

Optimización de sistemas de diagnóstico automotriz.

Optimization of automotive diagnostic systems.

Antonio Gabriel Castillo Medina^{1*}E-mail: a.antonio83@uniandes.edu.ecORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0045-7495>Esteban Fernando López Espinel¹E-mail: ua.estebanle84@uniandes.edu.ecORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7502-3463>Jorge Andrés Rodas Buenaño¹E-mail: ua.jorgerb85@uniandes.edu.ecORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5786-5262>¹Universidad Regional Autónoma de Los Andes, Ambato. Ecuador.

*Autor para correspondencia.

Cita sugerida (APA, séptima edición)

Castillo Medina, A. G., López Espinel, E. F., & Rodas Buenaño, J. A. (2024). Optimización de sistemas de diagnóstico automotriz. *Revista Científica Cultura, Comunicación y Desarrollo*, 9(S1), 65-70. <http://rccd.ucf.edu.cu/index.php/rccd>

RESUMEN

La creciente complejidad de los sistemas vehiculares modernos demandó métodos avanzados para el diagnóstico y monitoreo preciso de datos. El protocolo de diagnóstico a bordo (OBD-II) y los dispositivos asociados, como el ELM327, fueron esenciales para este propósito, pero enfrentaron desafíos en cuanto a estabilidad y precisión. Por ende, el estudio optimizó y evaluó un sistema de diagnóstico vehicular, al usar el ELM327 modificado y PCMSCAN para mejorar la precisión en el análisis de datos OBD-II y así mejorar el rendimiento y seguridad del vehículo. La metodología consistió en emplear el ELM327 modificado con una conexión USB para asegurar la estabilidad en la transmisión de datos. Se configuraron y monitorearon los Identificadores de Parámetros de Diagnóstico a Bordo (PIDs) para evaluar la recolección de datos en vivo bajo diversas condiciones operativas. Los resultados demostraron una mejora significativa en la estabilidad y confiabilidad de la recopilación de datos, al superar las limitaciones de los métodos convencionales. La precisión en la adquisición de datos y la capacidad para monitorear parámetros en tiempo real fueron validadas, al proporcionar una información detallada sobre el rendimiento y la seguridad del vehículo. En conclusión, la integración del ELM327 modificado y PCMSCAN representó un avance significativo en la tecnología de diagnóstico vehicular. Esta combinación ofreció una solución robusta para el análisis OBD-II, al permitir un diagnóstico más preciso y contribuir a una mayor eficiencia y seguridad del vehículo. Además, facilitó la apertura de oportunidades para futuras investigaciones en telemetría y mantenimiento predictivo.

Palabras clave:

Parámetros de Diagnóstico a Bordo, Confiabilidad, Mantenimiento predictivo, Tecnología automotriz.

ABSTRACT

The increasing complexity of modern vehicular systems has demanded advanced methods for precise data diagnostics and monitoring. The on-board diagnostic (OBD-II) protocol and associated devices, such as the ELM327, have been essential for this purpose but faced challenges regarding stability and accuracy. Therefore, the study optimized and evaluated a vehicular diagnostic system using the modified ELM327 and PCMSCAN to improve the accuracy of OBD-II data analysis, thereby enhancing vehicle performance and safety. The methodology involved using the modified ELM327 with a USB connection to ensure stability in data transmission. On-board diagnostic Parameter Identifiers (PIDs) were configured and monitored to evaluate live data collection under various operating conditions. The results demonstrated a significant improvement in the stability and reliability of data collection, surpassing the limitations of conventional methods. The accuracy in data acquisition and the ability to monitor real-time parameters were validated by providing detailed information on vehicle performance and safety. In conclusion, the integration of the modified ELM327 and PCMSCAN represented a significant advancement in vehicle diagnostic technology. This combination offered a robust solution for OBD-II analysis, enabling more precise diagnostics and contributing to greater vehicle efficiency and safety. Additionally, it facilitated the opening of opportunities for future research in telematics and predictive maintenance.

Keywords:

On-Board Diagnostics Parameters, Reliability, Predictive maintenance, Automotive technology.

Introducción

La revolución digital en el sector automotriz ha impulsado el desarrollo de tecnologías avanzadas de comunicación vehicular, como el sistema de diagnóstico a bordo (OBD) y la red de área de controladores (CAN) (Anchaluisa, & Sánchez, 2024). Estas innovaciones son fundamentales para los sistemas de transporte inteligentes, al permitir una recopilación de datos vehiculares sin precedentes (Yang, et. al., 2024). De modo que optimiza el rendimiento, al mejorar la seguridad y aumentar la eficiencia energética de los vehículos. Aunque el protocolo CAN fue originalmente concebido para reducir costos de cableado y mejorar la seguridad de los datos, se ha expandido para facilitar una comunicación compleja entre las unidades de control electrónico (ECUs) de los vehículos modernos (Becerra, et. al., 2024).

Asimismo, se ha explorado la implementación del protocolo CAN, al utilizar un computador de placa única (SBC) para monitorear parámetros vehiculares de manera remota (Zambrano, et. al., 2020). Este enfoque presenta una solución de bajo costo y alta eficiencia para la comunicación entre nodos en un vehículo (Arévalo, & Ochoa, 2024). De modo que demuestra la viabilidad de monitorear parámetros como la velocidad, la temperatura del motor y el estado de los frenos a través de un sistema integrado y accesible remotamente (Zhang, et. al., 2022). Sin embargo, a pesar de los avances tecnológicos y la estandarización de protocolos, persisten desafíos en la extracción y análisis eficiente de datos vehiculares a gran escala.

Además, se ha investigado el potencial de sistemas basados en Arduino para la recolección eficiente de datos OBD-II, al proporcionar soluciones económicas y versátiles para la monitorización vehicular (Padilla, & Rengifo, 2023). En diversos estudios, se ha empleado una versión modificada del ELM327, al ser compatible con todos los protocolos OBD-II (Paredes, et. al., 2022). Incluso, mejora la capacidad del dispositivo para convertir y acceder a redes HS-CAN y MS-CAN, al ampliar la aplicación en diversos vehículos y sistemas (Ryu, et. al., 2020). Esta capacidad del ELM327 modificado ofrece una versatilidad y conveniencia inigualables para los diagnósticos vehiculares y la recopilación de datos en tiempo real (Fakher, et. al., 2022).

Estas mejoras subrayan la importancia del ELM327 como una herramienta indispensable para la recolección de datos eficiente y accesible, al avanzar en la investigación y desarrollo en telemática y diagnósticos automotrices (Recalde, et. al., 2024). El enfoque metodológico utiliza el ELM327 modificado para garantizar una compatibilidad integral con los protocolos OBD-II y el acceso a redes CAN de alta y media velocidad (Webert, et. al., 2022). De igual manera, implementa el software PCMSCAN para una adquisición y análisis de datos más eficaces y detallados (Inci, et. al., 2024).

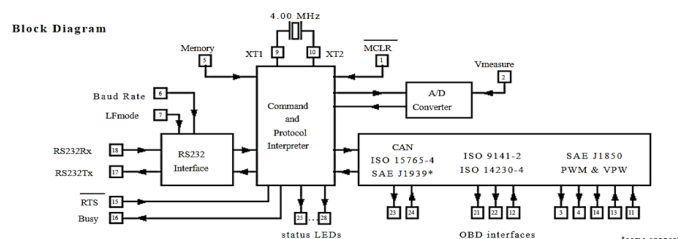
Finalmente, integrando tecnologías de transmisión inalámbrica y sistemas GPS, este estudio busca avanzar significativamente en los sistemas de transporte inteligente (Zhong, et. al., 2024). Por tal motivo, el objetivo principal de estudio consiste en optimizar y evaluar un sistema de diagnóstico vehicular, al usar el ELM327 modificado y PCMSCAN. De

forma que mejore la precisión en el análisis de datos OBD-II y así optimizar el rendimiento y seguridad del vehículo.

Materiales y métodos

En esta investigación se utilizó un procedimiento metodológico detallado para la recopilación y análisis de datos vehiculares mediante recursos tecnológicos avanzados. Se seleccionaron vehículos compatibles con los protocolos OBD-II y se usó un dispositivo ELM327 modificado para comunicarse con el bus CAN de los vehículos (ver figura 1 y 2). Este dispositivo actúa como un intérprete OBD, al facilitar la comunicación a través de los protocolos SAE, CAN, e ISO.

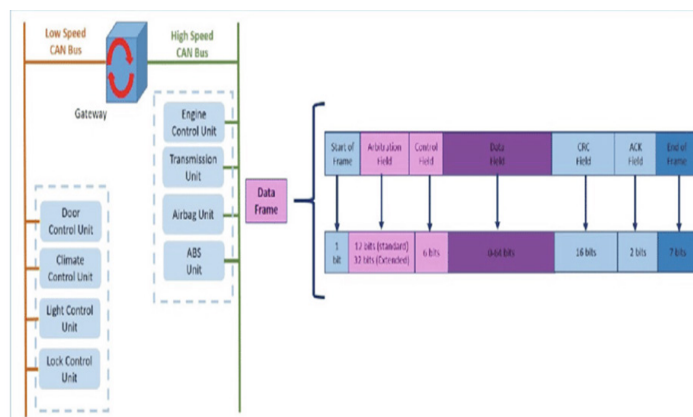
Fig. 1: Estructura LM327.



Fuente: Elaboración propia.

El protocolo CAN permite una comunicación eficiente entre las unidades de control electrónico (ECUs) del vehículo. De forma que soporta distintos formatos de trama y velocidades según las necesidades internas del vehículo. La estructura de la red CAN incluye buses de alta y baja velocidad y especifica el tamaño de cada campo en bits (ver figura 3), lo cual es esencial para el análisis y la interpretación de los datos vehiculares.

Fig. 3: Estructura del CAN vehicular y formato del marco de datos.



Fuente: Elaboración propia.

La recolección de datos se realizó mediante una conexión USB COM4 entre el computador y el puerto de diagnóstico a bordo (OBD-II) del vehículo. Esta interfaz estándar OBD-II permite el acceso a los Identificadores de Parámetros de Diagnóstico a Bordo (PIDs) conforme al estándar SAE J1979/ISO 15031-5. Los fabricantes también pueden definir PIDs adicionales específicos para sus modelos.

El software PCMSCAN se utilizó para interpretar los datos recolectados, al analizar los parámetros vehiculares en

diferentes condiciones de conducción. Este enfoque metodológico asegura la validez y fiabilidad de los datos, al representar un avance significativo en la capacidad de recogida y análisis de datos vehiculares. Incluso proporciona una herramienta valiosa para la investigación en sistemas de transporte inteligente.

Resultados-discusión

En la fase de resultados de esta investigación, se obtuvieron hallazgos significativos sobre la conectividad y comunicación entre el dispositivo ELM327 y la unidad de control electrónico (ECU) del vehículo. La conexión con el escáner OBD-II fue exitosa, al permitir el uso completo del software PCMSCAN para la comunicación con el ELM327 y la ECU del vehículo (ver figura 4). La interfaz ELM327 estableció comunicación correctamente a través del puerto USB COM4, y se confirmaron los PIDs para el monitoreo de datos en vivo desde la ECU.

Fig. 4. Conexión Interface ELM327 y ECU.

Diagnostics	Performance	Dashboards	Tools	Settings	Console
[21:04:02.214] Tue Apr 09 21:04:02 2024					
[21:04:02.214] PCMSCAN™ v2.4.12 (Build 1194)					
[21:04:02.231] Applying license for: UNIANDES (UNIANDES)					
[21:04:02.232] Creating New Configuration File...					
[21:04:02.237] License applied successfully!					
[21:04:02.237] Loading OBD-II Parameter Set...					
[21:04:02.318] Loading PID scripts...					
[21:04:02.319] Loaded 3 PID scripts.					
[21:04:06.991] Opening OBD-II Connection...					
[21:04:06.991] Searching for ELM interface...					
[21:04:06.993] Checking COM4...					
[21:04:08.515] Found ELM interface on COM4!					
[21:04:11.709] Switching to 115200 baud.					
[21:04:12.349] OBD-II connection successful!					
[21:04:12.349] Retrieving VIN...					
[21:04:13.105] VIN is LDC1123245637894					
[21:04:13.118] Detecting Vehicle Information...					
[21:04:15.269] Detected 1 on-board modules.					
[21:04:15.269] Finished detecting vehicle information.					
[21:04:35.660] Detecting Supported PIDs...					

Fuente: Elaboración propia.

La visualización del VIN del vehículo confirmó la comunicación efectiva, al proporcionar el número de identificación del vehículo utilizado en la prueba. Los datos en vivo mostraron consistencia y permitieron observar y calcular valores mínimos, máximos y promedios (ver figura 5), lo cual es fundamental para entender la dinámica de los parámetros vehiculares bajo diferentes condiciones operativas.

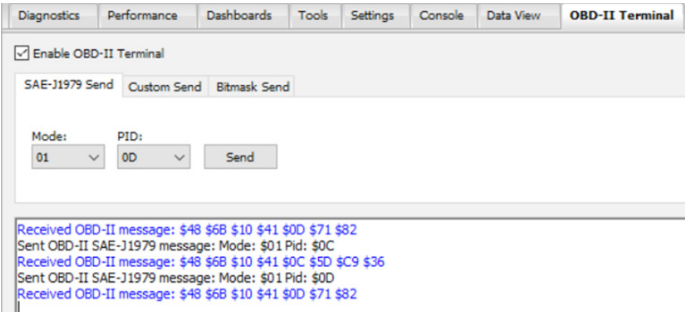
Fig. 5: Datos en vivo.

Diagnostics	Performance	Dashboards	Tools	Settings	Console	Data View
PID	Name	Value	Units	Min	Avg	Max
SAEECT	Engine Coolant Temperature	82	°C	81	82	82
SAEIAT	Intake Air Temperature	214	°C	214	214	215
SAEMAP	Intake Manifold Absolute Pressure	245	kPa	245	245	245
SAERPM	Engine RPM	6005	rpm	5998	6005	6010
SAEVSS	Vehicle Speed Sensor	113	km/h	87	97	113

Fuente: Elaboración propia.

La captura de datos se realizó, al utilizar la herramienta de diagnóstico del software PCMSCAN a través de la funcionalidad “Terminal OBD-II”. Esta funcionalidad se empleó para enviar solicitudes de datos del Modo 01 a la ECU del vehículo, como la velocidad y las revoluciones por minuto (RPM) con los PIDs 0C y 0D respectivamente. El sistema demostró la efectividad al generar y registrar datos de manera consistente y fiable, independientemente de la variabilidad en el estado de los sensores (ver figura 6).

Fig. 6: Envío de mensaje de velocidad y RMP del MODO 01.



Fuente: Elaboración propia.

Para decodificar el mensaje OBD-II y calcular las RPM del motor, se siguió la normativa SAE-J1979. Los bytes relevantes para el cálculo de RPM se encuentran justo después del identificador del PID solicitado. Al aplicar la fórmula estándar para calcular el RPM, se obtuvo un valor de 6002.25 rpm. De igual manera, para calcular la velocidad del vehículo a partir del mensaje OBD-II con el PID 0D, se convirtió el valor hexadecimal del byte relevante a decimal, al obtener una velocidad de 113 km/h.

Estos hallazgos resaltan la utilidad y eficiencia del dispositivo ELM327 modificado y el software PCMSCAN para el análisis de datos vehiculares. De modo que garantiza la posibilidad de replicar el estudio y sirviendo como un modelo valioso para futuras investigaciones en telemetría vehicular.

Escalabilidad de la metodología: Evaluación y adaptabilidad.

La escalabilidad de una metodología es crucial para su aplicabilidad en un amplio rango de escenarios y condiciones operativas. En este análisis, se explorará la escalabilidad de la metodología desarrollada para el diagnóstico vehicular mediante el uso del dispositivo ELM327 modificado y el software PCMSCAN. La aplicación de esta metodología en una variedad de vehículos y condiciones operativas permitirá evaluar su adaptabilidad y efectividad, al identificar mejoras y áreas de expansión.

Metodología:

- 1. Selección de vehículos diversos:
- Variedad de Modelos: Incluir una amplia gama de vehículos de diferentes fabricantes, modelos y años de fabricación.

- Tipos de Vehículos: considerar vehículos de pasajeros, vehículos comerciales ligeros, camiones y autobuses para evaluar la metodología en diversos contextos.

2. Condiciones operativas variadas:

- Ambientes Geográficos Diversos: aplicar la metodología en distintos ambientes geográficos, como zonas urbanas, rurales, montañosa y costera.
- Condiciones Climáticas Diferentes: evaluar el rendimiento del sistema en diversas condiciones climáticas, incluyendo temperaturas extremas, humedad alta, y condiciones de lluvia y nieve.

3. Evaluación de parámetros clave:

- Estabilidad de Conexión: monitorizar la estabilidad de la conexión entre el ELM327 y la ECU bajo diferentes condiciones operativas.
- Precisión y Consistencia de Datos: analizar la precisión y consistencia de los datos recolectados en diferentes vehículos y condiciones operativas.
- Eficiencia del Sistema: evaluar la eficiencia del sistema en términos de tiempo de respuesta, cantidad de datos procesados y capacidad de diagnóstico.

Resultados esperados:

1. Adaptabilidad a diferentes vehículos:

- Compatibilidad Universal: la metodología debe demostrar su capacidad para funcionar con una amplia gama de vehículos que soportan el protocolo OBD-II.
- Customización de PIDs: la capacidad de configurar y personalizar los PIDs para diferentes marcas y modelos de vehículos es esencial para su adaptabilidad.

2. Rendimiento en condiciones operativas diversas:

- Estabilidad de Datos: la recolección de datos debe ser estable y confiable en todas las condiciones operativas evaluadas.
- Resiliencia del Sistema: el sistema debe mantener su funcionalidad y precisión incluso bajo condiciones operativas adversas, como temperaturas extremas o alta humedad.

3. Identificación de mejoras y expansión:

- Interfaz y Hardware Mejorado: evaluar si hay necesidad de mejoras en el hardware o la interfaz de conexión para aumentar la estabilidad y fiabilidad en ciertas condiciones.
- Ampliación de Funcionalidades: considerar la incorporación de nuevas funcionalidades y herramientas de análisis para mejorar el rendimiento del sistema en aplicaciones específicas.

Análisis de resultados:

1. Compatibilidad y adaptabilidad:

- La metodología debe ser compatible con un amplio espectro de vehículos, mostrando adaptabilidad al configurarse para diferentes marcas y modelos.
- Evaluar si hay vehículos o situaciones donde la metodología presenta limitaciones, identificando las causas y posibles soluciones.

2. Desempeño en diversas condiciones:

- Analizar los datos recolectados bajo diferentes condiciones para evaluar la consistencia y precisión de la información.
- Identificar patrones o condiciones específicas donde la metodología puede necesitar ajustes para mantener su efectividad.

3. Áreas de mejora y expansión:

- Evaluar la necesidad de mejorar el hardware del dispositivo ELM327 o el software PCMSCAN para aumentar la capacidad de diagnóstico y la fiabilidad del sistema.
- Considerar la integración con otras tecnologías emergentes, como sensores adicionales o sistemas de comunicación avanzados, para ampliar las capacidades de la metodología.

La evaluación de la escalabilidad y adaptabilidad de la metodología desarrollada para el diagnóstico vehicular es fundamental para su implementación en un entorno real y diverso. La aplicación en una variedad de vehículos y condiciones operativas permitirá identificar fortalezas y debilidades, proporcionando información valiosa para futuras mejoras. Los resultados de esta evaluación ayudarán a optimizar la metodología, haciéndola más robusta y eficiente, y facilitando su adopción en una amplia gama de aplicaciones de mantenimiento predictivo y gestión de flotas.

Integración de sistemas de aprendizaje automático.

La integración de sistemas de aprendizaje automático en el análisis predictivo de datos vehiculares representa un avance significativo hacia diagnósticos más precisos y eficientes. Esta metodología tiene el potencial de transformar la manera en que se gestionan y mantienen los vehículos. De modo que ofrece una solución más proactiva y precisa en el diagnóstico automotriz. Entre los pasos para la integración se establecen:

- I. Selección de algoritmos: el primer paso es elegir los algoritmos de aprendizaje automático adecuados para el análisis predictivo. Estos algoritmos deben ser capaces de manejar grandes volúmenes de datos y realizar predicciones precisas sobre el estado de los vehículos. Los algoritmos comunes en este contexto incluyen redes neuronales profundas, máquinas de soporte vectorial y árboles de decisión. La selección depende de la naturaleza de los datos disponibles y los objetivos específicos del análisis.
- II. Entrenamiento del modelo: una vez seleccionados los algoritmos, el siguiente paso es entrenar el modelo. Esto implica utilizar datos históricos y en tiempo real para enseñar al modelo a identificar patrones y hacer predicciones. Los datos históricos pueden incluir registros de mantenimiento pasados, fallos anteriores y otros datos relevantes sobre el rendimiento del vehículo. Durante el entrenamiento, el modelo ajusta sus parámetros para minimizar los errores en sus predicciones.
- III. Evaluación de desempeño: después de entrenar el modelo, es crucial evaluar su desempeño para asegurar que sea efectivo y preciso. Esto se realiza al comparar las predicciones del modelo con datos reales y

al observar métricas de rendimiento como precisión, exactitud y sensibilidad. La evaluación ayuda a determinar si el modelo puede detectar fallos de manera oportuna y proporcionar predicciones confiables sobre el estado del vehículo.

- IV. Implementación y validación: una vez que el modelo ha sido evaluado y se ha demostrado que es efectivo, se procede a su implementación en el sistema de diagnóstico vehicular. En esta fase, el modelo se integra con el sistema de recopilación de datos existente, como el dispositivo ELM327 y el software PCMSCAN. La validación en condiciones reales es esencial para confirmar que el modelo funciona adecuadamente en situaciones prácticas y con datos en tiempo real.
- V. Resultados potenciales: la integración de aprendizaje automático puede mejorar significativamente la precisión de los diagnósticos vehiculares. Los modelos predictivos pueden identificar fallos potenciales con mayor antelación, permitiendo intervenciones preventivas antes de que ocurran problemas graves. Esto no solo optimiza el rendimiento del vehículo, sino que también reduce el costo y el tiempo de mantenimiento. Además, un análisis predictivo más exacto puede mejorar la seguridad al detectar problemas antes de que afecten la operatividad del vehículo.
- VI. Beneficios generales: los beneficios de integrar sistemas de aprendizaje automático incluyen una mayor precisión en el diagnóstico de fallos, una optimización del rendimiento vehicular mediante ajustes proactivos, y una mejora en la seguridad del vehículo. Al utilizar modelos avanzados, se puede anticipar y prevenir problemas antes de que se conviertan en fallos críticos, lo que contribuye a una gestión más eficiente de la flota vehicular y una mejor experiencia para el conductor.

Consideraciones finales:

Comparación con estudios previos: Los resultados obtenidos corroboran la eficacia del protocolo de comunicación basado en paquetes para la transmisión de datos de diagnóstico, un enfoque previamente reconocido en la literatura como crucial para la mejora de los sistemas de diagnóstico remoto. Al comparar estos hallazgos, se confirma que la implementación del dispositivo ELM327 y el uso de una interfaz USB representan un avance significativo en la estabilidad de la comunicación. Estos resultados se alinean con las observaciones de estudios previos que subrayan la importancia de una transmisión de datos confiable y eficiente para el análisis y diagnóstico vehicular.

Ventajas sobre tecnologías alternativas: La comparación entre el sistema basado en USB y las soluciones Bluetooth resalta la superioridad del primero en términos de estabilidad y fiabilidad. La evidencia obtenida en este estudio respalda, quienes señalaron la efectividad de los sistemas basados en USB para aplicaciones de diagnóstico vehicular. La mejora en la precisión y consistencia de los datos, evidenciada en la recolección de PIDs, subraya las ventajas del sistema USB sobre las alternativas basadas en Bluetooth. Este avance ofrece una plataforma robusta para la telemetría vehicular avanzada y la gestión eficiente de flotas.

Implicaciones y direcciones futuras: Los resultados indican que la metodología desarrollada tiene un impacto significativo en la optimización del diagnóstico vehicular, alineándose con la visión de Smith y Miller en el año 2013 para aplicaciones de diagnóstico a gran escala. La capacidad del sistema para proporcionar datos precisos y fiables es crucial para el mantenimiento predictivo y la mejora del rendimiento vehicular. Futuras investigaciones podrían explorar la aplicación de esta metodología en una gama más amplia de vehículos y condiciones operativas, así como investigar la integración de sistemas de aprendizaje automático para potenciar el análisis predictivo. Estas direcciones futuras podrían contribuir a avances significativos en la telemetría vehicular y la inteligencia artificial aplicada al mantenimiento automotriz.

Conclusiones

La investigación ha demostrado que la implementación del dispositivo ELM327 modificado junto con el software PCMSCAN proporciona una mejora significativa en la eficiencia y estabilidad del diagnóstico vehicular. La combinación de una interfaz USB con el protocolo de comunicación basado en paquetes asegura una transmisión de datos precisa y confiable, superando las limitaciones de los sistemas basados en Bluetooth. Este avance en la tecnología de diagnóstico permite una recopilación de datos más robusta y continua, facilitando un análisis más detallado y preciso del rendimiento y estado del vehículo.

Los resultados obtenidos subrayan el potencial de la metodología desarrollada para ser aplicada en estrategias de mantenimiento predictivo. Al proporcionar datos detallados y fiables sobre el estado de los componentes del vehículo, el sistema permite una evaluación temprana de posibles fallos y una optimización en la planificación del mantenimiento. Esta capacidad de anticipar problemas contribuye a la mejora de la eficiencia operativa y la seguridad vehicular, ofreciendo un modelo valioso para la gestión avanzada de flotas y la optimización del rendimiento automotriz.

El estudio abre nuevas avenidas para investigaciones futuras, incluyendo la aplicación de la metodología en una variedad más amplia de vehículos y condiciones operativas para evaluar su escalabilidad y adaptabilidad. Además, se recomienda explorar la integración de sistemas de aprendizaje automático para mejorar el análisis predictivo de los datos recopilados. Estas líneas de investigación podrían llevar a avances significativos en la telemetría vehicular y en la inteligencia artificial aplicada al diagnóstico y mantenimiento automotriz, ampliando las capacidades y aplicaciones del sistema desarrollado.

Referencias bibliográficas

- Anchaluiza Parra, L. M., & Sánchez Velasco, P. M. (2024). Herramientas de simulación 3d en evaluación de riesgo ergonómico (scoping review): 3d simulation tools in ergonomic risk evaluation (scoping review). *Revista Científica Multidisciplinar Gnerando*, 5(1), 17-27. <https://revista.gnerando.org/revista/index.php/RCMG/article/view/181>.

- Arévalo, P., & Ochoa Correa, D. (2024). Toward Enhanced Efficiency: Soft Sensing and Intelligent Modeling in Industrial Electrical Systems. *Processes*, 12(7), 1365. <https://www.mdpi.com/2227-9717/12/7/1365>.
- Becerra Sánchez, I. Y., Herrera Arroyave, J. E., Morris Molina, L. H., & Toro Lazo, A. (2024). Tecnologías de la cuarta revolución industrial utilizadas en la manufactura para mejorar los indicadores de productividad: Una revisión. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 18(35), 46-58. <https://revistas.ucp.edu.co/index.php/entrecienciaeingenieria/article/view/3149>.
- Fakher, S., Khlaifat, A., & Nameer, H. (2022). Improving electric submersible pumps efficiency and mean time between failures using permanent magnet motor. *Upstream Oil and Gas Technology*, 9(September), 2-6. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2666260422000123>.
- İnci, M., Çelik, Ö., Lashab, A., Bayındır, K. Ç., Vasquez, J. C., & Guerrero, J. M. (2024). Power System Integration of Electric Vehicles: A Review on Impacts and Contributions to the Smart Grid. *Applied Sciences*, 14(6), 2246. <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/6/2246>.
- Padilla Ortiz, M. F., & Rengifo Dávila, C. E. (2023). Virtual reconstruction in traffic: a review of techniques. *Revista Tecnológica Ciencia y Educación Edwards Deming*, 7(2), 43-48. <https://www.revista-edwardsdeming.com/index.php/es/article/view/117>.
- Paredes, J. J., Yepes, S. F., Salazar Cabrera, R., Pachón de la Cruz, Á., & Madrid Molina, J. M. (2022). Intelligent collision risk detection in medium-sized cities of developing countries, using naturalistic driving: A review. *Journal of traffic and transportation engineering / Journal of Traffic and Transportation. Engineering*, 9(6), 912-929. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095756422000848>.
- Recalde, A., Cajo, R., Velasquez, W., & Álvarez Alvarado, M. S. (2024). Machine Learning and Optimization in Energy Management Systems for Plug-In Hybrid Electric Vehicles: A Comprehensive Review. *Energies*, 17(13), 3059. <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/13/3059>.
- Ryu, S., Park, B. B., & El-Tawab, S. (2020). WiFi Sensing System for Monitoring Public Transportation Ridership: A Case Study. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 24(10), 3092-3104. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12205-020-0316-7>.
- Webert, H., Döb, T., Kaupp, L., & Simons, S. (2022). Fault Handling in Industry 4.0: Definition, Process and Applications. *Sensors*, 22(6), 2205. <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/6/2205>.
- Yang, G., Ridgeway, C., Miller, A., & Sarkar, A. (2024). Comprehensive Assessment of Artificial Intelligence Tools for Driver Monitoring and Analyzing Safety Critical Events in Vehicles. *Sensors*, 24(8), 2478. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC11055067/>.
- Zambrano, A., Zambrano, M., Ortiz, E., Calderón, X., & Botto Tobar, M. (2020). An Intelligent Transportation System: the Quito City Case Study. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 10(2), 507. <https://pdfs.semanticscholar.org/0d6f/7227be792dc0aef8ecafcaa8dff238b8674c.pdf>.
- Zhang, H., Ju, S., Jin, X., Yuan, Y., Wu, Y., Nadda, A. K., Pugazhendhi, A., Cai, L., & Xia, C. (2022). A review of sensor applications towards precise control of pyrolysis of solid waste and biomasses. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 169(November), 2-6. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032122007961>.
- Zhong, H., Chen, K., Liu, C., Zhu, M., & Ke, R. (2024). Models for predicting vehicle emissions: A comprehensive review. *Science of the total environment*, 923(May), 171324. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969724014633>.