

Artículo:

## Análisis de fallas en unidades de bombeo mecánico: causas recurrentes y recomendaciones para optimizar la operatividad

## Failure analysis in mechanical pumping units: recurring causes and recommendations to optimize operability

Betsabé Nataly Escudero-Díaz<sup>1\*</sup>, Neify Patricia Robles-Hernández<sup>1</sup>, Diana Franco-Clemente<sup>1</sup>, Kevin Omar López-Pérez<sup>1</sup>

Revista Interdisciplinaria de  
Ingeniería Sustentable y Desarrollo  
Social

Recibido: 04 de septiembre de 2025  
Aceptado: 03 de diciembre de 2025  
Publicado: 18 de diciembre de 2025

Publicación continua editada por el  
Tecnológico Nacional de México /  
Instituto Tecnológico Superior de  
Tantoyuca

Desv. Lindero Tametate, S/N  
Col. La Morita  
C.P. 92100  
Tantoyuca, Veracruz, México.  
Teléfono: 789 8931680, Ext.196.

Correo electrónico:  
[revistadigital@itsta.edu.mx](mailto:revistadigital@itsta.edu.mx)

Sitio WEB  
<https://itsta.edu.mx/revistadigital>

ISSN 2448-8003  
Reserva de derechos al uso exclusivo  
No. 04-2016-092313253300-203

Editor responsable:  
**Dr. Horacio Bautista Santos**

**Copyright:** Este artículo es de acceso  
abierto distribuido bajo los términos y  
condiciones de la licencia Creative  
Commons  
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

<sup>1</sup> Tecnológico Nacional de México – Instituto Tecnológico Superior de Tantoyuca, Veracruz, México.

\* Autor correspondiente: [betsabe.escudero@itsta.edu.mx](mailto:betsabe.escudero@itsta.edu.mx)

**Resumen:** Se analizó la detección y medidas de mitigación de fallas en las Unidades de Bombeo Mecánico (UBM) empleadas en la extracción de crudo en la zona petrolera de Poza Rica, Veracruz. El principal objetivo es identificar las causas recurrentes en los equipos que quedaron fuera de operación y proponer estrategias técnicas que optimicen su desempeño y reduzcan los costos operativos. La metodología consistió en un diagnóstico de campo mediante inspecciones técnicas, registros operativos y análisis comparativo de materiales utilizados en componentes críticos como bandas, hules de estopero y muñones. Los resultados evidenciaron que la mayor parte de las fallas se relacionan con el desgaste prematuro de materiales y una deficiente gestión del mantenimiento preventivo. Con base en estos hallazgos, se propuso la sustitución de materiales por opciones de mayor durabilidad, la mejora de procesos de mantenimiento y en la selección de proveedores. La implementación de estas acciones permitió reducir significativamente los tiempos de paro y aumentar la eficiencia operativa de las UBM. Este artículo contribuye al fortalecimiento de la confiabilidad de los sistemas de bombeo mecánico y al desarrollo de prácticas sostenibles en la industria petrolera mexicana, ofreciendo un modelo aplicable a otras regiones productoras del país.

**Palabras clave:** Bombeo mecánico, fallas operativas, mantenimiento preventivo, eficiencia energética, industria petrolera.

**Abstract**

This article analyzes the detection and mitigation measures for failures in Mechanical Pumping Units (MPUs) used in crude oil extraction in the Poza Rica, Veracruz oil region. The main objective is to identify the recurring causes of equipment failures and propose technical strategies to optimize performance and reduce operating costs. The methodology consisted of a field diagnosis through technical inspections, operational records, and comparative analysis of materials used in critical components such as belts, stuffing boxes, and trunnions. The results showed that most failures are related to premature material wear and poor preventive maintenance management. Based on these findings, the article proposes replacing materials with more durable options, improving maintenance processes, and optimizing supplier selection. Implementing these actions significantly reduced downtime and increased the operational efficiency of the MPUs. This article contributes to strengthening the reliability of mechanical pumping systems and to the development of sustainable practices in the Mexican oil industry, offering a model applicable to other producing regions of the country.

**Keywords:** mechanical pumping, operational failures, preventive maintenance, energy efficiency, oil industry.

**Introducción**

En la actualidad para la industria petrolera, resulta indispensable la implementación de Sistemas Artificiales de Producción (SAP) cuando la energía natural del yacimiento comienza en decline y ya no resulta suficiente para desplazar el hidrocarburo hacia la superficie. Dichos sistemas proporcionan un adicional a la energía que es necesaria para mantener o incrementar la producción de petróleo.

El bombeo mecánico es el sistema artificial de producción más utilizado en el sector, ya que aproximadamente el 80 % de los pozos operativos emplean este método. Por ello, es fundamental realizar un seguimiento operativo continuo que permita identificar las fallas más recurrentes en las unidades de bombeo mecánico (UBM), cuyas interrupciones generan impactos significativos en la eficiencia productiva, particularmente en la región de Poza Rica.

La producción, como actividad fundamental dentro de la industria petrolera, comprende el conjunto de operaciones destinadas a extraer los hidrocarburos naturales (petróleo y gas) desde el yacimiento hasta la superficie, aprovechando inicialmente la energía natural del reservorio, proceso conocido como recuperación primaria. Sin embargo, cuando ésta energía comienza a disminuir, se recurre a la recuperación secundaria, la cual involucra la aplicación de SAP como alternativa para “estimulación del pozo” y continuar con la extracción.

Entre estos SAP, las Unidades de Bombeo Mecánico (UBM) son las más utilizadas para mantener o incrementar la producción de hidrocarburos debido a su alta eficiencia, amplia adaptabilidad a las condiciones del pozo y bajos costos de mantenimiento. En este contexto, se propone analizar las fallas superficiales más recurrentes que presentan estas unidades, con el propósito de identificar cuáles son las más frecuentes y sus causas principales con la intención de minimizarlas.

Fakher et al. (2021), menciona que la gran mayoría de yacimientos a lo largo del proceso de extracción comienzan una caída de presión fluyente, lo que obliga el uso SAP para continuar la fluencia hacia la superficie; más del 70% de los pozos petrolíferos en producción actualmente utilizan “estimulaciones” constituyendo la UBM uno de los mayormente empleados por las ventajas de bajo costo-operatividad y su fácil empleo. El diagnóstico de fallas y la optimización de los sistemas de bombeo mecánico constituyen tareas fundamentales dentro de la industria petrolera y su adecuado funcionamiento resulta esencial para asegurar una producción eficiente, continua y económicamente viable.

Dentro del mismo activo del sector Poza Rica, se han implementado diversas estrategias complementarias para enfrentar la declinación de la producción. Por un lado, Del Ángel et al. (2023), describe la reactivación de pozos en la localización Coralillos mediante sistemas de motocompresión, mientras que, Robles et al. (2024), propone la reducción de contrapresión mediante bombeo electrocentrífugo horizontal (BECH), coincidiendo ambos autores que la eficiencia de cualquier SAP depende críticamente de la estabilidad y confiabilidad del equipo superficial.

El motor eléctrico representa uno de los componentes principales del sistema de bombeo mecánico, ya que es el encargado de suministrar la energía requerida para accionar el

mecanismo de bombeo. Sin embargo, este equipo puede presentar diversas fallas que afectan el desempeño del sistema, clasificadas en cuatro tipos: Fallos hidráulicos, mecánicos, degradaciones térmicas y otras (Shaker et al., 2020). El quehacer de este trabajo se centra en los fallos mecánicos provocados por componentes críticos como bandas, hules de estopero y muñones.

La aplicación de tecnologías no convencionales en México ha mejorado la eficiencia y productividad de la extracción de hidrocarburos, lo que se traduce en aumento de la producción e ingresos nacionales. Una correcta gestión de fallas, permite anticipar un incidente operativo y evitar costos asociados (Shaker et al., 2020). La evolución en el ámbito tecnológico, ha impulsado la necesidad del procesamiento de datos en tiempo real tratándose de la industria petrolera para evitar interrupciones en la producción y poder predecir comportamientos y tomar decisiones críticas que mitiguen riesgos y salvaguarden la seguridad del personal (Diván y Soto, 2023). La implementación de sistemas inteligentes de solución como “Edge computing” (Díaz et al., 2024), depende de un conocimiento profundo basado en los modos de fallas predominantes en cada campo, que sirvan de base para el entrenamiento de modelos de detección automática y el avance hacia un mantenimiento predictivo que reduzca drásticamente los tiempos de inactividad. Por otro lado, Al-Majed et al. (2023), implementa modelos de aprendizaje automático para predecir fallos en sistemas de bombeo mecánico mediante el análisis de datos históricos y sensores en tiempo real. En contraste este trabajo se enfoca en el diagnóstico descriptivo de las fallas superficiales más recurrentes, demostrando que el análisis de datos de fallas puede escalarse hacia soluciones predictivas; sin embargo, dichas soluciones requieren una base sólida de datos históricos bien documentados, precisamente el tipo de información que se busca sistematizar.

Más allá del diagnóstico descriptivo, metodologías más profundas, como el Análisis de Causa Raíz (RCA) permiten identificar las razones de causa de estas fallas orientando hacia acciones correctivas (Elshafei et al., 2023). Las condiciones de operatividad de los elementos de la UBM también son un aspecto fundamental a considerar, por ejemplo, en ambientes de crudo pesado la abrasión y degradación química disminuye significativamente al usar elastómeros avanzados en sellos de varilla pulida (Fernández et al., 2022), lo que demuestra la importancia de adoptar una especificación técnica más rigurosa basada en las condiciones

físico-químicas en la que se va a trabajar. De igual manera mecanismos como el sistema de transmisión por bandas es especialmente vulnerable por esfuerzos mecánicos, desalineaciones y condiciones adversas representando hasta el 20% de las fallas (Gupta et al., 2021). En este escenario, el uso de bandas sintéticas ha demostrado mejor durabilidad por encima de las opciones estándar (Ibarra y Rodríguez, 2024).

Además de los materiales, factores operativos impactan en la confiabilidad del sistema, por ejemplo, la estabilidad de la presión del nitrógeno en unidades hidroneumáticas es determinante para mantener un contrabalanceo adecuado en la varilla, ya que su inestabilidad produce vibraciones y cargas cíclicas anómalas, que aceleran el desgaste de los componentes mecánicos, incluso cuando éstos son de buena calidad (Jones et al., 2022).

Una de las contribuciones clave de este estudio es la cuantificación del tiempo de inactividad asociado a las fallas superficiales en las UBM del sector Poza Rica, en este sentido Hassan et al. (2023), destaca que el impacto económico de las fallas en sistemas de levantamiento artificial medidas tiempos de inactividad y por tiempos promedio de reparación de cada tipo de falla que se presenta, impactando directamente en el aspecto económico.

El monitoreo inteligente mediante gemelos digitales (Khan et al., 2023) o la priorización de riesgos mediante Análisis de Modos de Falla y sus Efectos (FMEA) (Lee et al., 2021) ofrecen marcos metodológicos para elevar la gestión de activos. Ambos enfoques permiten distinguir entre fallas frecuentes y críticas: por ejemplo, el muñón, aunque menos recurrente, genera tiempos de inactividad prolongados debido a que es un elemento de importación y su logística de reposición es tardía (Nguyen et al., 2022). En entornos costeros como la región de Poza Rica, los factores ambientales ocasionan Corrosión Bajo Aislamiento (CUI) que pueden ser una causa subyacente de degradación en componentes estructurales metálicos de las UBM incluso si no son visibles durante las inspecciones rutinarias (Martínez et al., 2024).

Oliveira et al. (2023), muestra que el deterioro no diagnosticado en reductores puede generar vibraciones anómalas, desalineaciones y cargas cíclicas excesivas que aceleran el desgaste de bandas y sellos. Por lo tanto, aunque no se registró falla directa del reductor en el periodo de análisis, su estado debe considerarse como un factor potencial en la degradación prematura de los componentes identificados.

El impacto de las fallas trascienden lo técnico: afecta el consumo energético como lo mencionan en su investigación González y Pérez (2022), donde se analizan los campos maduros de Veracruz demostrando que las fallas mecánicas pueden incrementar el consumo de energía hasta en un 22%; en lo social cada hora de paro afecta ingresos, empleos y estabilidad en comunidades petroleras (Ramírez y Soto, 2021). Soluciones de bajo costo, como sensores de monitoreo propuestas por López y Gutiérrez (2023) para detectar vibraciones anómalas o fugas incipientes pueden integrarse hacia el objetivo de un mantenimiento predictivo sostenible.

### **Materiales y métodos**

El sector Poza Rica, perteneciente al Activo de Producción Poza Rica-Altamira (APPRA) de PEMEX, en el estado de Veracruz cuenta con una gran cantidad de pozos en producción secundaria mediante la implementación de UBM, en específico los de tipo hidroneumático (modelo Tieben). Estas unidades son operadas y mantenidas por las empresas contratistas Vordcab o SOMI, bajo supervisión de ingenieros de producción de PEMEX.

La población de estudio está constituida por todas las UBM operativas en dicho sector durante el periodo de agosto-noviembre 2023. El tipo de estudio aplicado es observacional, descriptivo y cuantitativo, con el objetivo de identificar, cuantificar y caracterizar las fallas más recurrentes con base en registros reales de campo y observaciones directas; un enfoque censal aplicado mediante un formato de registro estandarizado proporcionado por el área de producción que incluyó todos los eventos de fallo reportados en dicho periodo incluyeron:

1. Fecha y hora de reporte (cuando la unidad fue declarada inoperante).
2. Fecha y hora de restablecimiento (cuando la unidad volvió a operar).
3. Tipo de falla (descrita textualmente por el técnico de mantenimiento).
4. Componente afectado (identificado según la nomenclatura operativa de PEMEX).
5. Tiempo de inactividad (calculado automáticamente por fórmulas del formato: diferencia entre hora de restablecimiento y hora de reporte).
6. Compañía responsable del mantenimiento.

Además, se realizaron recorridos de campo supervisados a pozos y baterías de separación del sector, con el fin de observar in situ el funcionamiento de las UBM hidroneumáticas, verificar

visualmente los componentes dañados y realizar entrevistas al personal de mantenimiento sobre posibles causas.

Una vez recopilados los datos por doble estrategia (registro documental y observación directa), se procesaron mediante análisis estadístico descriptivo utilizando herramientas integradas de Microsoft Excel. Las variables analizadas fueron: frecuencia absoluta y relativa; tiempo promedio de inactividad; y clasificación de componentes críticos según su impacto operativo (recurrencia y duración de paro).

Los resultados se organizaron en tablas de distribución de frecuencias y se presentan mediante un gráfico circular. No se aplicaron pruebas inferenciales ni modelos predictivos, ya que el alcance del estudio se limitó al diagnóstico descriptivo y a la generación de recomendaciones operativas inmediatas.

El estudio se condujo bajo los principios de confidencialidad, integridad y responsabilidad profesional. Todos los datos utilizados son de carácter operativo interno de PEMEX y fueron manejados exclusivamente por personal autorizado. No se recopilaban datos personales ni sensibles, y la información fue empleada únicamente con fines académicos y de mejora operativa. La investigación fue desarrollada bajo la supervisión directa del asesor técnico de PEMEX y con el respaldo institucional del Instituto Tecnológico Superior de Tantoyuca, garantizando su pertinencia, transparencia y alineación con los protocolos de seguridad y operación de la empresa.

Como limitaciones del estudio se pueden mencionar las siguientes:

1. El tiempo de aplicación se basó en cuatro meses consecutivos, por lo que no captura posibles variaciones estacionales (por ejemplo, mayor corrosión en época de lluvias o cambios en la disponibilidad logística en fin de año).
2. Un enfoque restringido a solo fallas superficiales sin considerar las subsuperficiales que pueden tener también una influencia directa en el desempeño de los componentes analizados.
3. Descripciones subjetivas (proporcionadas por el personal técnico) para la descripción de las fallas, sin validación instrumental (análisis de vibraciones, termografía, sensores, etc.).

4. Alcance geográfico específico, su generalización a otros campos fuera del sector debe hacerse con cautela, considerando diferencias en tipo de crudo, condiciones ambientales, profundidad de los pozos y prácticas operativas locales.

## Resultados y discusión

Durante el periodo de desarrollo (agosto–noviembre de 2023), se registraron un total de 354 fallas en unidades de bombeo mecánico (UBM) tipo hidroneumático del sector ubicado en la ciudad de Poza Rica, Ver. De éste total de fallos, 315 casos correspondieron a fallas superficiales, lo que representa el total, fortaleciendo lo que se indica en el objetivo, que los principales problemas se presentan en el equipo superficial en éste tipo de sistema de bombeo se muestran a en la Tabla 1.

**Tabla 1. Fallas del sector operativo Poza Rica**

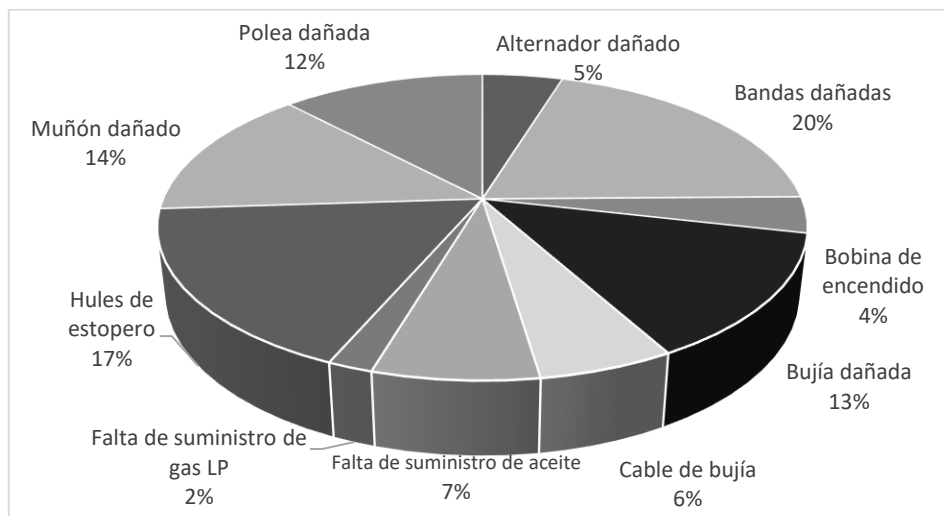
Tipo de falla	Frecuencia
Alternador dañado	15
Bandas dañadas	63
Bobina de encendido	12
Bujía dañada	42
Cable de bujía	18
Falta de suministro de aceite	22
Falta de suministro de gas LP	6
Hules de estopero	55
Muñón dañado	44
Polea dañada	38
Tanque de gas cerrado	39
<b>Total</b>	<b>354</b>

A través del análisis sistemático del formato diario de registro de fallas, se identificaron tres modos de falla recurrentes que, en conjunto, representan el 51 % de las fallas superficiales y se muestran en la Tabla 2.

**Tabla 2. Fallas superficiales más recurrentes**

Componente afectado	Cantidad	Porcentaje
Bandas dañadas	63	20 %
Hules de estopero	55	17 %
Muñón dañado	44	14%
<b>Total</b>	<b>162</b>	<b>51 %</b>

El total de fallas clasificadas en la Tabla 1 se muestra mediante la Figura 1 con el fin de facilitar la identificación visual de los modos de falla recurrente y su relevancia relativa.



**Figura 1. Porcentaje de fallas de la UBM.**

En la mayoría de los casos, se observó rotura, desgaste prematuro o pérdida de tensión de las bandas, lo que interrumpió inmediatamente la operación de la unidad. Las reparaciones, aunque relativamente rápidas, generaron una acumulación significativa de tiempo muerto debido a su alta recurrencia.

En segundo lugar, el desgaste de los hules del estopero se presentó de forma continua, especialmente en unidades con más de 18 meses de operación. Aunque esta falla no interrumpe del todo la producción, provoca fugas controladas de crudo, lo que implica riesgos ambientales menores pero persistentes y obliga a intervenciones periódicas de mantenimiento para su reemplazo.

La tercera categoría, y la de mayor impacto operativo, fue el muñón dañado. Aunque ocurrió con menor frecuencia, su reparación requirió en promedio 72 horas, debido a que la pieza debe ser importada y su entrega depende de factores logísticos externos. Este retraso generó una pérdida acumulada en barriles de producción durante el periodo de análisis.

La implementación de estudio de este trabajo se limitó a 4 meses de recopilación de información, por lo que se recomienda extender el tiempo de monitoreo a un año completo aplicando estudios de Análisis Causa Raíz y FMEA para tener una mejor cuantificación crítica de cada falla, apoyándose con la implementación de modelos y/o tecnologías de monitoreo en tiempo real (como sensores) que ayuden a predecir futuros fallos como

herramienta para reducir costos e inoperatividad de equipos, lo cual se traduce en costos de operación y pérdidas de producción.

Asimismo, las recomendaciones derivadas como el cambio de bandas 3X, evaluar nuevos proveedores de hules y aumentar el inventario de muñones no solo cumplen con los objetivos planteados, sino que también se alinean con buenas prácticas internacionales en gestión de activos y mantenimiento basado en confiabilidad como una estrategia de optimización de activos.

### **Conclusiones**

Los resultados demuestran que las fallas recurrentes en las UBM de Poza Rica no son eventos aleatorios, sino el resultado predecible de la interacción entre condiciones ambientales, calidad de materiales y debilidades logísticas. Al responder a las interrogantes planteadas con evidencia empírica y al vincular los hallazgos con la práctica operativa y la literatura técnica, este estudio transforma un diagnóstico descriptivo en una hoja de ruta para la mejora de la confiabilidad, eficiencia y sostenibilidad operativa del bombeo mecánico en campos maduros mexicanos.

Se encontró que los componentes sujetos a desgaste mecánico directo y exposición ambiental son los más propensos a fallar. Las bandas, al estar en contacto constante con poleas, humedad, polvo y fluidos de pozo, experimentan una degradación acelerada, especialmente si son del modelo 2X, comúnmente utilizado en el sector.

Los hules del estopero, por su parte, están expuestos al roce continuo con la varilla pulida y al contacto con crudo pesado y arena, lo que acelera su fatiga. Su falla recurrente refleja una posible inadecuación del material o diseño para las condiciones específicas de Poza Rica.

El muñón, aunque no está directamente expuesto a fluidos, soporta cargas cíclicas extremas durante el ciclo de bombeo. Su falla —aunque menos frecuente— tiene un impacto desproporcionado, no por el componente en sí, sino por la dependencia de proveedores internacionales y la falta de inventario estratégico local.

Estos hallazgos revelan que la confiabilidad de las UBM en Poza Rica no depende únicamente del diseño del sistema, sino de tres factores críticos: La calidad de materiales en componentes de desgaste rápido, las condiciones ambientales agresivas (humedad, crudo, polvo) y las debilidades en la cadena de suministro para piezas críticas. Esto implica que las

soluciones deben ser multidimensionales: técnicas (mejores materiales), operativas (mantenimiento preventivo) y logísticas (gestión de inventario).

### Referencias bibliográficas

- Al-Majed, A., Al-Saedi, H., Al-Driweesh, S. & Al-Mutairi, N. (2023). Machine Learning for Predictive Maintenance in Rod Pumping Systems: A Field Case Study in Saudi Arabia. *SPE-214567-MS. OnePetro*. <https://doi.org/10.2118/214567-MS>
- Diaz, J., Liu, Y., Patel, K. & Zhang, R (2024). Real-time Monitoring and Diagnostics of Beam Pump Units Using Edge Computing. *Sensors*, 24(3), 789. <https://doi.org/10.3390/s24030789>
- Del-Ángel-Avilés, R., Robles-Hernández, N.-P., & Escudero-Díaz, B.-N. (2023). Activación de pozos de hidrocarburos asistidos con sistemas de compresión en localización Coralillos. *Revista Interdisciplinaria de Ingeniería Sustentable y Desarrollo Social (RIISDS)*, 9(1), 281–292. <https://doi.org/10.63728/riisds.v9i1.116>
- Diván, M.J., & Soto, D. (2023). Real-time Reliability Monitoring on Edge Computing: A Systematic Mapping. *Informatics and Automation Vol.22*, 1243-1287. <https://doi.org/10.15622/ia.22.6.1>
- Elshafei, M., Al-Nashar, A., & Al-Rashidi, Y. (2023). Root Cause Analysis of Recurring Failures in Surface Equipment of Hydraulic Pumping Units. *Process Safety and Environmental Protection*. 171, 567-578. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.01.042>
- Fakher, S., Khalaifat, A., Hossain, M.E., & Nameer, H. (2021). A comprehensive review of sucker rod pumps components, diagnostics, mathematical models, and common failures and mitigations. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 11(10), 3815–3839. <https://doi.org/10.1007/s13202-021-01258-9>
- Fernández, R., López, M., Torres, J., & Gómez, P. (2022). Optimization of polished rod packing seal life in heavy oil applications. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 44(15), 3456–3470. <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1851823>
- González-Morales, R., & Pérez-Hernández, J. (2022). Análisis de eficiencia energética en sistemas de bombeo utilizados en campos petroleros maduros de Veracruz. *Revista Interdisciplinaria de Ingeniería Sustentable y Desarrollo Social*, 6(2), 45–58. <https://doi.org/10.36466/riids.v6i2.2448-8003.2022.45>

- Gupta, S., Singh, A., Kumar, R., & Sharma, V. (2021). Vibration signature analysis for early detection of belt drive failures in pumpjacks. . *Mechanical Systems and Signal Processing*, 150, 107234. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107234>
- Hassan, M., Al-Farsi, S., Al-Balushi, R., & Al-Hinai, A. (2023). Economic Impact Assessment of Downtime Due to Artificial Lift Failures in Mature Fields. *International Journal of Oil, Gas and Coal Technology*, 32(1), 45-67. <https://doi.org/10.1504/IJOGCT.2023.128541>
- Ibarra, M., & Rodríguez, F. (2024). Comparative Study of Synthetic vs. Standard V-Belts in Harsh Operating Conditions of Mexican Oilfields. *Wear*, 518-519, 204689. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204689>
- Jones, D., Smith, T., Brown, K., & Wilson, M. (2022). The Role of Nitrogen Pressure Stability in the Performance of Hydro-Pneumatic Pumping Units. *SPE Production & Operations*, 37(2), 345-358. <https://doi.org/10.2118/205321-PA>
- Khan, Z., Ahmed, F., Rahman, M., & Hussain, S. (2023). Digital Twin Development for a Beam Pumping System to Enhance Operational Efficiency. *Computers in Industry*, 147, 103845. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2023.103845>
- Lee, W., Park, J., Kim, S., & Choi, H. (2021). Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) Applied to Surface Components of Electric Submersible Pumps and Rod Pumps. *Reliability Engineering & System Safety*, 215, 107890. <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.107890>
- López-Martínez, A., & Gutiérrez-Rodríguez, M. (2023). Propuesta de mantenimiento predictivo basado en sensores de bajo costo para equipos de producción en pozos maduros. . *Revista Interdisciplinaria de Ingeniería Sustentable y Desarrollo Social*, 7(1), , 67–82. <https://doi.org/10.36466/riids.v7i1.2448-8003.2023.67>
- Martínez, C., Ávila, D., Rojas, L., & Herrera, R. (2024). Corrosion Under Insulation (CUI) as a Critical Factor in the Degradation of Pumpjack Structural Components. *Engineering Failure Analysis*, 156, 107012. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107012>
- Nguyen, T., Tran, H., Le, Q., & Pham, V. (2022). Data-Driven Approach for Spare Parts Inventory Optimization in Artificial Lift Operations. *International Journal of Production Economics*, 243, 108345. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108345>
- Oliveira, P., Costa, R., Ferreira, A., & Santos, M. (2023). Condition-Based Maintenance Strategies for Reducers in Beam Pumping Units: A Brazilian Case Study. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 45(1), Article 23. <https://doi.org/10.1007/s40430-022-04032-1>

- Ramírez-Cruz, L., & Soto-Medina, E. (2021). Gestión de mantenimiento en infraestructura energética rural: un enfoque desde el desarrollo social en la Huasteca Veracruzana. . *Revista Interdisciplinaria de Ingeniería Sustentable y Desarrollo Social*, 5(1), 23-37. <https://doi.org/10.36466/riids.v5i1.2448-8003.2021.23>
- Robles-Hernández, N.-P., Del-Ángel-Avilés, R., & Escudero-Díaz, B.-N. (2024). Optimización de producción en pozos ABCD mediante reducción de contrapresión con BECH: un enfoque en la plataforma existente. *Revista Interdisciplinaria de Ingeniería Sustentable y Desarrollo Social (RIISDS)*, 10(1), 434–448. <https://doi.org/10.63728/riids.v10i1.57>
- Shaker, M., Olesen, J.F., & Rasmussen, H. (2020). Predictive Maintenance for Pump Systems and Thermal Power Plants: State-of-the-Art Review, Trends and Challenges. *Sensors* 20(8), 2425. <https://doi.org/10.3390/s20082425>