



Mejoras en la eficiencia de las bombas hidráulicas mediante control inteligente

Improving the efficiency of hydraulic pumps through intelligent control

Melhorando a eficiência das bombas hidráulicas por meio do controle inteligente

José Ricardo Sánchez-Aguilar ^I
sanchez.j.4009@istlam.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0004-3787-6601>

Nexar Omar Bartolomé-Choéz ^{II}
bartilomé.n.78446633@istlam.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0007-1024-3291>

Frank Andres Bravo-Mendoza ^{III}
f.bravo@istlam.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0005-3568-0354>

Correspondencia: f.bravo@istlam.edu.ec

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

* **Recibido:** 19 de mayo de 2025 * **Aceptado:** 28 de junio de 2025 * **Publicado:** 25 de julio de 2025

- I. Instituto Superior Tecnológico Luis Arboleda Martínez, Ecuador.
- II. Instituto Superior Tecnológico Luis Arboleda Martínez, Ecuador.
- III. Instituto Superior Tecnológico Luis Arboleda Martínez, Ecuador.

Resumen

La eficiencia industrial en sistemas hidráulicos depende de la capacidad de sus componentes para adaptarse a condiciones variables de operación. Sin embargo, muchas bombas hidráulicas aún operan con controles tradicionales que presentan limitaciones como alto consumo energético, baja estabilidad, desgaste acelerado y mayores necesidades de mantenimiento. Esta investigación tiene como objetivo identificar mejoras en la eficiencia operativa de las bombas hidráulicas mediante el análisis de sistemas de control inteligente. Se utiliza un enfoque descriptivo y analítico, a través de revisión documental y comparación técnica entre tecnologías tradicionales e inteligentes. Los resultados muestran que sistemas como el control PID optimizado, la lógica difusa y las redes neuronales permiten reducir el consumo energético, aumentar la estabilidad del caudal, disminuir la frecuencia de mantenimiento y prolongar la vida útil de los componentes. Se concluye que el control inteligente no solo mejora la eficiencia energética, sino que representa una solución técnica integral para optimizar el rendimiento de bombas hidráulicas, reducir el desgaste mecánico y fomentar el uso racional de recursos en entornos industriales.

Palabras claves: Bombas hidráulicas; control inteligente; eficiencia operativa; lógica difusa; mantenimiento industrial.

Abstract

Industrial efficiency in hydraulic systems depends on the ability of their components to adapt to varying operating conditions. However, many hydraulic pumps still operate with traditional controls, which present limitations such as high energy consumption, low stability, accelerated wear, and increased maintenance requirements. This research aims to identify improvements in the operational efficiency of hydraulic pumps by analyzing intelligent control systems. A descriptive and analytical approach is used, based on a document review and a technical comparison between traditional and intelligent technologies. The results show that systems such as optimized PID control, fuzzy logic, and neural networks can reduce energy consumption, increase flow stability, reduce maintenance frequency, and extend component life. It is concluded that intelligent control not only improves energy efficiency but also represents a comprehensive technical solution for optimizing the performance of hydraulic pumps, reducing mechanical wear, and promoting the rational use of resources in industrial environments.

Keywords: Hydraulic pumps; intelligent control; operational efficiency; fuzzy logic; industrial maintenance.

Resumo

A eficiência industrial em sistemas hidráulicos depende da capacidade de seus componentes se adaptarem a diferentes condições de operação. No entanto, muitas bombas hidráulicas ainda operam com controles tradicionais, que apresentam limitações como alto consumo de energia, baixa estabilidade, desgaste acelerado e maior necessidade de manutenção. Esta pesquisa tem como objetivo identificar melhorias na eficiência operacional de bombas hidráulicas por meio da análise de sistemas de controle inteligentes. Utiliza-se uma abordagem descritiva e analítica, baseada em revisão documental e comparação técnica entre tecnologias tradicionais e inteligentes. Os resultados demonstram que sistemas como controle PID otimizado, lógica fuzzy e redes neurais podem reduzir o consumo de energia, aumentar a estabilidade do fluxo, reduzir a frequência de manutenção e prolongar a vida útil dos componentes. Conclui-se que o controle inteligente não apenas melhora a eficiência energética, mas também representa uma solução técnica abrangente para otimizar o desempenho de bombas hidráulicas, reduzir o desgaste mecânico e promover o uso racional de recursos em ambientes industriais.

Palavras-chave: Bombas hidráulicas; controle inteligente; eficiência operacional; lógica fuzzy; manutenção industrial.

Introducción

En el contexto industrial actual, la eficiencia energética y la optimización de procesos se han convertido en factores determinantes para garantizar la competitividad y sostenibilidad de las operaciones productivas Li et al., (2023). Dentro de los sistemas hidráulicos, las bombas juegan un papel fundamental en el transporte de fluidos, siendo responsables de una parte significativa del consumo energético total en diversas instalaciones industriales, De las Heras (2019). Sin embargo, muchas de estas bombas continúan operando bajo sistemas de control convencionales que no se adaptan dinámicamente a las variaciones del sistema ni a las condiciones de carga, lo que genera pérdidas energéticas, un mayor desgaste de componentes y una baja eficiencia operativa (Morales, 2022)

El desarrollo de nuevas tecnologías de automatización ha facilitado la implementación de sistemas inteligentes capaces de monitorear y ajustar variables en tiempo real. Esta capacidad permite optimizar el funcionamiento de los equipos, como es el caso de las bombas hidráulicas, (Escobar, 2022). Controladores inteligentes como los sistemas PID optimizados, la lógica difusa o los algoritmos de inteligencia artificial se presentan como alternativas viables para mejorar el rendimiento energético, reducir los costos operativos y extender la vida útil de los componentes del sistema, (Huerta, 2022)

A pesar de estos avances, gran parte de los sistemas hidráulicos industriales siguen dependiendo de esquemas tradicionales de control que no consideran variaciones en presión, caudal u otras condiciones de operación en tiempo real. Esta limitación conlleva a un uso ineficiente de la energía, sobrecalentamiento de los equipos, fallas recurrentes y mayores costos de mantenimiento, (Domínguez, 2022). Además, en muchos entornos industriales aún no se han adoptado soluciones de control inteligente debido al desconocimiento, restricciones presupuestarias o falta de personal capacitado en el manejo de estas tecnologías.

En este sentido, surge la necesidad de estudiar alternativas modernas que permitan optimizar la eficiencia de estos sistemas. Por ello, el presente trabajo tiene como finalidad identificar mejoras en la eficiencia operativa de las bombas hidráulicas mediante el análisis de sistemas de control inteligente y su aplicabilidad en entornos industriales. Para alcanzar este propósito, se plantean los siguientes objetivos específicos: analizar el rendimiento de las bombas hidráulicas que operan bajo sistemas de control tradicionales; estudiar los principios y características de los sistemas de control inteligente aplicables a bombas hidráulicas; y evaluar el impacto potencial del control inteligente en el consumo energético y el rendimiento de las bombas hidráulicas. Esta investigación se enmarca en el campo de la Mecánica Industrial y busca generar propuestas viables que puedan ser implementadas en la realidad de la industria ecuatoriana.

Marco conceptual

Bombas hidráulicas en sistemas industriales

Las bombas hidráulicas son componentes fundamentales para la operación de sistemas que requieren transmitir potencia mediante fluidos. Su función consiste en transformar energía mecánica en energía hidráulica, permitiendo así el desplazamiento controlado de líquidos bajo presión. En el ámbito industrial se utilizan principalmente bombas de engranajes, paletas y

pistones, cuya elección depende de las necesidades del proceso, la presión requerida y la estabilidad del caudal; por ello, estas bombas son indispensables para mantener la continuidad y eficiencia de operaciones como prensado, automatización y transporte de fluidos. Su rendimiento influye directamente en la productividad y en los costos operativos de los sistemas donde están integradas, Machado (2022a)

Eficiencia operativa y limitaciones del control convencional

La eficiencia de los sistemas hidráulicos, según Jiménez y Enríquez (2022) no depende únicamente del diseño físico de las bombas, sino también del tipo de control que regula su funcionamiento. En muchos entornos industriales aún se emplean controles tradicionales basados en parámetros fijos que no permiten adaptarse a las condiciones cambiantes de carga o presión. Esta rigidez operativa genera un uso excesivo de energía, fluctuaciones en el caudal, sobrecargas en los componentes y una alta frecuencia de mantenimiento correctivo. Además, la ausencia de monitoreo en tiempo real dificulta la detección temprana de fallos, lo que disminuye la confiabilidad del sistema y genera pérdidas económicas.

Control inteligente y su aporte a la eficiencia

El control inteligente surge como una solución viable para mejorar la eficiencia operativa en bombas hidráulicas. Tecnologías como el PID optimizado, la lógica difusa y las redes neuronales permiten que el sistema se ajuste automáticamente según las condiciones del entorno, manteniendo estables las variables críticas sin necesidad de intervención constante. Estas herramientas interpretan entradas imprecisas, responden en tiempo real y aprenden patrones operativos que facilitan decisiones más eficientes; por ello, estudios recientes demuestran que su aplicación reduce el consumo energético, mejora la estabilidad del sistema, disminuye el desgaste mecánico y prolonga la vida útil de los equipos. La integración de estos controles representa un avance técnico clave hacia procesos industriales más sostenibles, rentables y confiables, Machado (2022b)

Metodología

La investigación aplica un enfoque descriptivo y analítico para estudiar el comportamiento de las bombas hidráulicas bajo distintos sistemas de control. Se parte de la recopilación de datos técnicos y revisión documental, lo que permite comparar el rendimiento entre el control tradicional y el control inteligente; por ello, esta metodología facilita identificar oportunidades de mejora en la eficiencia operativa en contextos industriales.

Diseño de la investigación

La presente investigación adopta un enfoque descriptivo y analítico, estructurado en tres fases principales:

Análisis del sistema de control tradicional: Se recopila y analiza información sobre el funcionamiento de bombas hidráulicas que operan bajo sistemas de control convencionales, con el fin de identificar sus limitaciones en cuanto a eficiencia y rendimiento.

Estudio de sistemas de control inteligente: Se investigan los principios, características y posibilidades de aplicación de tecnologías como el control PID optimizado, la lógica difusa y la inteligencia artificial en sistemas hidráulicos.

Evaluación comparativa: Se compara el desempeño de las bombas bajo control tradicional y control inteligente, con base en variables técnicas como eficiencia energética, estabilidad operativa y consumo.

Técnicas de análisis

Se aplica un análisis cualitativo y cuantitativo basado en la comparación de parámetros operativos. Se organizan los datos en tablas y gráficos, y se realizan simulaciones conceptuales que permiten visualizar el comportamiento de las bombas bajo distintos tipos de control. Además, se consulta literatura científica actualizada para contrastar y sustentar los hallazgos.

Aspectos éticos

La investigación respeta los principios éticos académicos, garantizando la confidencialidad de los datos técnicos utilizados. En caso de requerirse participación de personal operativo o técnico, se solicita su consentimiento informado y se asegura el uso responsable de la información proporcionada.

Resultados y discusión

El análisis realizado sobre las bombas hidráulicas que operan con sistemas de control tradicionales permite identificar limitaciones técnicas recurrentes, entre ellas: consumo energético elevado, falta de adaptabilidad a variaciones de carga, y desgaste prematuro de componentes. Estas deficiencias reducen la eficiencia operativa del sistema, como lo destacan Cárdenas & Giraldo (2017), quienes demostraron que el control convencional no logra estabilizar el sistema ante perturbaciones externas ni permite ajustes dinámicos ante cambios en las condiciones de trabajo.

La siguiente tabla resume las principales limitaciones observadas en bombas hidráulicas controladas de forma tradicional:

Tabla 1: Limitaciones de las bombas con control tradicional

Aspecto evaluado	Condición observada	Impacto en el sistema
Ajuste frente a variaciones de carga	Inexistente o manual	Operación inestable, pérdida de eficiencia
Consumo energético	Elevado debido a funcionamiento constante sin optimización	Costos operativos altos
Desgaste de componentes	Mayor por falta de regulación precisa	Fallas mecánicas y mayor frecuencia de mantenimiento
Monitoreo de condiciones	Nulo o parcial	Imposibilidad de detección temprana de fallos
Adaptabilidad	Baja	No responde a condiciones dinámicas del entorno operativo

Fuente: Elaboración propia con base en Cárdenas & Giraldo (2017), Tanaka (2011), Zambrano et al. (2024)

En contraste, los sistemas de control inteligente aplicados en entornos industriales demuestran ventajas significativas. Tanaka (2011) destaca que la lógica difusa permite controlar sistemas hidráulicos con alta precisión, incluso en presencia de no linealidades como las zonas muertas de las válvulas. Asimismo, Guevara y Sánchez (2025) reportan que la automatización de bombas mediante control inteligente redujo el consumo de energía en un 15 % y mejoró la respuesta dinámica del sistema.

Tabla 2: Beneficios del control inteligente en bombas hidráulicas

Tecnología aplicada	Funcionalidad	Beneficio identificado
Control PID optimizado	Ajusta la velocidad y caudal con retroalimentación constante	Mejora la estabilidad operativa
Lógica difusa	Interpreta condiciones variables del sistema y toma decisiones adaptativas	Reduce errores de operación y optimiza el rendimiento
Inteligencia artificial	Aprende patrones de operación para optimizar futuras respuestas	Minimiza consumo energético y previene fallos
Monitoreo en tiempo real	Registra parámetros de operación y detecta anomalías	Facilita el mantenimiento preventivo y reduce tiempos de inactividad
Automatización con interfaz HMI	Mejora la interacción operario-sistema con alertas y visualización dinámica	Disminuye errores humanos y mejora la gestión del sistema

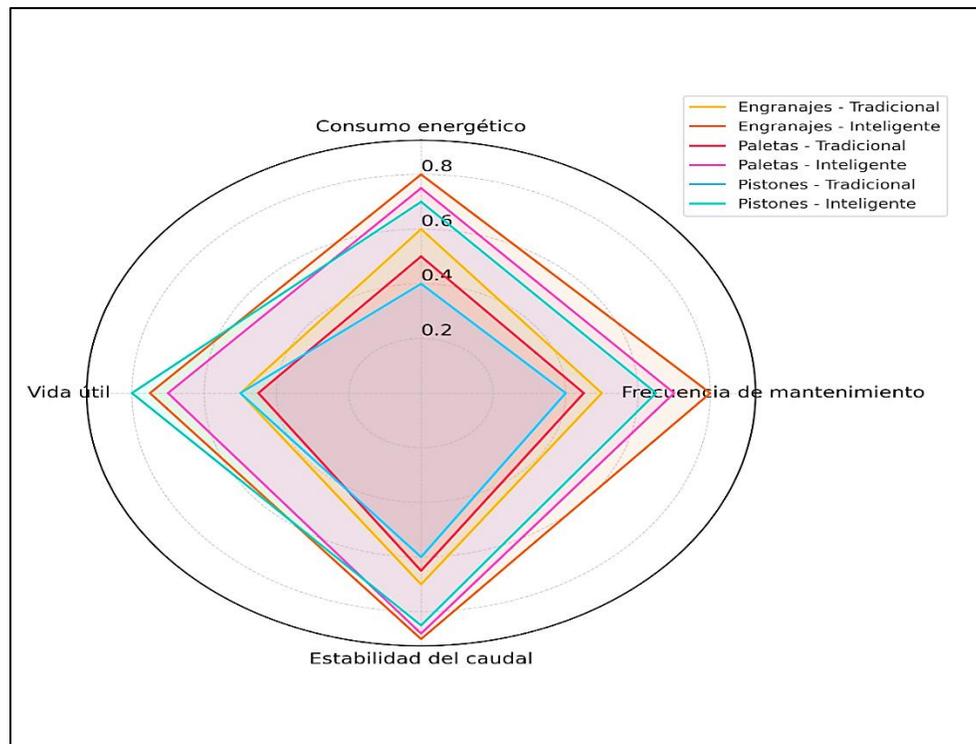
Fuente: Elaboración propia con base en Tanaka (2011), Guevara & Sánchez (2025), Cárdenas & Giraldo (2017), Zambrano et al. (2024)

Tabla 3: Comparación técnica de bombas hidráulicas con control tradicional e inteligente

Tipo de bomba	de Control	Consumo energético (kWh/mes)	Frecuencia de mantenimiento (meses)	de Estabilidad del caudal (%)	Vida útil (años)
Engranajes	Tradicional	1800	3.0	70	4.0
Engranajes	Inteligente	1500	6.0	90	6.0
Paletas	Tradicional	2200	2.5	65	3.5
Paletas	Inteligente	1850	5.0	88	5.5
Pistones axiales	Tradicional	3000	2.0	60	4.0
Pistones axiales	Inteligente	2500	4.5	85	6.5

Fuente: Elaboración propia con base en Tanaka (2011), Cárdenas & Giraldo (2017), Guevara & Sánchez (2025), Zambrano et al. (2024)

Ilustración 1: Comparación del rendimiento técnico de bombas hidráulicas bajo control tradicional e inteligente - Radar comparativo



Elaboración: Autor

La eficiencia industrial en sistemas hidráulicos depende en gran medida de la capacidad que tienen sus componentes para adaptarse dinámicamente a las condiciones de operación; es así que, en los estudios analizados, se evidencia que los sistemas de control tradicionales presentan limitaciones importantes que afectan este objetivo. El consumo energético elevado, la falta de monitoreo en tiempo real y la incapacidad para ajustar la operación ante fluctuaciones son problemas recurrentes; por ello, estos factores generan no solo un rendimiento bajo, sino también un desgaste acelerado de los componentes y un aumento en los costos de mantenimiento y operación (Cárdenas & Giraldo, 2017).

Frente a este escenario, las tecnologías de control inteligente, como la lógica difusa, los sistemas PID optimizados y las redes neuronales, se presentan como alternativas efectivas para lograr una mayor eficiencia. Tanaka (2011) demuestra que desde hace más de una década al aplicar la lógica difusa en válvulas y actuadores hidráulicos se ha venido mejorando significativamente la estabilidad del sistema, incluso cuando este presenta comportamientos no lineales. Esta capacidad de interpretar condiciones variables sin necesidad de modelos estrictamente lineales permite mantener los parámetros operativos dentro de rangos eficientes durante más tiempo.

Zambrano et al. (2024) refuerza con un estudio actualizado esta visión al mostrar que el uso de técnicas de control avanzado, como el PID adaptativo, en sistemas oleoneumáticos permite una reducción del consumo energético y una mejora en la capacidad de respuesta del sistema. Estos beneficios se traducen directamente en procesos industriales más sostenibles, donde la energía se utiliza de manera más racional y los ciclos de mantenimiento pueden espaciarse, alargando la vida útil de los equipos.

El caso documentado por Guevara y Sánchez (2025) ofrece datos muchos más actualizados y concretos sobre el impacto de la automatización mediante lógica difusa en sistemas de bombeo industrial. En su estudio, se reporta una reducción del 15 % en el consumo energético y una disminución significativa en los tiempos de parada del sistema; por tanto, este resultado confirma que la eficiencia no solo se mejora a nivel técnico, sino que también tiene un efecto directo en los márgenes operativos de la industria, puesto que, al reducir los recursos necesarios para alcanzar un mismo nivel de producción, se optimiza el uso del sistema sin comprometer su rendimiento.

En conjunto, la literatura analizada deja en evidencia que la eficiencia industrial en sistemas hidráulicos puede incrementarse de forma sustancial mediante la integración de tecnologías de control inteligente; puesto que, la adaptabilidad, la capacidad de respuesta en tiempo real y la

reducción del error de control permiten mantener los equipos dentro de rangos óptimos de operación, ya que impacta de forma directa en el ahorro energético, la reducción del desgaste mecánico y la optimización de los tiempos operativos, consolidando una gestión más racional de los recursos industriales.

En definitiva, los resultados permiten afirmar que el control inteligente representa una alternativa técnica y operativa superior frente al control tradicional. Su aplicación mejora la eficiencia integral del sistema, reduce el consumo de recursos y extiende la vida útil de los componentes. Aunque requiere inversión inicial y adaptación técnica, los beneficios operativos que ofrece justifican su implementación en entornos industriales que buscan optimizar su rendimiento y sostenibilidad.

Para reforzar estos hallazgos, a continuación, se presenta una comparación directa entre ambos sistemas de control. La tabla resume sus principales virtudes y desventajas considerando aspectos técnicos, operativos y económicos observados durante el análisis documental.

Tabla 4: Virtudes y desventajas control tradicional e inteligente

Aspecto	Control tradicional	Control inteligente
Consumo energético	Elevado, por falta de adaptación a la carga	Optimizado, con reducción de hasta el 15 %
Estabilidad operativa	Inestable ante variaciones	Alta precisión y adaptación continua
Mantenimiento	Frecuente y correctivo	Preventivo, menos frecuente
Adaptabilidad	Muy limitada	Alta, con ajustes en tiempo real
Costo de implementación	Bajo (ya existente)	Medio a alto (requiere inversión inicial)
Retorno a largo plazo	Bajo, con mayores costos operativos acumulados	Alto, por ahorro sostenido en recursos y mantenimiento

Fuente: Elaboración propia con base en Tanaka (2011), Guevara y Sánchez (2025), Cárdenas y Giraldo (2017), Zambrano et al. (2024)

Conclusiones

- El control tradicional en bombas hidráulicas presenta deficiencias técnicas que reducen la eficiencia industrial, como el elevado consumo energético, la falta de monitoreo en tiempo real y la baja capacidad de adaptación a condiciones variables.
- Los sistemas de control inteligente, como el PID optimizado, la lógica difusa y las redes neuronales, ofrecen soluciones que permiten una regulación precisa, mayor estabilidad operativa y una respuesta dinámica más eficaz.

- La comparación entre ambos sistemas demuestra que el control inteligente puede reducir el consumo energético en más del 10 %, minimizar el desgaste de los componentes y optimizar el rendimiento general del sistema, mejorando así la sostenibilidad de los procesos industriales.
- Si bien el control inteligente ofrece claras ventajas técnicas y operativas frente al control tradicional, su implementación implica una inversión inicial más elevada. Este aspecto debe ser considerado dentro del análisis de viabilidad, ya que su adopción dependerá de los recursos disponibles, la infraestructura existente y la visión estratégica de la empresa; a pesar de este costo inicial, los beneficios acumulativos en eficiencia, mantenimiento y prolongación de vida útil permiten proyectar un retorno favorable de la inversión a mediano plazo.

Referencias

1. De las Heras, S. (2019). Fluidos, bombas e instalaciones hidráulicas. Universidad Politecnica de Cataluña. https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=TfzMDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA7&dq=sistemas+hidr%C3%A1ulicos+importancia+en+los+fluidos+&ots=vrGMEUHrbP&sig=-kEyKStNW1_5mSIOXNAB467aRAU#v=onepage&q=sistemas%20hidr%C3%A1ulicos%20importancia%20en%20los%20fluidos&f=false
2. Diego Javier Zambrano Ávila, Johnatan Israel Corrales Bonilla, William Paul Pazuña Naranjo. (2024). Vista de Control de actuadores oleoneumaticos en Robótica Industrial. Gnerando.org. <https://revista.gnerando.org/revista/index.php/RCMG/article/view/268/245>
3. Domínguez, L. F. B., Lavayen, A. C. L., & Romero, J. D. S. (2022). Ventajas de la automatización de la gestión por procesos. Polo del Conocimiento, 7(7), 984–996. <https://doi.org/10.23857/pc.v7i7.4269>
4. Escobar, M. R. (2022). Soluciones de eficiencia energética y análisis de ciclo de vida en una planta de automoción. Comillas.edu. <https://repositorio.comillas.edu/rest/bitstreams/434314/retrieve>
5. Espinosaa, R. D. C., & Cárdenas, R. G. (2017). Vista de Identificación y control digital con redes neuronales para un sistema hidráulico. Edu.co. <https://doi.org/10.17151/vect.2017.12.4>

6. Guevara Ávalos, E. W. (2025). Vista de Eficiencia y seguridad en el proceso industrial: Automatización de bombas del sistema de transferencia de crudo. Itslosandes.net. <https://doi.org/10.55813/gaea/ccri/v6/nE1/734>
7. Huerta, A., & Nasplada, F. (2020). Inteligencia artificial, automatización, reestructuración capitalista y el futuro del trabajo: un estado de la cuestión. Cuadernos de economía crítica, 6, 93–114. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/143688>
8. Jiménez-Villalobos, D., & Enríquez-Zárate, J. (2022). “Eficiencia energética en sistemas de bombeo fotovoltaicos”. Org.mx. https://somim.org.mx/memorias/memorias2022/articulos/A8_171.pdf
9. Li, R., Zhang, Y., Feng, Z., Xu, J., Wu, X., Liu, M., Xia, Y., Sun, Q., & Yuan, W. (2023). Revisión del progreso del ahorro energético de los sistemas de control hidráulico. Mdpi.com. <https://doi.org/10.3390/pr11123304>
10. Machado- Vallejo, L. G. (2022). Selección y Aplicaciones Industriales de Bombas. Unirioja.es. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7554363>
11. Morales, L. F. Q. (2022). Optimización energética en sistemas de bombeo con bombas centrífugas, desarrollo de un caso práctico. Repository Eafit. <https://repository.eafit.edu.co/server/api/core/bitstreams/09cbbb93-e083-4d77-a7da-e618bd5b968c/content>
12. Tanaka, M. C. (2011). Utilização da lógica difusa no controle inteligente de sistemas eletro-hidráulicos. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UFRN_724cbd698b175f26e0b9e6632fa0e337

© 2025 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).