

Sección: *Concientífica*

La paradoja verde: El desafío metalúrgico de la transición energética

The green paradox: The metallurgical challenge of the energy transition

*Alfredo Brito-Franco**

Ana Karen Gálvez-Larios

Jorge Luis Hernández-Morelos

Universidad Autónoma del Estado de Morelos, CIICAp, Cuernavaca, Morelos, México.

**Autor para la correspondencia: alfredo.brito@uaem.edu.mx*

RESUMEN

La transición energética hacia el uso del bioetanol en automóviles plantea una “paradoja verde”: su alta higroscopía facilita la entrada de agua y la formación de ácido acético, provocando severa corrosión localizada en los metales del motor. Para superar este reto, la ciencia de materiales desarrolla barreras a nivel molecular. Este artículo divulga los mecanismos de este daño y explora tres estrategias de vanguardia: el uso de aminas protectoras en biomezclas, el diseño de aditivos petroquímicos “a la medida”, y el desarrollo de “inhibidores verdes” botánicos promoviendo motores duraderos y verdaderamente sustentables.

Palabras clave: Bioetanol, corrosión, inhibidores verdes.

SUMMARY

The energy transition towards the use of bioethanol in automobiles poses a “green paradox”: its high hygroscopicity facilitates water ingress and the formation of acetic acid, causing severe localized corrosion in engine metals. To overcome this challenge, materials science is developing molecular-level barriers. This article outlines the mechanisms behind this damage and explores three cutting-edge strategies: the use of protective amines in bio-blends, the design of “tailor-made” petrochemical additives, and the development of botanical “green inhibitors,” ensuring durable and truly sustainable engines.

Keywords: Bioethanol, corrosion, green inhibitors.

La urgencia global por mitigar el cambio climático y reducir la dependencia de los combustibles fósiles ha impulsado la búsqueda e implementación de fuentes de energía alternativas para el sector de transporte. En esta carrera, hemos encontrado un aliado que parece perfecto: el bioetanol. Actualmente, este biocombustible se ha consolidado como una de las opciones más viables a corto y mediano plazo.

Producido mediante la fermentación de biomasa rica en carbohidratos, este alcohol se utiliza comúnmente como aditivo oxigenante o como combustible base en mezcla con gasolina tradicional gracias a su alto octanaje. Esta propiedad no solo reduce drásticamente las emisiones de monóxido de carbono e hidrocarburos no quemados, sino que mejora el desempeño mecánico del motor al ofrecer una mayor resistencia a la detonación. Cabe destacar que, aunque la combustión de biocombustibles también genera dióxido de carbono (CO_2), este gas se reincorpora de manera óptima al ciclo del carbono; al provenir de la biomasa, el CO_2 liberado es utilizado nuevamente por las plantas durante su crecimiento, cerrando así el ciclo de manera sustentable. Por esta razón, los motores que utilizan mezclas renovables han cobrado relevancia en todo el mundo [1].

A simple vista, el uso del bioetanol parece la jugada maestra para la transición energética. Sin embargo, detrás de sus indiscutibles beneficios ambientales, se esconde un enorme reto tecnológico que mantiene ocupados a los laboratorios de ingeniería de materiales.

Para entender el problema, debemos asomarnos bajo el cofre del automóvil. Los motores de combustión interna, las líneas de suministro, los tanques de almacenamiento y los sistemas de inyección fueron diseñados originalmente para operar con hidrocarburos derivados del petróleo. La transición hacia los biocombustibles cambia las reglas del juego y transforma drásticamente en el entorno ope-

rativo de estas piezas, volviendo a los componentes mecánicos altamente susceptibles a un enemigo implacable: la corrosión [2].

Aquí es donde surge lo que podríamos llamar la “paradoja verde” (ver Figura 1). Mientras nuestro medio ambiente comienza a respirar un poco mejor, los metales dentro de nuestros autos están sufriendo un estrés silencioso y destructivo. En este artículo, exponemos cómo y por qué el bioetanol acelera el deterioro de las aleaciones automotrices-con un enfoque especial en metales clave como el aluminio- y descubrimos cómo la ciencia de materiales está diseñando escudos a nivel molecular, conocidos como inhibidores de corrosión, para proteger el motor del futuro.

El origen del problema: la fisicoquímica de las mezclas etanol-gasolina

Para comprender por qué un combustible ecológico puede corroer una pieza de aluminio, es indispensable analizar sus diferencias estructurales yendo de lo general a lo parti-



Figura 1. Paradoja verde: Transición energética limpia vs. corrosión.

cular. Curiosamente, el agua por sí sola no es el villano principal; el verdadero problema comienza con la presencia e interacción del bioetanol (C_2H_5OH). El etanol es una sustancia catalogada como altamente higroscópica debido a que posee un grupo hidroxilo (-OH), lo que le confiere una alta polaridad. En palabras más sencillas, esta molécula actúa como una esponja microscópica con una fuerte tendencia a absorber la humedad del aire que la rodea. Por lo tanto, al agregar bioetanol al tanque del automóvil, garantizamos la entrada de agua y otras impurezas orgánicas al sistema automotor.

Es aquí donde resulta vital contrastar este comportamiento frente a la gasolina. La gasolina tradicional es hidrofóbica, lo que significa que repele el agua de forma natural, y posee una conductividad eléctrica prácticamente nula. En términos electroquímicos, actúa como un medio dieléctrico (aislante) que no permite el flujo de iones, lo que inhibe cualquier reacción de corrosión galvánica o electroquímica. Durante décadas, los metales en los sistemas de inyección operaban en condiciones estables y sumamente secas dentro de este ambiente.

Sin embargo, cuando introducimos bioetanol a la mezcla, estamos invitando a un verdadero caballo de Troya al sistema. La interacción del agua con el alcohol desarrolla un medio conductor ideal para desencadenar fenómenos críticos en los componentes metálicos [3]. Este ambiente se vuelve aún más destructivo cuando el etanol interactúa con el oxígeno disuelto que viaja naturalmente en el flujo del combustible. Dentro de la tubería ocurre una transformación química silenciosa donde el oxígeno oxida al etanol, creando un subproducto llamado ácido acético. La reacción que describe este fenómeno se ilustra en la Ecuación 1, donde una molécula de etanol reacciona con oxígeno (O_2) para transformarse en ácido acético (CH_3COOH) y agua (H_2O):



Una vez formado, este ácido acético acelera el deterioro del metal. Al reaccionar con la superficie de la pieza de aluminio, produce acetato de aluminio y libera burbujas de gas hidrógeno en el proceso, tal como se detalla en la Ecuación 2 y se ilustra visualmente en la Figura 2:

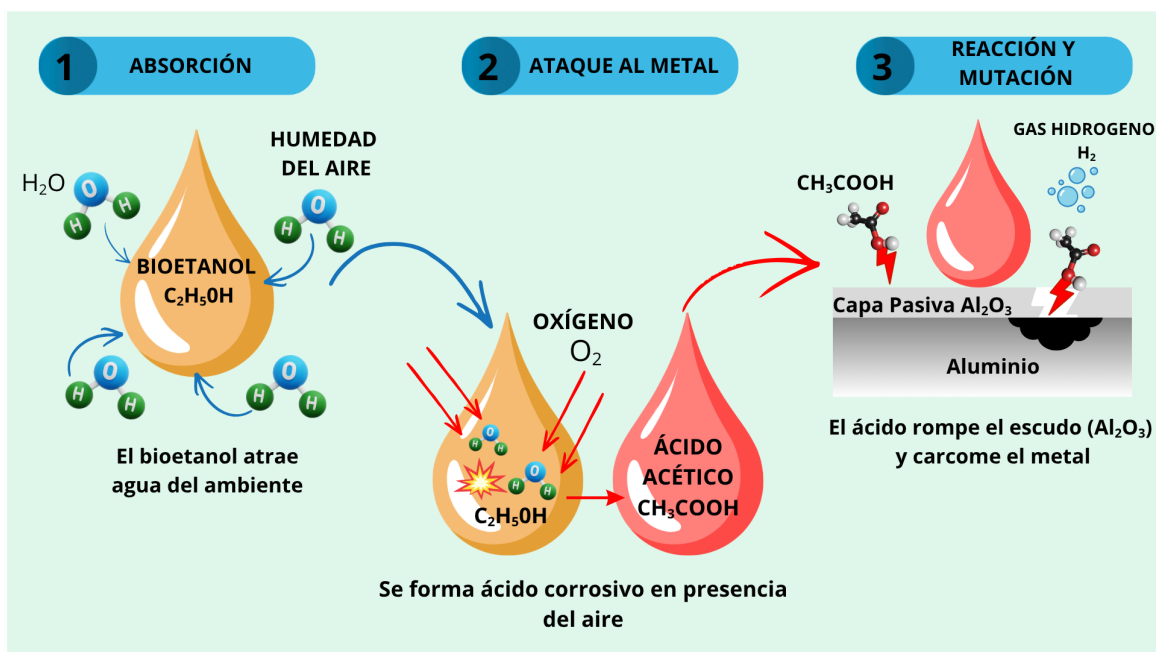
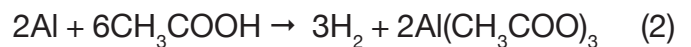


Figura 2. Mecanismo de corrosión del etanol en piezas metálicas de los vehículos.

El aluminio es famoso por su excelente resistencia a la corrosión, la cual se debe a la formación espontánea de una película de óxido (Al_2O_3). Este “escudo invisible” es muy delgado, compacto y adherente, actuando como una barrera termodinámicamente estable en ambientes neutros. No obstante, no es invencible. Bajo las nuevas condiciones operativas – donde se combina agresivamente el agua, oxígeno disuelto y el ácido acético- las defensas del material terminan por fracturarse, rompiendo la delgada película protectora en puntos muy vulnerables [4].

A este fenómeno destructivo lo denominamos corrosión localizada o por picadura (*pitting*). A diferencia de la corrosión uniforme, donde el metal se adelgaza de manera predecible y homogénea, la corrosión por picadura es un ataque penetrante que perfora el metal creando pequeños cráteres. Peor aún, estas micro-picaduras actúan como concentrados de esfuerzos físicos y puntos de inicio para fracturas por fatiga, lo que puede resultar en fallas repentinas en el motor de nuestro vehículo.

Alternativas de vanguardia contra la corrosión en biocombustibles

Para evitar que la transición energética comprometa la integridad mecánica de nuestros vehículos, la ciencia de materiales ha puesto manos a la obra explorando diversas estrategias innovadoras en los laboratorios.

Una de las primeras líneas de defensa fue planteada por investigadores de la Universidad de Química y Tecnología de Praga, quienes se enfocaron en la mezcla ABE (acetona, butanol y etanol). Aunque esta mezcla se obtiene de manera natural por fermentación bioquímica y promete ahorrar altos costos de separación en la industria, se vuelve sumamente agresiva al contaminarse con agua. La solución científica consistió en añadir compuestos químicos lla-

mados aminas -como la dietilentriamina (DETA) y la trietilentetramina (TETA)- que actúan como diminutas anclas. Al adherirse a la superficie del acero, estas moléculas forman una película protectora tan uniforme y resistente que logran una eficiencia de inhibición del 95%, incluso en condiciones de alta agresividad. [5].

De forma complementaria, otra vertiente crucial de investigación se centra en los vehículos que utilizan proporciones variables de bioetanol, desde el popular E10 (90% gasolina y 10% etanol) hasta el E85 (15% gasolina y 85% etanol). La regla electroquímica dicta que a medida que aumenta el porcentaje de bioetanol, también lo hace la conductividad eléctrica del medio, facilitando el ataque corrosivo. Estudios recientes han demostrado que la eficiencia de las películas protectoras cambia drásticamente dependiendo de la proporción exacta de bioetanol y la cantidad de agua absorbida. Entender esta dinámica de desgaste permite a la industria petroquímica diseñar aditivos “inteligentes” y a la medida, asegurando barreras fisicoquímicas estables sin importar la mezcla exacta en el tanque [6].

Finalmente, una estrategia fascinante por su enfoque sustentable nos aleja de los complejos laboratorios petroquímicos y nos lleva directamente a la botánica, mediante el desarrollo de “inhibidores verdes”. Es precisamente en esta línea de innovación donde hemos enfocado nuestros esfuerzos. En nuestro propio laboratorio, comprobamos la extraordinaria eficacia de utilizar extracto de hojas de guanábana (*Annona muricata*) para proteger bloques de aluminio expuestos a mezclas comerciales como el E20 (80% gasolina y 20% etanol). Descubrimos que bastan apenas 25 partes por millón de este extracto para que sus compuestos orgánicos, ricos en vitaminas y antioxidantes, se adsorban fuertemente en la superficie del aluminio. Este proceso de anclaje forma una barrera molecular densa que aísla el metal del medio, frenando exitosamente el ataque corrosivo del etanol en inmersiones prolongadas. Esto demuestra que las soluciones del

futuro no solo protegerán nuestros vehículos, sino que serán completamente amigables con el medio ambiente [7].

Perspectiva científica y conclusión

La adopción del bioetanol como matriz energética representa un avance innegable hacia un transporte sostenible. Sin embargo, la evidencia en los laboratorios es clara: la naturaleza de este combustible cambia drásticamente las reglas del juego dentro de nuestros vehículos. La sed natural que tienen los alcoholes por el agua y su tendencia a generar subproductos ácidos convierten a los componentes del motor en el escenario principal de un ataque corrosivo.

El reto para la ciencia de materiales no consiste en revertir el progreso hacia los combustibles alternativos, sino en diseñar infraestructuras capaces de tolerarlos. La integración de disciplinas como la electroquímica y la síntesis orgánica de inhibidores verdes está proporcionando soluciones tangibles y escalables.

La formulación de aditivos basados en química sostenible no solo protege el patrimonio tecnológico y la seguridad de los usuarios frente a fallas por corrosión, sino que también alinea a la industria automotriz y energética con los más estrictos estándares de protección medioambiental. En última instancia, el éxito de la transición energética dependerá de nuestra capacidad para dominar las reacciones a nivel atómico que ocurren silenciosamente en el interior de cada motor. Con la combinación correcta de biotecnología, metalurgia avanzada e inhibidores verdes, promoveremos que los motores del mañana sean más eficientes, duraderos y ecológicos.

Referencias

- [1] Szabó, Á. I., Mursi, Z. T., Wégerer, A. y Nagy, G. (2025). Comprehensive efficiency analysis of ethanol-gasoline blends in spark ignition engines. *Eng*, 6(10), 256. <https://doi.org/10.3390/eng6100256>
- [2] Baroš, P., Matějovský, L., Macák, J., Staš, M. y Pospíšil, M. (2022). Corrosion aggressiveness of ethanol-gasoline and butanol-gasoline blends on steel: Application of electrochemical impedance spectroscopy. *Energy & Fuels*, 36(5), 2616-2629. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c03680>
- [3] Arik, E., Altan, H. y Esenturk, O. (2014). Dielectric properties of ethanol and gasoline mixtures by terahertz spectroscopy and an effective method for determination of ethanol content of gasoline. *The Journal of Physical Chemistry A*, 118(17), 3081-3089. <https://doi.org/10.1021/jp500760t>
- [4] Brito-Franco, A., Uruchurtu, J., Rosales-Cadena, I., López-Sesenes, R., Serna-Barquera, S. A., Hernández-Pérez, J. A., Rocabrundo-Valdés, C. y González-Rodríguez, J. G. (2020). Corrosion behavior of Al in ethanol-gasoline blends. *Energies*, 13(21), 5544. <https://doi.org/10.3390/en13215544>
- [5] Matějovský, L., Staš, M., Li, K., Baroš, P., Kudrnová, M. y Macák, J. (2025). Mild steel corrosion in gasoline blends with acetone-butanol-ethanol and inhibition efficiencies of amines. *Energy & Fuels*, 39(20), 9487-9506. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5c01404>
- [6] Matějovský, L., Macák, J., Pleyer, O., Straka, P. y Staš, M. (2019). Efficiency of steel corrosion inhibitors in an environment of ethanol-gasoline blends. *ACS Omega*, 4(5), 8650-8660. <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b03686>
- [7] Nogueiron-Benitez, D. A., Gálvez-Larios, A. K., López-Sesenes, R., Ramírez-Arteaga, A. M. y González-Rodríguez, J. G. (2025). A study of the corrosion inhibition of aluminum in ethanol-gasoline blend using *Annona muricata* leaves extract. *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion*, 11(1), Artículo 3. <https://doi.org/10.1007/s40735-024-00923-4>