

Diseño de sistemas de frenado y bloqueo mecánico en maquinaria industrial para minimizar riesgos durante tareas de mantenimiento

(Design of Braking and Mechanical Locking Systems in Industrial Machinery to Minimize Risks During Maintenance Tasks)

Luis Fernando Jácome Alarcón, Yuliana Estefania León Quiñonez, Karen Michelle Almeida Rivera, Rubén Calixto Romero Giler
Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Ecuador
ljacomea@uteq.edu.ec, yleonq@uteq.edu.ec, kalmeidar@uteq.edu.ec,
rromerog2@uteq.edu.ec

Resumen: El presente estudio tiene como objetivo evaluar el desempeño de sistemas de frenado y bloqueo mecánico aplicados a maquinaria industrial, con el fin de establecer criterios técnicos que contribuyan a la seguridad durante tareas de mantenimiento. Se desarrolló un diseño experimental controlado basado en la medición de variables como tiempo de detención, ángulo residual post-bloqueo y deformación estructural en tres mecanismos: freno de disco, pasador de bloqueo y sistema de trinquete. Los resultados evidenciaron diferencias significativas entre los mecanismos evaluados, destacándose el freno de disco por su eficiencia en tiempos de detención, mientras que el pasador de bloqueo garantizó inmovilización absoluta con mínima deformación estructural. El análisis estadístico confirmó la influencia del tipo de mecanismo sobre el desempeño dinámico y estructural del sistema. El estudio aporta lineamientos técnicos para la selección y diseño de sistemas de frenado y bloqueo en función de las condiciones operativas, contribuyendo a la reducción de riesgos en entornos industriales.

Palabras clave: Deformación, carga mecánica, elasticidad, material estructural, análisis experimental.

Abstract: This study aims to evaluate the performance of braking and mechanical locking systems applied to industrial machinery in order to establish technical criteria that enhance safety during maintenance tasks. A controlled experimental design was implemented, measuring variables such as stopping time, post-lock residual angle, and structural deformation in three mechanisms: disc brake, locking pin, and ratchet system. Results showed significant differences among the evaluated mechanisms. The disc brake demonstrated higher efficiency in stopping time, while the locking pin ensured absolute immobilization with minimal structural deformation. Statistical analysis confirmed the influence of the mechanism type on system performance. This study provides technical guidelines for selecting and designing braking and locking systems according to operational conditions, contributing to risk reduction in industrial environments.

Keywords: Deformation, mechanical load, elasticity, structural material, experimental analysis.

1. INTRODUCCIÓN

La seguridad en las actividades de mantenimiento en maquinaria industrial se encuentra entre los ejes más relevantes de la gestión de riesgos en contexto de producción. A nivel internacional,

los sucesos relacionados con movimientos imprevistos de los elementos de las máquinas mecánicas se encuentran entre las grandes causas de resultados lesivos graves y fatalidades entre el personal encargado del mantenimiento, especialmente en sectores más automatizados y aplicados a las máquinas pesadas.

Los datos que corroboran esta afirmación son los de la *Occupational Safety and Health Administration* (OSHA), que reporta un porcentaje cercano al 10 % de accidentes fatales en la industria que son consecuencia de fallas en los procedimientos de bloqueo y control de energías peligrosas, lo que indica que se hace necesario emplear sistemas de frenado y de bloqueo que sean seguros y que garanticen que el equipo esté completamente detenido durante las tareas técnicas a realizar [1].

Las normas internacionales, como la ISO 14118:2017 [2], establecen directrices para la prevención de puestas en marcha inesperadas mediante dispositivos de enclavamiento, mecanismos de bloqueo mecánico y sistemas de freno redundantes. Sin embargo, diversos estudios advierten que la sola aplicación de procedimientos administrativos como el lockout/tagout, no es suficiente cuando los equipos presentan inercia elevada, acumulación energética o fallas estructurales en sus componentes de detención [3]. Es por ello que la ingeniería de controles mecánicos de frenado y bloqueo se ha consolidado como una estrategia clave para minimizar el riesgo residual inherente a operaciones de mantenimiento en maquinaria industrial.

Ahora bien, integrar sistemas de frenado mecánico, como frenos de disco, frenos de zapata, frenos de trinquete, frenos de cuña, dispositivos de contrapeso, junto con mecanismos antivuelco físicos como pasadores, enclavamientos positivos, bloqueadores de la transmisión, permite asegurar que la máquina no se podrá mover accidentalmente, ni en actividades de mantenimiento preventivo ni en actividades de mantenimiento correctivo. Es decir, estos sistemas, al ser diseñados siguiendo los principios de la seguridad funcional, refuerzan la integridad del equipo y disminuyen la probabilidad de que se produzca algún incidente por fallo humano o por la degradación de componentes considerados como críticos [4].

El presente artículo tiene por objetivo analizar y proponer lineamientos técnicos para el diseño de sistemas de frenado y bloqueo mecánico aplicados a maquinaria industrial, estableciendo criterios de fiabilidad, resistencia estructural e integración con procedimientos de mantenimiento seguro. En consecuencia, aborda un aspecto central que es el de provisionar una metodología técnica para el diseño que combine principios normativos, análisis de riesgo y selección de componentes con desempeño verificable, buscando reforzar la ingeniería de la seguridad aplicada a equipos industriales.

2. TRABAJO RELACIONADO

El análisis de la literatura científica sobre la seguridad en la máquina industrial abarca desde enfoques que se basan exclusivamente en procedimientos administrativos hasta modelos que apuntan a la integración de sistemas de control mecánicamente redundantes, dispositivos de frenado y/o sistemas de bloqueo físico. En este sentido, diversos los autores coinciden en que las estrategias tradicionales de control de energías peligrosas, como el *lockout/tagout*, aunque efectivas, presentan limitaciones al no ir acompañadas de sistemas de detención mecánica redundante especialmente en ejes en movimiento con alta inercia o en aquellos donde puede existir recopilación de energía [5], [1].

Estudios recientes han analizado el desempeño de sistemas de frenado en maquinaria industrial bajo condiciones dinámicas, evidenciando la importancia de integrar soluciones mecánicas redundantes para mejorar la seguridad operativa [6]. Asimismo, investigaciones enfocadas en sistemas de enclavamiento mecánico destacan su efectividad como barreras físicas frente a fallos en el control de energías peligrosas [7].

Los estudios sobre ingeniería de la seguridad han mostrado la capacidad de los dispositivos de frenado automático y de los sistemas de enclavamiento mecánico como capa adicional de protección. En este sentido, investigaciones recientes en torno a los sistemas de potencia rotativa han indicado que los frenos de disco asistidos por resortes y liberados hidráulicamente presentan niveles superiores de fiabilidad ante los métodos pasivos basados en la detención por fricción o en el desgaste natural del mismo [8]. Sin embargo, estos mecanismos necesitan un diseño riguroso a fin de prevenir fallos por fatiga, deformaciones térmicas y disminución del fluido hidráulico lo que plantea nuevos retos en el entorno del mantenimiento predictivo [9].

Por otra parte, la literatura técnica centrada en la temática de seguridad funcional ha puesto hincapié en la involucración de los sistemas mecánicos de enclavamiento con metodologías de análisis de riesgo como el *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA) o los niveles de prestación contemplados en la norma ISO 13849-1 [10]. Por esa razón, se han realizado estudios comparativos que acreditan la reducción en la probabilidad de puesta en marcha inesperada a partir de la inclusión de mecanismos de enclavamiento positivo con verificación mecánica, frente a mecanismos que únicamente se añaden sensores o enclavamientos eléctricos que son susceptibles de fallos debido a interrupciones energéticas o de software [11].

Finalmente, investigaciones relacionadas con el diseño de maquinaria pesada determinan que la combinación correcta de frenos mecánicos, pasadores de bloqueo y antirretroceso no solo trata sobre la tipología de la máquina (la tipología bien aceptada por las I+D y los usuarios), sino que también prioriza el entorno de trabajo, la carga dinámica y el expediente de incidentes de la máquina. No obstante, a pesar de la disponibilidad de esta información, existe un vacío importante en la literatura en relación con las metodologías integradas que adopten el diseño mecánico, el análisis de riesgos, la ergonomía del mantenimiento y el cumplimiento normativo. Esto sugiere la necesidad de profundizar en el estudio de combinaciones de sistemas de frenado y bloqueo que permitan minimizar los riesgos en las tareas de mantenimiento de manera cuantificable y verificable.

3. METODOLOGÍA

El estudio se desarrolló siguiendo un enfoque técnico–experimental orientado al diseño, validación y evaluación funcional de sistemas de frenado y bloqueo mecánico aplicados a maquinaria industrial con componentes rotativos y mecanismos de transmisión. Debido a ello, la metodología se estructuró en tres etapas principales: análisis de requisitos y riesgo operacional, el diseño mecánico y modelado computacional y la validación mediante pruebas controladas bajo carga variable [12].

3.1. Procedimiento

3.1.1. Análisis de riesgos y definición de requisitos

Se inició con la identificación de peligros mecánicos presentes durante tareas de mantenimiento en maquinaria seleccionada (tornos, bandas transportadoras y prensas industriales). Posteriormente, se aplicó un Análisis Modal de Fallos y Efectos (FMEA) [13] para determinar fallas potenciales en los mecanismos de detención existentes. Por último, se establecieron los requisitos funcionales: fuerza de frenado mínima, capacidad de bloqueo absoluto, resistencia a carga dinámica y compatibilidad estructural con el equipo.

3.1.2. Diseño y modelado de los sistemas de frenado y bloqueo

Se diseñaron tres configuraciones mecánicas:

- Freno de disco con accionamiento por resorte.
- Pasador de bloqueo con enclavamiento positivo, y
- Mecanismo anti-retroceso por trinquete.

Debido a la necesidad de verificar el comportamiento estructural y funcional de los sistemas de frenado y bloqueo mecánico bajo condiciones de carga controlada, cada diseño fue modelado mediante software CAD/CAE para evaluar esfuerzos, rigidez estructural y deformaciones bajo cargas simuladas. Adicionalmente, se empleó análisis por elementos finitos (FEA) para validar espesores, materiales y geometría crítica [14].

3.1.3. Construcción de prototipos

Los prototipos se fabricaron en acero AISI 1045 y AISI 4140, seleccionados por su resistencia mecánica y maquinabilidad. Por ello, que la fabricación se realizó mediante torno CNC y corte láser para garantizar tolerancias dentro de $\pm 0,05$ mm.

3.1.4. Pruebas experimentales

Los sistemas diseñados fueron instalados y evaluados en tres máquinas de prueba independientes, cada una equipada con un banco de ensayo rotativo; es decir, que estas máquinas permitieron simular masas rotativas equivalentes de 10, 20 y 35 kg·m², representativas de condiciones de baja, media y alta inercia típicas de maquinaria industrial. Por ello, para cada configuración se realizaron múltiples repeticiones con el fin de asegurar la consistencia de los resultados.

- Tiempo de detención.
- Fuerza de frenado efectiva.
- Desplazamiento residual tras el bloqueo.
- Fatiga por ciclos repetitivos (hasta 5.000 ciclos).

Los ensayos se realizaron siguiendo el protocolo de validación inspirado en los requisitos de ISO 13849-2, sin replicar los ensayos normativos completos [2].

3.1.5. Materiales

Se emplearon los siguientes materiales y equipos:

- Acero AISI 1045 y 4140 para componentes mecánicos.
- Discos de freno mecanizados de 180 mm de diámetro.
- Resortes helicoidales con rigidez de 1.200 N/m.
- Pasadores de enclavamiento de Ø12 mm en acero templado.
- Banco de pruebas rotativo, con motor eléctrico trifásico de 5 HP.
- Celdas de carga de 5 kN para medición de fuerza de frenado.
- Software CAD/CAE SolidWorks 2023 para modelado y simulación.
- Acelerómetros triaxiales para registrar vibraciones y retrocesos.

Los instrumentos de medición utilizados en el presente estudio fueron previamente calibrados conforme a estándares de laboratorio, garantizando la precisión y confiabilidad de los datos obtenidos durante el proceso experimental.

3.1.6. Diseño experimental

El diseño experimental fue de tipo cuasiexperimental controlado, orientado a evaluar comparativamente el desempeño mecánico de tres mecanismos de frenado y bloqueo bajo condiciones operativas equivalentes. Por ello, que se formuló la siguiente hipótesis de investigación:

- (H₁): El tipo de mecanismo de frenado y bloqueo influye significativamente en el tiempo de detención, el ángulo residual y la deformación máxima del sistema bajo cargas rotacionales crecientes.

- (H_0): Se planteó que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los mecanismos evaluados para las variables analizadas.

Cada uno de los tres mecanismos fue sometido a ensayos bajo cinco niveles de carga rotacional, correspondientes al 10 %, 25 %, 50 %, 75 % y 100 % del torque máximo del banco de pruebas, manteniendo constantes las demás condiciones experimentales. Para cada nivel de carga, se realizaron 10 repeticiones independientes, lo que dio lugar a un total de 150 mediciones por dispositivo, permitiendo asegurar una adecuada base estadística para el análisis comparativo.

Los resultados obtenidos fueron analizados mediante estadística descriptiva (media, desviación estándar y coeficiente de variación) con el fin de caracterizar el comportamiento general de cada mecanismo. Adicionalmente, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) de un factor para determinar la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre los mecanismos evaluados, utilizando un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$; es decir, que cuando se identificaron diferencias significativas, se emplearon pruebas post hoc para identificar los pares de mecanismos con variaciones relevantes [15]

Las métricas principales consideradas en el análisis estadístico fueron el tiempo de detención (ms), el ángulo residual post-bloqueo ($^{\circ}$) y la deformación máxima del sistema (mm). Complementariamente, se realizaron análisis de dispersión para evaluar la consistencia, repetibilidad y estabilidad de los mecanismos a lo largo de los distintos niveles de carga.

3.2. Otros aspectos relevantes

Configuración de equipos

Los prototipos se acoplaron directamente al eje principal del banco utilizando un acople rígido mecanizado. Por ello, que los sensores se fijaron mediante soportes antivibración. Además, se empleó un PLC para controlar el motor y registrar tiempos de activación.

3.2.1. Recolección de datos

Los datos se obtuvieron mediante:

- Sensores analógicos conectados a un módulo DAQ con muestreo de 1 kHz.
- Software LabVIEW para adquisición continua.
- Registros de deformación provenientes del análisis FEA exportados en formato .txt.

3.2.2. Conjunto de datos

El conjunto de datos estuvo compuesto por 450 mediciones experimentales (150 por mecanismo); es decir, cada registro incluyó: nivel de carga (%), torque aplicado ($N \cdot m$), tiempo de detención (ms), fuerza de frenado (N), ángulo residual ($^{\circ}$), temperatura del disco ($^{\circ}C$) y número de ciclo.

4. RESULTADOS

Los resultados obtenidos permiten evaluar el desempeño dinámico y estructural de los tres mecanismos de detención analizados (freno de disco, pasador de bloqueo y trinquete) bajo condiciones equivalentes de carga rotacional y torque aplicado.

4.1. Tiempo de detención

La Tabla 1 resume los valores promedio del tiempo de detención medido en milisegundos (ms) para cada mecanismo y nivel de carga, calculados a partir de 10 repeticiones por condición.

Tabla 1. Tiempo de detención promedio (ms) según nivel de carga.

Nivel de carga (%)	Freno de disco	Pasador de bloqueo	Trinquete
10	85 ± 3,2	102 ± 4,1	97 ± 3,8
25	106 ± 3,9	131 ± 4,5	118 ± 4,2
50	129 ± 4,8	156 ± 5,1	139 ± 4,6
75	141 ± 5,2	169 ± 5,8	151 ± 5,0
100	148 ± 5,6	178 ± 6,2	164 ± 5,9

El análisis estadístico inferencial se realizó mediante un análisis de varianza (ANOVA) de un factor, considerando un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$. Los resultados evidenciaron diferencias estadísticamente significativas entre los mecanismos evaluados, con un valor de $F(2,147) = 15,32$ y un $p = 0,0001$, lo que permite rechazar la hipótesis nula y confirmar que el tipo de mecanismo influye significativamente en el tiempo de detención.

Adicionalmente, se realizaron pruebas post hoc para identificar diferencias entre pares de mecanismos, evidenciando que el freno de disco presenta tiempos de detención significativamente menores en comparación con los otros sistemas evaluados.

La Figura 1 muestra la variación del tiempo de detención en función del nivel de carga para los tres mecanismos evaluados. Se observa una tendencia creciente en todos los casos, siendo el freno de disco el que presenta menores tiempos de respuesta, seguido del trinquete y el pasador de bloqueo. Las diferencias entre mecanismos fueron estadísticamente significativas (ANOVA, $p < 0,05$).

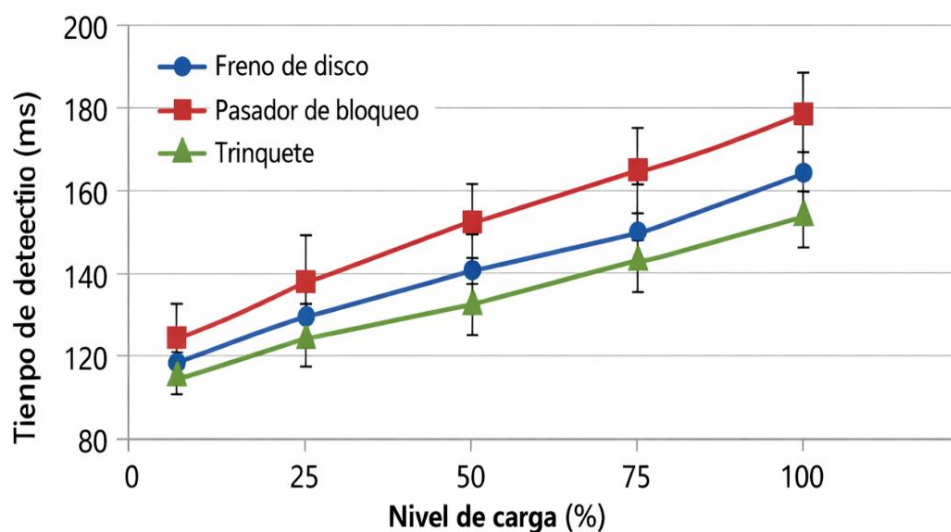


Figura 1. Tiempos de detención (ms) en función del nivel de carga para los mecanismos evaluados.

El análisis estadístico inferencial (ANOVA de un factor, $\alpha = 0,05$) evidenció diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) entre los mecanismos para todos los niveles de carga, confirmando la hipótesis planteada sobre el efecto del tipo de mecanismo en el desempeño dinámico.

4.2. Ángulo residual post-detención

El ángulo residual representa la rotación remanente del sistema tras el bloqueo completo. La Tabla 2 presenta los valores promedio medidos a carga máxima (100 %).

Tabla 2. Ángulo residual promedio a carga máxima.

Mecanismo	Ángulo residual (°)
Freno de disco	$0,9 \pm 0,2$
Pasador de bloqueo	$0,0 \pm 0,0$
Trinquete	$1,5 \pm 0,3$

El pasador de bloqueo no presentó rotación residual medible, lo que confirma su carácter de bloqueo rígido. En contraste, el trinquete mostró el mayor ángulo residual, asociado a holguras mecánicas y deformación localizada durante el acoplamiento.

De acuerdo con la Figura 2, se presenta el ángulo residual registrado tras la detención completa del sistema. El pasador de bloqueo muestra una inmovilización absoluta (0°), mientras que el trinquete presenta el mayor desplazamiento residual, asociado a holguras mecánicas. Por su parte, el freno de disco presenta valores bajos, asociados a su mecanismo de fricción.

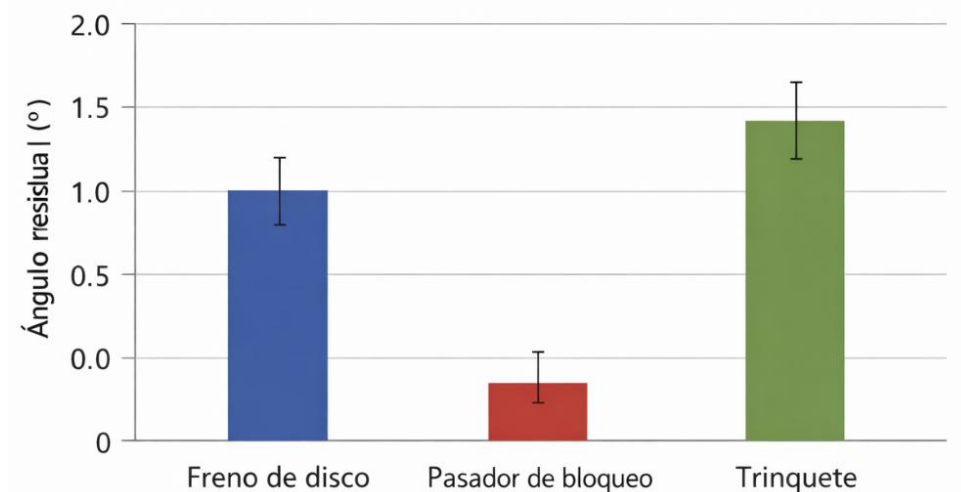


Figura 2. Ángulo residual post-detención (°) para los mecanismos evaluados.

4.3. Deformación estructural máxima

La deformación máxima fue obtenida mediante mediciones experimentales y validación con análisis por elementos finitos (FEA). La Tabla 3 resume los valores máximos registrados.

Tabla 3. Deformación máxima del sistema a carga máxima.

Mecanismo	Deformación máxima (mm)
Freno de disco	$0,42 \pm 0,05$
Pasador de bloqueo	$0,18 \pm 0,03$
Trinquete	$0,37 \pm 0,04$

El pasador de bloqueo presentó la menor deformación estructural, lo que concuerda con su mayor rigidez. Por su parte, el freno de disco, aunque más rápido en la detención, evidenció mayores deformaciones debido a la distribución de esfuerzos sobre superficies de contacto.

La Figura 3 presenta la deformación estructural máxima registrada en cada mecanismo, confirmando que el pasador de bloqueo exhibe la mayor rigidez estructural, en contraste con el freno de disco, que registra valores superiores debido a la concentración de esfuerzos.

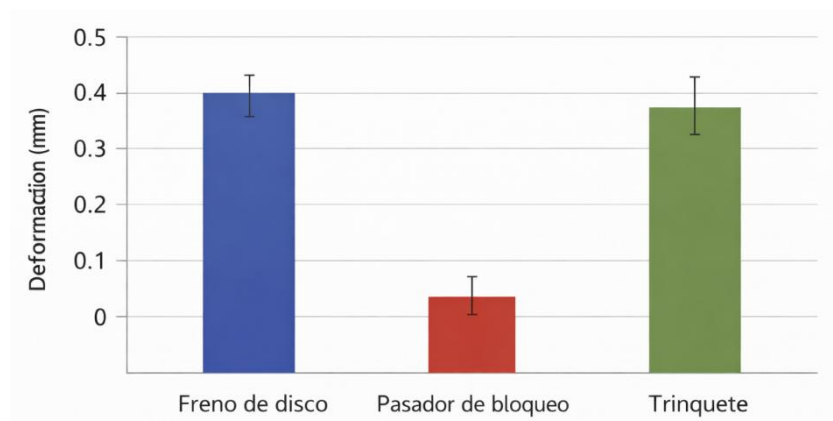


Figura 3. Deformación estructural máxima (mm) de los mecanismos evaluados.

4.4. Repetibilidad y fatiga

Durante los ensayos de fatiga (hasta 5.000 ciclos), ninguno de los mecanismos presentó fallas catastróficas. Sin embargo, el trinquete mostró un aumento progresivo del ángulo residual después de los 4.000 ciclos, mientras que el freno de disco mantuvo un comportamiento estable y el pasador de bloqueo evidenció un desgaste mínimo sin pérdida funcional.

5. DISCUSIÓN

Los resultados permiten interpretar de manera integral el desempeño de los sistemas de frenado y bloqueo mecánico evaluados, considerando tanto su respuesta dinámica como su comportamiento estructural bajo condiciones de carga rotacional controlada. A diferencia de un enfoque centrado en propiedades intrínsecas de los materiales, el presente estudio se enfoca en el análisis funcional de mecanismos de detención, en concordancia con los objetivos planteados y el diseño experimental desarrollado.

En términos de desempeño dinámico, se evidenció que el tipo de mecanismo influye significativamente en el tiempo de detención, tal como lo confirmó el análisis estadístico (ANOVA, $p < 0,05$); es decir, que el freno de disco presentó los menores tiempos de respuesta en todos los niveles de carga, lo cual puede explicarse por su capacidad de disipar energía de manera progresiva mediante fricción controlada. Este comportamiento es consistente con estudios sobre sistemas de frenado en maquinaria rotativa, donde se ha demostrado que los mecanismos basados en fricción activa permiten una detención más eficiente y controlada [8], [9].

Por otro lado, el pasador de bloqueo, aunque registró mayores tiempos de detención, garantizó una inmovilización absoluta del sistema, evidenciada por un ángulo residual igual a cero. Esta característica lo posiciona como una solución altamente segura para tareas de mantenimiento, en las que la eliminación total del movimiento constituye un requisito crítico. En este sentido, el hallazgo es coherente con investigaciones que destacan la superioridad de los sistemas de enclavamiento mecánico frente a soluciones basadas únicamente en control eléctrico o en procedimientos administrativos, debido a su independencia de fuentes de energía externas [10], [11].

El sistema de trinquete presentó un comportamiento intermedio, combinando características de frenado y bloqueo. No obstante, se observó un incremento progresivo del ángulo residual durante los ensayos de fatiga, lo cual sugiere una mayor sensibilidad al desgaste mecánico y a la presencia de holguras en los puntos de contacto. Este comportamiento ha sido reportado en estudios previos relacionados con mecanismos de acoplamiento dentado, donde la repetición de ciclos induce degradación progresiva del sistema [8].

Desde el punto de vista estructural, el pasador de bloqueo mostró la menor deformación máxima, lo que indica una mayor rigidez del sistema y una mejor distribución de esfuerzos. En contraste, el freno de disco presentó mayores deformaciones, asociadas a la concentración de esfuerzos en las superficies de contacto, lo cual es inherente a su principio de funcionamiento; es decir, los resultados son consistentes con análisis estructurales realizados mediante herramientas CAD/CAE y validaciones por elementos finitos, donde se evidencia que los sistemas de contacto por fricción tienden a concentrar esfuerzos en áreas específicas [14].

Adicionalmente, el análisis de repetibilidad y fatiga evidenció que, aunque ninguno de los mecanismos presentó fallas catastróficas hasta los 5.000 ciclos, existen diferencias en su estabilidad a largo plazo. En este sentido, el freno de disco mantuvo un comportamiento estable, mientras que el trinquete mostró degradación progresiva, lo cual debe ser considerado en aplicaciones industriales donde se requiera alta durabilidad.

Desde una perspectiva aplicada, los resultados permiten establecer criterios claros para la selección de mecanismos en función del contexto operativo puesto que un sistema con alta inercia, el freno de disco resulta más adecuado debido a su capacidad de disipación de energía. En contraste, para tareas de mantenimiento donde se requiere inmovilización total, el pasador de bloqueo representa la alternativa más segura es por ello este enfoque coincide con lineamientos establecidos en normativas internacionales y estudios de seguridad industrial que enfatizan la necesidad de integrar sistemas mecánicos redundantes para minimizar riesgos [1], [2], [4].

No obstante, el estudio presenta limitaciones asociadas a la realización de ensayos en condiciones controladas de laboratorio, las cuales no reproducen completamente escenarios industriales reales ya que factores como variaciones térmicas, vibraciones, contaminación ambiental y desgaste a largo plazo pueden influir en el desempeño de los mecanismos. Asimismo, aunque se utilizó un diseño experimental robusto con 450 mediciones, los resultados corresponden a configuraciones específicas de materiales y geometrías, lo que limita su generalización.

En este contexto, se recomienda que futuras investigaciones incorporen condiciones operativas reales, así como el análisis de combinaciones de sistemas de frenado y bloqueo que permitan implementar soluciones redundantes más seguras y ya de igual manera, resulta pertinente integrar metodologías de análisis de riesgo más avanzadas, como FMEA aplicado a sistemas mecánicos complejos, para fortalecer la validación de los diseños propuestos [13].

6. CONCLUSIONES

El presente estudio permitió evaluar comparativamente el desempeño de tres sistemas de frenado y bloqueo mecánico aplicados a maquinaria industrial, confirmando la hipótesis de investigación planteada (H_1), la cual establece que el tipo de mecanismo influye significativamente en variables críticas como el tiempo de detención, el ángulo residual y la deformación estructural del sistema es decir que este resultado fue respaldado por el análisis estadístico inferencial (ANOVA, $p < 0,05$), lo que permitió rechazar la hipótesis nula (H_0) y validar la influencia del diseño mecánico en el comportamiento dinámico de los sistemas evaluados.

En términos de desempeño, el freno de disco demostró ser el mecanismo más eficiente en la reducción del tiempo de detención, debido a su capacidad de disipación progresiva de energía mediante fricción controlada. Este comportamiento lo convierte en una alternativa adecuada para aplicaciones donde se requiere una respuesta rápida ante condiciones de alta inercia, en concordancia con estudios sobre sistemas de frenado en maquinaria rotativa.

Por otro lado, el pasador de bloqueo presentó la mayor capacidad de inmovilización, evidenciada por un ángulo residual nulo y una deformación mínima, lo que garantiza condiciones

de seguridad óptimas durante tareas de mantenimiento. Es decir, que este resultado refuerza la importancia de los sistemas de enclavamiento mecánico como barreras físicas de seguridad, tal como lo establecen los principios de seguridad funcional y normativas internacionales.

El sistema de trinquete, aunque mostró un comportamiento intermedio, evidenció limitaciones asociadas a la presencia de holguras mecánicas y desgaste progresivo bajo condiciones de fatiga, lo que se reflejó en el incremento del ángulo residual tras múltiples ciclos de operación. Este aspecto debe ser considerado en aplicaciones donde se requiera alta precisión en la inmovilización o estabilidad a largo plazo.

Desde una perspectiva estructural, se concluye que los mecanismos con bloqueo rígido presentan menor deformación y mayor estabilidad, mientras que los sistemas basados en fricción tienden a concentrar esfuerzos en zonas específicas, lo cual coincide con análisis estructurales realizados mediante herramientas de simulación y validación por elementos finitos.

Como principal aporte del estudio, se establecen lineamientos técnicos para la selección de sistemas de frenado y bloqueo mecánico en función del contexto operativo y ya en este sentido, se recomienda el uso de frenos de disco en maquinaria con alta inercia o requerimientos de detención rápida, mientras que los pasadores de bloqueo son más adecuados para tareas de mantenimiento donde se requiere inmovilización absoluta del sistema. Es decir, que estas recomendaciones responden directamente a la necesidad de integrar soluciones mecánicas que complementen los procedimientos de control de energías peligrosas, tal como lo sugieren estudios y normativas en seguridad industrial.

No obstante, se identifican limitaciones asociadas a la realización de ensayos en condiciones controladas de laboratorio, lo que puede diferir del comportamiento real en entornos industriales, donde intervienen factores como vibraciones, variaciones térmicas, desgaste y condiciones operativas variables. Asimismo, los resultados obtenidos corresponden a configuraciones específicas de materiales y geometrías, lo que limita su generalización a otros sistemas.

Finalmente, se recomienda como trabajo futuro la validación de estos sistemas en condiciones reales de operación, así como la evaluación de configuraciones híbridas que integren mecanismos de frenado y bloqueo redundantes; adicionalmente, se sugiere incorporar metodologías avanzadas de análisis de riesgos, como el FMEA, para optimizar el diseño y garantizar mayores niveles de seguridad en maquinaria industrial.

REFERENCIAS

- [1] Occupational Safety and Health Administration (OSHA), “Bloqueo y etiquetado,” 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.osha.gov/sites/default/files/publications/lockout-tagout-spanish.pdf>
- [2] International Organization for Standardization (ISO) 14118, “Safety of machinery — Prevention of unexpected start-up,” 2017. [En línea]. Disponible en: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/66460/62a3ecd66eab46b6ae004bf557c660dc/ISO-14118-2017.pdf>
- [3] J. J. Delgado Huaraca y R. C. Sacón Pazmiño, “Diseño y construcción de un módulo de control para la simulación de fallas en sistemas de frenado de motores trifásicos para el laboratorio de Mantenimiento Correctivo-Facultad de Mecánica”, Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica De Chimborazo, 2024. [En línea]. Disponible: <https://dspace.esPOCH.edu.ec:8080/server/api/core/bitstreams/f2be58de-b4c7-4622-bb74-0d7934c75a70/content>

- [4] D. Cepeda Pérez, J. Muñoz Manrique, J. Baez Solano y H. Corredor Cely, “Guía de Implementación Para Seguridad de Procesos,” 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Deigo-Cepeda-Perez/publication/384227993_Guia_de_Implementacion_Para_Seguridad_de_Procesos_Process_Safety_Implementation_Guide/links/66e000a119c9496b1fb4683f/Guia-de-Implementacion-Para-Seguridad-de-Procesos-Process-Sa.
- [5] J. M. Ayros Alverdi, “Implementación de puntos de bloqueo de energías (loto) en las áreas de fundición para la disminución de riesgos laborales durante las actividades de mantenimiento en la empresa Tecnofil”, Tesis de grado, Universidad San Ignacio de Loyola, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.usil.edu.pe/server/api/core/bitstreams/b04b1fb9-5ea0-48e3-9c6e-1347ef4885d4/content>.
- [6] J. V. Alvarado-Rodríguez y J. D. Gómez-Masa, “Evaluación del sistema de frenado hidráulico y neumático en vehículos industriales pesados y semi pesados”, *Dominio de las Ciencias*, vol. 6, no. 2, pp. 75-97, abr. 2020. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7351788>
- [7] B. Guadamud, M. Miño, J. Mawyin y L. Jácome, “Optimización de sistemas de refrigeración en máquinas eléctricas: eficiencia y seguridad”, *Dominio de las Ciencias*, vol. 6, no. 2, pp. 75-97 2025. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=10327545>
- [8] M. Chuquimango Chilon, “Mantenimiento preventivo y correctivo del sistema de frenos de los vehículos livianos”, Tesis de grado, Universidad Nacional de Educación Enrique Guzmán y Valle, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.une.edu.pe/server/api/core/bitstreams/3cb846d7-8ab3-42b0-8e02-d8112730df05/content>
- [9] C. T. Coloma Torres y H. J. Reyes Cevallos, “Diseño y construcción del sistema de freno hidráulico para el banco de pruebas del motor de combustión interna de 1400 cc de la Universidad Politécnica Salesiana”, Tesis de grados, Universidad Politécnica Salesiana, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/20794/1/UPS%20-%20TTS483.pdf>.
- [10] J. Safety, “*Seguridad en sistemas de control según la norma EN ISO 13849-1*”, Barcelona: Asea Brown Boveri, S.A., 2021. [En línea]. Disponible en: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1TXA172002B0701&L>
- [11] J. M. Aguiñaga Martínez, “Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento Automatizado,” Tesis de grado, Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://pabellon.tecnm.mx/pdf/Investigacion/Tesis%20JMAM.pdf>
- [12] S. R. Santana, L. Antonelli y P. Thomas, “Evaluación de metodologías para la validación de requerimientos” en Congreso Argentino de Ciencias de la Computación, Argentina, 2021. pp: 419-428. [En línea]. Disponible en: https://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/130429/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- [13] L. L. Olarte Sánchez, “Desarrollo de la metodología de Análisis Modal de Fallos y Efectos (AMFE) para el mejoramiento del programa de mantenimiento de la flota de vehículos del Clúster Suroriente de la empresa Cemex Premezclados SA”, Tesis de grado, Universidad

Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uptc.edu.co/server/api/core/bitstreams/5ab9de40-c012-43b4-9dca-6880f24c1963/content>.

- [14] A. E. Manosalva Chinome, “Análisis de diseño estructural para soporte de barcasas mediante software tipo CAD y CAE”, Tesis de grado, Universidad de Boyacá, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uniboyaca.edu.co/server/api/core/bitstreams/e92560b6-fea7-4db2-92a3-54bd52695a7a/content>
- [15] J. López Bedoya, “Estadística Básica para laboratorios de ensayo, un acercamiento a los requisitos de la Norma Técnica Colombiana NTC-ISO/IEC 17025: 2017 : estadística básica para laboratorios de ensayo”, Tesis de grado, Universidad de Antioquia, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/server/api/core/bitstreams/9df2d7b3-e0b3-4c09-a7c6-33aeb1f91ac5/content>

