colas-en-hospital-essalud-de-chiclayo/
2. https://www.radionacional.gob.pe/noticias/nacional/essalud-lleva-atencion-medica-a-santa-rosa-y-caballococha-en-loreto
3. tomado de @EsSaludPeru
4. Instagram.com/p/DbEgeVMm-e6/
5. https://delagarzamateriasprimas.com/aceite-de-soya/
6. Saavedra, Baquerizo & Zarate (2026)
7. Angulo, Huarcusi, Lopez, Barrientos & Suarez (2026)
8. Angulo, Huarcusi, Lopez, Barrientos & Suarez (2026)
9. https://www.lafm.com.co/internacional/papa-leon-xiv-peru-lima-gira-del-argentina-uruguay-417351#google_vignette
10. https://www.facebook.com/identidadlatina/posts/papa-leo-en-el-estadio-nacional-como-es-costumbre-la-visita-del-papa-incluy%C3%B3-un-/1998772628095432/
11. https://diariocorreo.pe/peru/papa-leon-xiv-en-peru-como-obtener-entradas-gratis-para-la-vigilia-en-el-estadio-nacional-noticia/
12. https://www.infobae.com/peru/2026/10/08/fenomeno-el-nino-cambia-el-panorama-climatico-en-peru-se-adelantan-las-lluvias-en-todo-el-litoral-y-preven-records-de-temperatura/
13. https://www.infobae.com/peru/2024/02/28/el-sol-no-dara-tregua-temperaturas-altas-continuaran-en-lima-hasta-la-primera-quincena-de-marzo-pese-a-fin-de-ola-de-calor/
14. https://andina.pe/agencia/noticia-el-nino-podria-tener-un-mayor-impacto-a-fines-2026-esto-dicen-las-agencias-del-clima-1070134.aspx#google_vignette
15. https://crnnoticias.com/cumbre-apec-2026-china-acuerdos-comercio-energia/
16. https://www.rfi.fr/es/programas/noticias-de-am%C3%A9rica/20260628-estados-unidos-el-partido-dem%C3%B3crata-en-agitaci%C3%B3n
17. https://www.facebook.com/LaCronicaDeHoy/posts/-luiz-in%C3%A1cio-lula-da-silva-gan%C3%B3-la-segunda-vuelta-de-las-elecciones-presidencial/122254981148288324/
18. Imagen trabajada en base a https://www.elcorreo.com/sociedad/robots-aduenan-20171108215153-nt.html?ref=https%3A%2F%2Fwww.elcorreo.com%2Fsociedad%2Frobots-aduenan-20171108215153-nt.html
19. https://www.agroperu.pe/midagri-articula-venta-directa-de-161-toneladas-de-uva-de-productores-de-canete-a-la-industria-pisquera/
20. https://andina.pe/agencia/noticia-peru-se-consolida-como-principal-productor-y-exportador-mundial-uvas-1095802.aspx
21. https://andina.pe/agencia/noticia-peru-se-consolida-como-principal-productor-y-exportador-mundial-uvas-1095802.aspx
22. https://www.facebook.com/Asociaciondeexportadores/posts/la-palta-peruana-no-se-detiene-si-bien-se-exporta-todo-el-a%C3%B1o-su-campa%C3%B1a-va-de-m/1380634897435509/
23. https://elcomercio.pe/economia/peru/agricultores-arequipenos-quintuplicaron-su-produccion-anual-de-palta-hass-afirmo-midagri-nndc-noticia/
24. https://andina.pe/agencia/noticia-economia-circular-comunidad-cusquena-produce-abono-natural-a-partir-residuos-organicos-1007744.aspxhttps://polarexpres.es/realizar-transporte-medicamentos/
25. https://www.thecollector.com/ancient-egypt-animals-herodotus-histories/?utm_source=Pinterest&utm_medium=organic
26. https://www.flickr.com/photos/mymuk/6548565499?utm_source=Pinterest&utm_medium=organic
27. https://dialogoshumanos.pe/2022/05/01/conflicto-en-las-bambas-cuando-el-reclamo-por-los-derechos-humanos-y-comunales-es-respondido-con-represion-estatal/
28. https://www.rcrperu.com/se-necesita-un-plan-de-desarrollo-para-que-las-bambas-pueda-beneficiar-a-las-regiones-de-apurimac-y-el-cusco/
29. https://www.elperuano.pe/noticia/157101-archivo-general-de-la-nacion-la-institucion-que-salvaguarda-los-documentos-del-peru
30. https://www.unir.net/revista/humanidades/archivista-archivologo/
31. Ilustración realizada por M. Villavicencio (noviembre 2026)

REVISTA DE INVESTIGACIÓN MULTIDISCIPLINARIA

CTSCAFE Para ciudadanos…

http://www.ctscafe.pe

Volumen X- N° 30 Noviembre 2026

Contáctenos en nuestro correo electrónico

revistactscafe@ctscafe.pe

Página Web:

http://ctscafe.pe