

Los compuestos químicos presente en los airbags de los automóviles

Autores:

Quiel, Humberto

Universidad UMECIT, Panamá
Licenciatura en Criminalística y Ciencias
Forenses
quielhumberto53@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0000-5658-4285>

Montenegro, Yaxari

Universidad UMECIT, Panamá
Licenciatura en Criminalística y Ciencias
Forenses
yymg2002@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0003-5729-7677>

Villareal, Yarelys

Universidad UMECIT, Panamá
Licenciatura en Criminalística y Ciencias Forenses
arleen27.k@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0007-1971-2357>

Docente Asesor:

Madrid, Milisa

Universidad UMECIT, Panamá
Asignatura: Química Forense
milymadrid@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0007-3190-997X>

Docente Asesor:

Ruiz, Dayan

Universidad UMECIT, Panamá
Asignatura: Accidentología Forense II
dayanruiz19@gmail.com

Sede: La Chorrera

DOI: 10.37594/sc.v1i7.1776

Resumen

Los sistemas de airbag constituyen uno de los avances más relevantes en la seguridad pasiva automotriz; su despliegue se basa en reacciones químicas altamente controladas que producen grandes volúmenes de gas inerte en milisegundos. Históricamente, el azida de sodio (NaN_3) fue el generador de gas predominante; sin embargo, su carácter tóxico e inestabilidad térmica impulsaron la búsqueda de alternativas más seguras, como la nitroguanidina, el nitrato de guanidina y formulaciones híbridas con nitrato de amonio o infladores de gas comprimido. Este artículo presenta una revisión crítica de la evolución química de los infladores de airbags, analiza la termodinámica y cinética de las reacciones involucradas, discute los riesgos toxicológicos y ambientales asociados, y valora las tendencias hacia la sostenibilidad química verde, diseño modular y reciclaje de residuos que perfilan el futuro de la industria.

Se concluye que, aunque los avances reducen considerablemente la exposición a subproductos nocivos y mejoran la eficiencia energética del inflado, aún persisten desafíos en materia de gestión de desechos pos despliegue y estandarización normativa internacional.

Palabras clave: Airbag, Azida de sodio, compuestos químicos, seguridad automotriz, sustitutos ecológicos.

Chemical compounds present in automobile airbags

Abstract

Airbags are a landmark in automotive passive safety; their deployment relies on tightly controlled chemical reactions that generate large volumes of inert gas within milliseconds. Sodium azide (NaN_3) historically dominated as gas generant; however, its toxicity and thermal instability fostered safer alternatives such as nitroguanidine, guanidine nitrate, and hybrid formulations with ammonium nitrate or compressed gas inflators. This article offers a critical review of the chemical evolution of airbag inflators, examines the thermodynamics and kinetics of core reactions, discusses toxicological and environmental risks, and evaluates sustainability driven trends—green chemistry, modular design and end of life recycling—that will shape the industry's future. We conclude that, although recent advances substantially reduce exposure to hazardous by products and improve energetic efficiency, challenges remain in post deployment waste management and global regulatory harmonisation.

Keywords: Airbag, Chemical compounds, ecological substitutes, Sodium azide, vehicle safety.

1. INTRODUCCIÓN

Justificación

Este proyecto surge del interés por comprender en profundidad el funcionamiento de los sistemas de airbag desde una perspectiva química. Si bien es ampliamente reconocido su papel fundamental en la protección de vidas durante accidentes automovilísticos, resulta llamativo el escaso número de estudios detallados sobre los compuestos químicos que hacen posible su despliegue inmediato. Por ello, esta investigación se enfocó en el análisis de los materiales involucrados en esta reacción rápida y crítica, con el objetivo de explorar posibles mejoras tanto en eficiencia como en seguridad.

La evolución histórica de los airbags también revela aspectos controvertidos, en particular el uso prolongado del azida de sodio, un compuesto altamente tóxico, cuyo impacto en la salud humana y el medio ambiente fue subestimado durante años. Afortunadamente, la industria ha avanzado hacia alternativas más seguras y sostenibles, lo que refleja una creciente responsabilidad ambiental sin

renunciar al rendimiento técnico.

El propósito de este trabajo es ofrecer una visión integral sobre la evolución de los compuestos químicos utilizados en los airbags, evaluando no solo su eficacia, sino también su nivel de seguridad y sostenibilidad. Se aspira a que esta investigación motive futuras iniciativas que integren la innovación científica con principios de responsabilidad ambiental. La información recopilada puede resultar de gran valor para profesionales del ámbito químico, la ingeniería automotriz y otras áreas relacionadas.

Este estudio se enmarca plenamente dentro de los objetivos institucionales de la Universidad Umecit, donde promovemos el desarrollo de tecnologías orientadas a construir una sociedad más segura y sostenible. Creemos firmemente que la ciencia debe estar al servicio de la sociedad, ofreciendo soluciones concretas a los desafíos del mundo actual y contribuyendo al bienestar colectivo.

Descripción de la temática o problema de investigación

Los sistemas de airbag han representado un avance revolucionario en la seguridad vehicular, siendo responsables de salvar incontables vidas en accidentes que, de otro modo, podrían haber resultado fatales. Estos dispositivos, capaces de inflarse en fracciones de segundo, funcionan gracias a una reacción química extremadamente rápida que permite la expansión de una bolsa protectora en el momento preciso del impacto. Sin embargo, detrás de esta tecnología eficiente y vital, surgen interrogantes importantes sobre la naturaleza de los compuestos químicos involucrados, particularmente en relación con su toxicidad y su impacto ambiental.

Durante décadas, uno de los compuestos más utilizados para generar el gas necesario en los airbags fue el azida de sodio (NaN_3), debido a su capacidad para descomponerse rápidamente y liberar grandes volúmenes de nitrógeno. No obstante, su uso conlleva riesgos significativos. El azida de sodio es altamente tóxica e inestable; su descomposición genera sodio metálico, una sustancia extremadamente reactiva que puede causar incendios o explosiones al entrar en contacto con la humedad. Estos peligros no solo afectan a los ocupantes del vehículo, sino también a los equipos de rescate que intervienen tras un accidente (Xu et al., 2019).

Además de los riesgos directos para la salud y la seguridad, el uso de estos compuestos plantea serios desafíos ambientales. La activación de un airbag libera partículas y gases contaminantes, como óxidos de nitrógeno, que contribuyen a la contaminación atmosférica y requieren procesos complejos para su eliminación o reciclaje. Frente a esta problemática, tanto la industria automotriz

como la comunidad científica han comenzado a desarrollar alternativas más seguras y sostenibles. Entre ellas, destaca el uso de compuestos como el nitrato de guanidina, que ofrecen un mejor perfil toxicológico y menor impacto ambiental.

Este contexto pone de manifiesto la necesidad de replantear los materiales utilizados en los sistemas de seguridad automotriz, no solo desde la perspectiva técnica, sino también desde una visión integral que considere la salud humana y la sostenibilidad ambiental. La evolución de estos compuestos debe orientarse hacia soluciones que mantengan la eficacia de los sistemas de protección, pero que minimicen sus efectos adversos. La investigación continua en este campo resulta crucial para alcanzar un equilibrio entre innovación tecnológica, seguridad vial y responsabilidad ecológica.

Antecedentes investigativos

La exploración de los compuestos químicos empleados en sistemas de airbags ha experimentado un notable avance, en particular desde los años noventa, cuando su uso se empezó a generalizar en la industria automovilística. Un estudio inicial relevante en este ámbito fue realizado por Zukas en (1994), quien analizó la descomposición térmica del azida de sodio (NaN_3). En sus resultados, resaltó la sorprendente habilidad de este material para liberar grandes cantidades de nitrógeno en cortos periodos, lo que lo convirtió, durante largo tiempo, en el estándar predominante para los mecanismos de inflado, pese a sus riesgos asociados, como la toxicidad y su alta reactividad al calor y al impacto.

A lo largo del tiempo, otros científicos comenzaron a enfocarse en los efectos ambientales de estos dispositivos. Zhang en 2018, por ejemplo, realizó un análisis sobre los desechos producidos por los airbags convencionales, identificando subproductos como óxidos de nitrógeno y restos de sodio metálico. Estos desechos no solo representan un peligro para los pasajeros del vehículo, sino también para el entorno. Los resultados de este tipo de investigaciones han motivado un cambio en el sector hacia formulaciones más ecológicas, cumpliendo con las pautas de la química verde y las regulaciones ambientales más severas, especialmente en lugares como la Unión Europea y Estados Unidos.

En esta misma dirección, estudios más recientes, como los realizados por Xu y colegas en (2019), han sugerido alternativas efectivas al azida de sodio. Algunos de los compuestos más destacados incluyen el nitrato de guanidina ($\text{CH}_6\text{N}_4\text{O}_3$) y la nitroguanidina ($\text{CH}_4\text{N}_4\text{O}_2$), que ofrecen una descomposición mucho más controlada y generan residuos menos nocivos. Además, su manipulación es considerablemente más segura, y proporcionan una combustión más limpia,

produciendo menos humo, lo cual es especialmente relevante en el interior del vehículo en términos de salud y visibilidad para el conductor en caso de un accidente.

Al mismo tiempo, la American Chemical Society (2019) reportó avances significativos en el desarrollo de tecnologías híbridas para airbags, que incluyen sistemas de inflado en dos etapas. Esta innovación ajusta la intensidad de la reacción química según la severidad del impacto, optimizando el uso del gas generado y reduciendo de manera significativa la liberación de sustancias potencialmente perjudiciales. En los últimos años, se han registrado numerosas patentes que reflejan un creciente interés en la incorporación de materiales más sostenibles y compuestos aptos para procesos de reciclaje. Todo esto abre nuevos horizontes de investigación en el campo de la química aplicada a la seguridad automotriz, con un enfoque claro en la sostenibilidad y la innovación.

Betterton, E. A. (2003). Destino ambiental del azida de sodio derivada de las bolsas de aire de los automóviles. *Reseñas Críticas en Ciencia y Tecnología Ambiental*, 33(4), 423 - 458. Este trabajo analiza cómo la gran demanda de azida de sodio (NaN_3) para infladores aproximado 300 g por vehículo ha incrementado el riesgo de liberaciones ambientales y la formación de hidrazoico (HN_3), un gas tóxico y volátil, y discute estrategias de remediación a largo plazo.

Seo, Chung y Yoh (2011) desarrollaron un enfoque combinado experimental numérico para caracterizar infladores de airbag basándose en las propiedades reales de nuevos propelentes. Mediante ensayos de “tank test” y “closed bomb”, midieron las curvas de presión y temperatura durante la combustión de distintas formulaciones, y construyeron un modelo zonal componentes de combustión, filtro, plenum y salida que resuelve las ecuaciones de masa, energía y momento. Los resultados mostraron que las simulaciones reproducen la presión pico y la dinámica de ascenso con errores menores al 5 %, validando la fidelidad del modelo. Este trabajo demuestra la utilidad de integrar datos termodinámicos reales en el diseño y optimización de sistemas de inflado rápido, controlado y seguro, optimizando tiempos de despliegue y minimizando subproductos tóxicos.

Fattah (1996) examina los problemas asociados con el vertido masivo de azida de sodio resultante del despliegue y desecho de airbags en vehículos. En un breve artículo de *Chemical Week*, el autor: Contextualiza el uso de NaN_3 en infladores de airbags, estimando que cada unidad contiene alrededor de 200–300 g de este compuesto altamente tóxico.

Describe las prácticas de eliminación, señalando que muchos talleres y vertederos industriales carecen de protocolos adecuados, lo que ha llevado al vertido directo de residuos que reaccionan con el agua para liberar hidrazoico (HN_3), un gas extremadamente volátil y peligroso. Señala

riesgos ambientales y de salud, incluyendo la contaminación de aguas subterráneas y el potencial de exposiciones agudas por inhalación en plantas de reciclaje de chatarras. Recomienda mejorar la regulación, proponiendo métodos especializados de neutralización (por ejemplo, tratamiento con hipoclorito de sodio o peróxido de hidrógeno en condiciones controladas) y la implementación de estándares para el transporte y disposición final de los residuos de azida.

Formulación de la interrogante

¿Qué compuestos químicos se utilizan actualmente en los sistemas de airbag y cuáles son sus implicaciones en términos de seguridad, toxicidad y sostenibilidad ambiental?

Objetivos o propósitos

Objetivo General:

Analizar en detalle los compuestos químicos utilizados en los sistemas de airbag, su evolución a lo largo del tiempo hacia alternativas más seguras y sostenibles, y cómo estos cambios han influido tanto en la eficacia de la protección para los ocupantes del vehículo como en la reducción del impacto ambiental asociado.

Breve desarrollo teórico y conceptual

Los airbags son un componente crucial en la seguridad pasiva de los vehículos modernos, diseñados para reducir las lesiones graves en caso de un accidente al absorber parte de la energía generada por el impacto. Su función primordial es desplegarse instantáneamente ante los ocupantes durante un choque, creando una barrera suave que evita el contacto directo con las partes más rígidas del automóvil. Esta rápida activación se logra mediante una reacción química controlada que produce suficiente gas para inflar el dispositivo en fracciones de segundo.

La reacción química que permite el funcionamiento de los airbags se basa en un tipo de descomposición que genera calor, transformando una sustancia sólida en gas a altas temperaturas y presiones. Para esto, es necesario contar con un compuesto que tenga una alta reactividad y cuya descomposición sea rápida y predecible, manteniendo un control dentro de los límites establecidos.

Historia química del airbag

Avances químicos en los sistemas de bolsas de aire: seguridad, funcionalidad y sostenibilidad.

Evolución del propulsor químico: de la azida sódica a nuevas alternativas.

Durante las décadas de 1980 y 1990, la azida de sodio (NaN_3) se consolidó como el compuesto

más utilizado en los sistemas de bolsas de aire, debido a su capacidad para descomponerse rápidamente y liberar grandes volúmenes de nitrógeno gaseoso, esencial para el inflado instantáneo del airbag (Zukas, 1994). La reacción química fundamental es la siguiente:



Si bien esta reacción proporciona un gas inerte y no tóxico (N_2), también genera sodio metálico, un subproducto altamente reactivo. Para mitigar su peligrosidad, se incorporaron neutralizantes como el nitrato de potasio (KNO_3) y el dióxido de silicio (SiO_2), que reaccionan con el sodio para formar óxidos y silicatos menos agresivos (Zhang, 2018).

La toxicidad inherente a la azida sódica y los riesgos asociados a sus residuos motivaron a la industria automotriz a desarrollar alternativas más seguras. Desde principios de los años 2000, compuestos como la nitroguanidina y el nitrato de guanidina han ganado popularidad por su menor toxicidad, mejor estabilidad térmica y producción de residuos más benignos (Xu et al., 2019).

Funciones químicas clave en el despliegue del airbag

El inflado de una bolsa de aire ocurre en apenas milisegundos tras detectar un impacto. Esta secuencia rápida y precisa se basa en una serie de reacciones químicas altamente controladas. La azida sódica, históricamente la más utilizada, se descompone liberando nitrógeno. Al mismo tiempo, el sodio metálico generado es neutralizado por nitrato de potasio, formando óxidos más estables (Mohanraj et al., 2016). Posteriormente, el dióxido de silicio reacciona con estos óxidos, produciendo silicatos sólidos, lo que reduce aún más la toxicidad de los subproductos (Blomquist, 2004).

En sistemas más recientes, el nitrato de amonio (NH_4NO_3) ha sido incorporado como generador de gas alternativo.

Aunque su perfil tóxico es más bajo, su baja estabilidad térmica requiere una formulación extremadamente precisa para evitar riesgos de detonación accidental (Matsunaga et al., 2014).

También se emplean modificadores térmicos, como el carbonato de estroncio (SrCO_3), que actúan como absorbedores de calor, disminuyendo la temperatura del gas liberado y reduciendo el riesgo de quemaduras (Salwender et al., 1997). Por otro lado, lubricantes como talco o almidón de maíz se utilizan para facilitar el despliegue suave del tejido del airbag (Crandall et al., 1999).

Los sistemas de inflado más avanzados sustituyen los generadores químicos por gases comprimidos, como nitrógeno o argón, liberados mediante una pequeña carga pirotécnica. Este enfoque —conocido como inflado frío o sistema híbrido— mejora la limpieza del proceso y reduce significativamente los residuos peligrosos (Kullgren et al., 2007).

Tipos de bolsas de aire y su activación

Los sistemas de airbags se han diversificado para adaptarse a distintas configuraciones de impacto:

Frontales: Activados en colisiones frontales severas.

Laterales y de cortina: Diseñados para impactos laterales o vuelcos.

De rodilla, central y trasero: Enfocados en proteger extremidades y torsos según la posición del ocupante.

Integrados en cinturones y para peatones: Avances recientes para protección externa y distribución de fuerzas (Crandall et al., 1999; Mertz et al., 2001).

Su activación depende de sensores que detectan variaciones de aceleración. Un módulo electrónico (ECU) evalúa en milisegundos la necesidad del despliegue, considerando factores como el ángulo de impacto, la ocupación del vehículo y la severidad de la colisión (Mohanraj et al., 2016).

Aspectos termodinámicos y cinéticos del inflado

Desde el punto de vista químico, el inflado del airbag se basa en reacciones exotérmicas de descomposición rápida. Según la teoría de colisiones, solo las moléculas con suficiente energía superan la barrera de activación. En este caso, un detonador eléctrico inicia la reacción que, idealmente, sigue una cinética de orden cero, manteniendo la velocidad de liberación de gas constante e independiente de la concentración inicial del compuesto.

En términos termodinámicos, se requiere una entalpía negativa para asegurar la producción de calor suficiente que acompañe la generación de gas. La ecuación de los gases ideales permite estimar el volumen y la presión alcanzados dentro del airbag, lo cual es fundamental para un inflado efectivo sin causar lesiones térmicas ni explosiones secundarias.

Avances en formulación química y sostenibilidad

La industria ha adoptado nuevas formulaciones con percloratos, nitroguanidina y compuestos sin metales pesados, que producen menos residuos y presentan mayor estabilidad térmica. Además, catalizadores como óxidos de hierro (Fe_2O_3) o de cobre (CuO) aceleran la reacción sin afectar

la seguridad (Zhang, 2018). Los nuevos sistemas también incorporan retardantes de llama para prevenir propagación térmica en choques múltiples.

Respecto al impacto ambiental, se han desarrollado protocolos para desactivar y reciclar de forma segura los residuos sólidos y gaseosos generados tras una activación. Las soluciones modernas promueven generadores de gas libres de metales tóxicos, alineados con las exigencias de sostenibilidad de la industria (SAE International, 2020).

Riesgos asociados al despliegue del airbag

Aunque los airbags salvan vidas, su activación puede causar ciertas lesiones, dependiendo de la posición del ocupante, su estatura, el uso del cinturón y la severidad del impacto. Las lesiones más comunes incluyen:

- Abrasiones, quemaduras térmicas y químicas, especialmente en cara, brazos y cuello.
- Traumatismos oculares y problemas respiratorios por el polvo generado.
- Contusiones torácicas y fracturas costales, principalmente en personas mayores.
- Pérdida auditiva temporal por el ruido generado (superior a 160 dB).
- Riesgos adicionales en embarazadas, cuando la postura no es la adecuada (American College of Obstetricians and Gynecologists, 2015).

Cabe destacar que estos riesgos son significativamente menores en comparación con los beneficios protectores del sistema.

La evolución del airbag representa un avance destacado en la ingeniería automotriz, donde la química desempeña un rol fundamental en su funcionamiento, seguridad y sostenibilidad. Los desarrollos actuales apuntan a sistemas más inteligentes, modulares y limpios, capaces de adaptarse a múltiples escenarios de impacto sin comprometer la salud del ocupante ni el medio ambiente.

La investigación continúa explorando nuevas mezclas reactivas, catalizadores más eficientes y sistemas híbridos que reduzcan la necesidad de materiales explosivos, reafirmando el compromiso de la industria con la innovación responsable.

2. METODOLOGÍA

Método y/o Procedimiento metodológico

Este estudio se desarrolló bajo un enfoque de revisión documental, basado en la recopilación, análisis y síntesis de información procedente de fuentes científicas especializadas. Para ello, se consultaron libros, artículos revisados por pares, normas técnicas y documentos institucionales

disponibles en repositorios académicos reconocidos, incluyendo el de la Universidad Metropolitana de Educación, Ciencia y Tecnología (UMECIT), entre otros. Se priorizó la selección de fuentes pertinentes, actualizadas y con respaldo científico, especialmente aquellas publicadas en la última década, con el fin de garantizar la validez y actualidad de los datos analizados.

La estrategia metodológica se estructuró en las siguientes etapas:

- **Definición del problema de investigación:** En esta fase inicial se delimitó claramente el objeto de estudio, se establecieron los objetivos específicos y se acotó el alcance del trabajo, lo que permitió orientar adecuadamente el proceso investigativo.
- **Revisión de la literatura:** Se llevó a cabo una revisión exhaustiva de la bibliografía especializada, abarcando estudios científicos y técnicos que abordan el uso de compuestos químicos en los sistemas de airbags, permitiendo identificar tendencias, avances y vacíos en el conocimiento existente.
- **Recopilación de datos secundarios:** Se seleccionaron y extrajeron datos relevantes de fuentes previamente identificadas, priorizando aquellos documentos que ofrecieran evidencia empírica y análisis detallados sobre la temática.
- **Evaluación y análisis de datos:** La información recopilada fue sometida a un proceso de análisis crítico, empleando técnicas cualitativas de comparación, categorización y síntesis, con el propósito de responder a las preguntas de investigación y formular conclusiones fundamentadas.
- Este enfoque metodológico permitió desarrollar un análisis riguroso, coherente y sistemático, contribuyendo a una comprensión más profunda sobre los aspectos químicos implicados en el funcionamiento y evolución de los sistemas de bolsas de aire.

Aspectos éticos

Este estudio se llevó a cabo sin la participación directa de individuos ni la realización de experimentos con animales, por lo que no fue necesario aplicar procedimientos de consentimiento informado. Sin embargo, en todo momento se ha adherido a los principios éticos fundamentales de la investigación científica, especialmente en lo que respecta al respeto por los derechos de autor. Dado que la mayor parte de la información presentada en este trabajo proviene de estudios previos realizados por expertos en la materia, se ha procurado citar de manera rigurosa todas las fuentes utilizadas, garantizando así el reconocimiento adecuado de los autores y sus contribuciones al conocimiento científico. La integridad académica y la transparencia en la referencia de las fuentes son pilares esenciales en la construcción de este estudio.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el marco de esta investigación, se identificó que la azida de sodio (NaN_3) ha sido el compuesto más utilizado durante décadas en la activación de sistemas de airbags, debido a su destacada capacidad para generar nitrógeno gaseoso de manera rápida y eficiente (Wang et al., 2019). Sin embargo, la desventaja de este compuesto radica en los riesgos asociados con los gases que se liberan durante su activación.

Se ha evidenciado que los óxidos de nitrógeno, generados en la reacción de la azida de sodio, son gases altamente irritantes y potencialmente cancerígenos, lo que suscita preocupaciones sobre la salud de las personas involucradas, tanto en el momento del despliegue del airbag como en el proceso de fabricación y desecho de estos dispositivos (American Chemical Society, 2019).

Alternativas Más Seguras: Nitrato de Guanidina y Nitroguanidina

Frente a estos riesgos, el sector automotriz ha comenzado a explorar alternativas más seguras y eficaces, como el nitrato de guanidina y la nitroguanidina. Investigaciones recientes indican que el empleo de estos compuestos no solo mejora la seguridad en la activación de los airbags, sino que también contribuye significativamente a la sostenibilidad del proceso, ya que genera menores emisiones de gases tóxicos (Xu et al., 2019). Este avance abre la puerta a una nueva era en la tecnología de airbags, en la que la protección de los usuarios y la minimización del impacto ambiental van de la mano.

Química sostenible y diseño modular

Un avance adicional en el campo de los airbags es el impulso hacia la química sostenible, un enfoque que no solo busca mejorar la seguridad de los consumidores, sino también preservar el medio ambiente y proteger la salud de los trabajadores involucrados en la fabricación y manejo de estos dispositivos. La química sostenible promueve el uso de materiales menos tóxicos y procesos más amigables con el entorno, alineándose con las crecientes demandas de responsabilidad social corporativa y regulaciones ambientales (Zhang, 2018).

Asimismo, el diseño modular ha demostrado ser una estrategia eficaz para integrar nuevas tecnologías sin comprometer la eficiencia ni la seguridad. Este enfoque permite a los fabricantes adaptarse rápidamente a las normativas emergentes, minimizando los costos asociados con la transición tecnológica. A través de la modularidad, se facilita la investigación y el desarrollo de soluciones más seguras y eficaces, lo que acelera la adopción de avances científicos en la industria.

Reflexiones finales y perspectivas futuras

Aunque el uso de compuestos alternativos como el nitrato de guanidina y la nitroguanidina representa un paso importante hacia la mejora de la seguridad y la sostenibilidad de los airbags, aún persisten desafíos relacionados con el reciclaje de los desechos generados por estos sistemas. Con el aumento en la cantidad de vehículos equipados con nuevos sistemas de airbags, será esencial desarrollar tecnologías de reciclaje eficientes que permitan gestionar adecuadamente los residuos, minimizando su impacto ambiental (Zhang, 2018).

La integración de estas tecnologías innovadoras en los sistemas de airbags marca un progreso significativo hacia la creación de dispositivos más seguros, menos perjudiciales para la salud humana y con un menor impacto en el medio ambiente (Xu et al., 2019). Sin embargo, el desafío futuro será garantizar que estos avances no solo se mantengan, sino que también se amplíen en función de las crecientes exigencias ambientales y de seguridad.

4. CONCLUSIONES

Los airbags representan una de las innovaciones más significativas en la seguridad automotriz, aunque su funcionamiento tradicional con compuestos como la azida de sodio ha planteado desafíos debido a la generación de subproductos tóxicos. En respuesta, la industria ha avanzado hacia alternativas más seguras y sostenibles, como el uso de nitrato de guanidina y nitroguanidina, que ofrecen mayor estabilidad y reducen el impacto ambiental.

Asimismo, la adopción de principios de la química verde y el diseño modular en los generadores de gas ha permitido adaptar estos sistemas con mayor eficiencia, sin necesidad de rediseñar por completo su estructura. A pesar de los importantes avances en la protección durante diferentes tipos de colisiones, los airbags aún presentan riesgos, como quemaduras y lesiones asociadas a su despliegue. Por ello, el sector automotriz enfrenta el desafío de seguir innovando hacia tecnologías más seguras, sostenibles y reciclables, que no solo garanticen la protección de los ocupantes, sino que también contribuyan activamente al cuidado del medio ambiente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Chemical Society. (2019). How Airbags Work. <https://www.acs.org>
- Bender, D. A., & Botham, K. M. (2021). Harper: Bioquímica ilustrada (31.ª ed.). McGraw-Hill Education.
- Betterton, E. A. (2003). Destino ambiental de la azida de sodio derivada de las bolsas de aire de los automóviles. *Reseñas Críticas en Ciencia y Tecnología Ambiental, 33*(4), 423–458.
- Brown, T. L., LeMay, H. E., Bursten, B. E., & Murphy, C. J. (2020). Química: La ciencia

central (13.^a ed.). Pearson Educación.

- Chang S, Lamm SH. Efectos en la salud humana de la exposición a la azida de sodio: una revisión y análisis de la literatura. *Revista Internacional de Toxicología*. 2003; 22(3):175-186. doi:10.1080/10915810305109
- Fattah, H. (1996). Airbags-Sodium azide dumping?. *Chemical Week*, 158(11), 45-45.
- Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología. (2021). Avances en la química automotriz. <https://www.fecyt.es>
- SAE International. (2020). Advances in Automotive Safety Technologies. <https://www.sae.org>
- Seo, Y.D., Chung, S.H., Yoh, J.J., 2011. Automotive airbag inflator analysis using the measured properties of modern propellants. *Fuel* 90 (4), 1395–1401.
- Smith, W. F. (2017). Principios de ciencia e ingeniería de materiales. McGraw-Hill Education.
- Universidad Metropolitana de Educación, Ciencia y Tecnología (UMECIT). (2022). Repositorio Institucional UMECIT. <https://repositorio.umecit.edu.pa>
- Xu, Q., et al. (2019). Development of New Gas Generants for Automotive Airbag Systems. *Journal of Energetic Materials*, 37(4), 301–316.
- Zhang, L. (2018). Environmental Considerations in Automotive Pyrotechnics. *Automotive Safety Journal*, 12(2), 145–160.
- Zukas, J. A. (2016). Explosive Effects and Applications. Springer.