

Flujo Hidráulico en Dos Cilindros en Paralelo para Sistemas de Cincuenta Toneladas

Paucar, Jonathan¹; Torres, Felipe²

¹Instituto Superior Tecnológico 17 de Julio, Mecánica Industrial, <https://orcid.org/0009-0002-8461-1417>, Ibarra, Ecuador.

²Instituto Superior Tecnológico 17 de Julio, Mecánica Industrial, <https://orcid.org/0000-0002-6469-6137>, Ibarra, Ecuador.

Recibido: 2025/06/30

Aceptado: 2025/07/01

Resumen: En sistemas hidráulicos de gran capacidad como las máquinas plegadoras industriales, la sincronización de cilindros paralelos es un reto técnico constante. La inadecuada coordinación genera descompensaciones que afectan la calidad del doblado, la precisión dimensional y la seguridad operativa, especialmente bajo carga variable. Ante esta problemática, el objetivo fue analizar experimentalmente el comportamiento del flujo hidráulico y la sincronización de dos cilindros en paralelo en una plegadora hidráulica de hasta cincuenta toneladas, buscando identificar las limitaciones del sistema y proponer soluciones viables para mejorar su desempeño. Para ello, se empleó una metodología experimental en condiciones reales de operación, evaluando tres configuraciones: sin regulación de caudal, con una válvula divisora PRINCE D300 unidireccional, y con una válvula divisora/combinadora DFL 25/40 bidireccional. Se midió el desplazamiento de los cilindros en vacío y bajo carga para comparar la sincronización. Los resultados evidenciaron desincronización significativa sin regulación. La válvula PRINCE D300 mejoró el control en la bajada en vacío, pero no en subida, debido a su naturaleza unidireccional. Por su parte, la válvula DFL 25/40 sincronizó efectivamente en ambos sentidos sin carga; sin embargo, no lo hizo de manera óptima bajo carga. Este hallazgo se atribuyó a que el caudal del sistema (12 L/min) resultó inferior al mínimo requerido por la válvula (25 L/min) para su funcionamiento compensado. Los beneficiarios directos de esta investigación son diseñadores, técnicos y operadores de maquinaria hidráulica, quienes podrán optimizar la selección de válvulas divisoras de caudal para lograr sistemas más productivos, seguros y precisos.

Palabras Clave: Sincronización hidráulica; cilindros en paralelo; válvulas divisoras de caudal; máquina plegadora; análisis experimental.

Hydraulic Flow in Parallel Two-Cylinder Systems for Fifty-Ton Applications

Abstract: In industrial hydraulic press brakes, a type of high-capacity hydraulic system, synchronizing parallel cylinders is a constant technical challenge. Inadequate coordination generates imbalances affecting bending quality, dimensional precision, and operational safety, especially under variable loads. To address this, the objective was to experimentally analyze hydraulic flow behavior and synchronization of two parallel cylinders in a hydraulic press brake up to fifty tons. The study aimed to identify system limitations and propose viable solutions for improved performance. An experimental methodology was rigorously applied under real operating conditions, evaluating three configurations: a baseline without flow regulation, a setup with a unidirectional PRINCE D300 flow divider valve, and another with a bidirectional DFL 25/40 divider/combiner valve. Cylinder displacement was meticulously measured under both no-load and loaded conditions to compare synchronization levels. Results clearly evidenced significant desynchronization without external regulation. The PRINCE D300 valve notably improved control during no-load descent but failed during ascent, attributed to its unidirectional nature. Conversely, the DFL 25/40 valve achieved exceptional synchronization in both directions under no-load; however, its performance proved suboptimal under actual load. This crucial finding was attributed to the system's pump flow rate (12 L/min) being substantially lower than the valve's minimum required flow (25 L/min) for compensated operation. The direct beneficiaries of this investigation include hydraulic system designers, technical personnel, and operators of industrial machinery. The practical insights gained will enable them to optimize the selection and implementation of appropriate flow divider valves, fostering more productive, safer, and precise industrial hydraulic systems.

Keywords: Hydraulic synchronization; parallel cylinders; flow divider valves; bending machine; experimental analysis

1. Introducción

Casos documentados en sistemas de prensas sincronizadas reportan que errores en la sincronización pueden generar importantes pérdidas, obligando a retrabajar piezas y a incurrir en costes adicionales por la instalación de sensores o sistemas de control más robustos (Woś & Dindorf, 2022; Carreira et al., 2023). En estos mismos estudios se destaca que las estrategias de mantenimiento predictivo implementadas con sensores de flujo y presión no son suficientes si el diseño del sistema hidráulico carece de un control sincronizado robusto (Wu & Zhang, 2024).

En el entorno industrial contemporáneo, caracterizado por una creciente automatización, competitividad global y demanda de precisión, los sistemas hidráulicos continúan siendo una tecnología esencial en maquinaria de gran capacidad. Equipos como prensas, grúas, plataformas elevadoras, cortadoras, inyectoras y máquinas plegadoras dependen del uso de fluidos a presión para transmitir fuerza y controlar movimientos con una precisión que supera ampliamente a los sistemas neumáticos y, en muchos casos, a los eléctricos (Esposito, 2018; Manring & Fales, 2019). Esta tecnología ofrece ventajas distintivas como la alta densidad de potencia, la posibilidad de multiplicar fuerzas con facilidad, y una respuesta inmediata ante señales de control, incluso en condiciones de carga variable o entornos agresivos.

Jonathan Paucar.
Autor por correspondencia.

En términos de desempeño, los sistemas hidráulicos han demostrado ser especialmente útiles en tareas donde se requiere un control exacto del movimiento lineal o rotacional, como es el caso de la industria metalmeccánica, minera, agrícola y de construcción pesada. A ello se suma su robustez frente a sobrecargas y la capacidad de adaptarse a sistemas modulares y de gran escala, como los encontrados en puentes grúa, líneas de producción o equipos de prensado continuo (Cengel & Cimbala, 2018).

Sin embargo, la operación efectiva de estos sistemas depende de su eficiencia energética, su

confiabilidad a largo plazo y, sobre todo, de su capacidad para mantener una sincronización precisa entre los actuadores hidráulicos—en especial cuando operan en paralelo. Este requisito es crucial en máquinas como las plegadoras, donde dos o más cilindros deben moverse de forma estrictamente simultánea para garantizar la uniformidad del trabajo, evitando deformaciones, mermas de calidad o incluso fallas estructurales (Li et al., 2023; Lyu et al., 2021; Woś & Dindorf, 2022; Viersma, 1980).

El funcionamiento sincrónico de estos actuadores resulta ser una de las tareas más complejas del diseño hidráulico moderno (Jensen, 2024). A pesar de que los cilindros puedan tener características idénticas de diseño, la realidad operacional presenta variables impredecibles como diferencias internas en la fricción, desviaciones mínimas en las tolerancias, asimetrías de carga, o variaciones de temperatura y viscosidad del fluido que alteran el comportamiento dinámico del sistema. Estas condiciones hacen que los actuadores se desplacen a velocidades diferentes, afectando gravemente la calidad del producto final, la seguridad del proceso y el tiempo de vida útil de la máquina.

Para contextualizar este problema, la desincronización en sistemas hidráulicos no es un fenómeno menor ni aislado, sino que se reconoce como una causa significativa de fallas prematuras en maquinaria pesada, cilindros de carga, plataformas niveladoras o cortadoras industriales (Li et al., 2023). Este tipo de falla no solo compromete la funcionalidad del equipo, sino que representa una amenaza directa a la calidad del producto final, generando rechazos, reprocesos y un aumento considerable en el desperdicio de material.

En procesos de doblado de lámina metálica, por ejemplo, una diferencia de apenas 2 mm entre los cilindros puede producir una deformación notable en la pieza, obligando a detener la línea de producción. Las consecuencias se traducen en pérdidas económicas acumulativas: paros de máquina, consumo energético innecesario, daño en herramientas de trabajo, aumento de la

frecuencia de mantenimiento correctivo y disminución de la vida útil de componentes críticos como sellos, válvulas y guías laterales (Lyu et al., 2021; Pedersen et al., 2021)

Estudios recientes indican que las pérdidas derivadas de la desincronización pueden representar costos operativos significativos en empresas que trabajan con maquinaria hidráulica de gran porte. Se ha demostrado que la desincronía incrementa las pérdidas por estrangulación y fugas, llegando a afectar hasta el 25-30% del consumo hidráulico total (Li et al., 2023b), además de reducir drásticamente la eficiencia volumétrica de componentes clave (Novak et al., 2023).

Complementando las pérdidas operativas, la desincronización también tiene un efecto negativo directo en el consumo energético. Cuando un cilindro se desplaza más rápido que el otro, el sistema tiende a compensar de forma ineficiente, recirculando fluido o generando sobrepresión en líneas específicas. Esta situación aumenta el esfuerzo de la bomba, eleva la temperatura del fluido y, por consiguiente, reduce la eficiencia volumétrica y térmica del sistema (Murrenhoff et al., 2022). Además, estas condiciones aceleran la oxidación del fluido hidráulico, deteriorando válvulas sensibles y reduciendo la precisión en válvulas de control fino o direccional.

Así, queda claro que la desincronización hidráulica no solo es un problema técnico, sino una fuente relevante de ineficiencia económica, energética y operativa. En un entorno donde cada minuto de producción cuenta, y donde la trazabilidad de calidad es una exigencia normativa (como en ISO 9001 o ISO/TS 16949), los sistemas hidráulicos deben ser diseñados y evaluados para operar de forma precisa, aún bajo condiciones de carga variable, desgaste progresivo o fluctuaciones térmicas. (Dinca et al., 2025; International Organization for Standardization, 2009, 2015; Li et al., 2023a; Lewis, 2023; Pingdom, 2023; Sun & Zhang, 2023; Zhang et al., 2024).

La evolución de los sistemas de sincronización hidráulica ha seguido dos líneas principales: el

desarrollo de componentes pasivos de control de caudal, como válvulas divisoras y combinadoras, y la incorporación de sistemas electrónicos de control activo, como servoválvulas y algoritmos computacionales adaptativos (Jelali & Kugi, 2016; Li et al., 2023a). En sus inicios, las válvulas divisoras de caudal se implementaban con orificios calibrados o restrictoras fijas, que distribuían el flujo en proporciones preestablecidas. Estas soluciones eran simples, económicas y fáciles de mantener, pero su desempeño era extremadamente sensible a las variaciones de carga y presión entre las líneas, lo que limitaba su eficacia práctica a condiciones de trabajo estables (Merritt, 1967; Esposito, 2018). Con el tiempo, surgieron válvulas más avanzadas, como las divisoras/combinadoras compensadas por presión, que incorporan elementos móviles internos (carretes, pistones o sistemas de resorte) capaces de ajustar dinámicamente el caudal hacia cada cilindro, en función de la diferencia de presión que se detecta en las líneas de salida (Kumar et al., 2022).

Estos dispositivos compensados han mejorado notablemente la sincronización en sistemas donde las cargas varían o no están perfectamente equilibradas. Sin embargo, su eficiencia depende de operar dentro de un rango específico de caudal y presión (Kumar et al., 2022). Por ejemplo, una válvula como la DFL 25/40 puede requerir un caudal mínimo para funcionar correctamente; si se utiliza por debajo de este umbral (e.g., 12 L/min frente a un requisito de 25 L/min), la válvula pierde su capacidad de compensación, volviendo a un comportamiento errático similar al de una válvula simple. A esto se suman problemas de sensibilidad al desgaste, contaminación del fluido y variaciones en la viscosidad, factores que afectan su respuesta y precisión con el paso del tiempo (Novak et al., 2023).

La última década ha sido testigo de un rápido avance en el desarrollo de sistemas inteligentes de control hidráulico. Diversos estudios clasifican las estrategias de sincronización en tres enfoques fundamentales: modo equivalente, maestro-esclavo y acoplamiento cruzado (cross-coupling) (Li et al., 2023a; Li et al., 2024). Estas estrategias han sido potenciadas con algoritmos, logrando

niveles de precisión en la sincronización inferiores a 0,1mm.

Por ejemplo, investigaciones recientes demuestran que los algoritmos con acoplamiento cruzado pueden reducir significativamente los errores entre cilindros, alcanzando precisiones mejoradas en comparación con los sistemas tradicionales maestro-esclavo (Sun et al., 2023). Además, la combinación de control por modo deslizante con algoritmos de adaptación dinámica ha mostrado mejoras de hasta un 90 % en la precisión, incluso en presencia de perturbaciones externas o cargas asimétricas (Su & Zheng, 2023; Zhu et al., 2023).

Estas soluciones han permitido reducir errores de sincronización en sistemas multicilindro por debajo de los 5 mm en menos de 3 segundos de operación, sin necesidad de recalibración manual (García et al., 2025; Li et al., 2024). Estas técnicas ofrecen un potencial enorme para aplicaciones industriales con ciclos dinámicos, cargas cambiantes o requerimientos de trazabilidad de alta precisión.

La implementación de estos controles avanzados, que demandan sensores de posición, transductores de presión, válvulas proporcionales y unidades de control electrónicas (ECU o PLC), conlleva requisitos adicionales. Estos sistemas exigen un entorno operativo limpio y estable, junto con protocolos de comunicación bien definidos. Para muchas plantas industriales, especialmente en economías emergentes o con limitaciones de infraestructura, estas exigencias pueden representar una barrera tecnológica y económica considerable (Rankka & Dell'Amico, 2024).

Por esta razón, aunque los sistemas activos ofrecen mayor precisión, las válvulas pasivas siguen siendo la solución preferida en entornos donde se requiere simplicidad, bajo costo de mantenimiento y facilidad de integración (Manring & Fales, 2019). Su desempeño, no obstante, debe ser evaluado experimentalmente en función de las condiciones reales de operación, incluyendo carga, caudal, presión y tipo de fluido.

A pesar del sólido desarrollo teórico en los mecanismos de sincronización hidráulica, una parte crítica del problema persiste en la brecha existente entre el diseño ideal y el comportamiento real de los sistemas. Las condiciones de operación industrial —presión fluctuante, caudales irregulares, temperaturas cambiantes, contaminación del fluido, desgaste progresivo— hacen que incluso válvulas de última generación o algoritmos de control bien diseñados no respondan de forma óptima si no se ajustan con precisión a los parámetros reales del sistema (Watton, 2007; Jelali & Kugi, 2016).

En este contexto, los estudios puramente simulados o teóricos, aunque fundamentales, resultan insuficientes para capturar la complejidad de la sincronización hidráulica en entornos productivos. Numerosos trabajos han subrayado la necesidad de validar experimentalmente cualquier estrategia de sincronización —ya sea pasiva o activa— para determinar su viabilidad y eficiencia bajo condiciones operacionales específicas (Kumar et al., 2022; Li et al., 2023a).

Además, validar el desempeño hidráulico bajo distintas configuraciones de válvulas permite a ingenieros y técnicos tomar decisiones más informadas respecto a la compatibilidad de componentes, la selección de bombas y la adaptación del sistema a diferentes condiciones de trabajo. Esta práctica se alinea con tendencias modernas como el diseño basado en evidencia (evidence-based engineering), que busca reducir el riesgo de fallas catastróficas al respaldar cada decisión técnica con pruebas concretas (Kenett et al., 2020).

En definitiva, la necesidad de precisión, seguridad y productividad en maquinaria pesada —como las plegadoras industriales— convierte a la sincronización hidráulica en un eje crítico para la sostenibilidad operativa. La validación experimental de soluciones, incluso en sistemas aparentemente simples, es indispensable para cerrar la brecha entre teoría y práctica, contribuyendo con ello al desarrollo de una ingeniería más robusta, adaptativa y centrada en el desempeño real.

2. Métodos y Técnicas

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque mixto, que integró componentes descriptivos, explicativos y experimentales. Este diseño metodológico fue seleccionado para abordar la problemática de la desincronización en cilindros hidráulicos de maquinaria industrial de gran capacidad desde una perspectiva integral y sistemática.

La investigación se inició con una fase descriptiva, centrada en la observación directa y sistemática del comportamiento operativo de la maquinaria en su estado actual, previo a cualquier intervención. Esta observación permitió identificar y caracterizar la manifestación del problema de desincronización en un entorno de producción real, documentando los patrones de falla y sus efectos iniciales.

Posteriormente, se llevó a cabo una fase explicativa, crucial para desentrañar las causas subyacentes de la desincronización. Esta etapa no solo implicó el análisis técnico de los posibles factores mecánicos e hidráulicos, sino que también incluyó una validación fundamental de la relevancia y el impacto del problema en el contexto industrial ecuatoriano. Para ello, se recurrió a la experticia de profesionales del sector, cuyos conocimientos y experiencias complementaron el análisis teórico.

Finalmente, la fase experimental constituyó el pilar central de la propuesta de mejora. En esta etapa, se implementaron y evaluaron diversas soluciones directamente en el equipo, bajo condiciones controladas y replicables. Para ello, se evaluaron tres configuraciones del sistema: un sistema base sin regulación de caudal; un sistema con una válvula divisora unidireccional (PRINCE D300); y un sistema con una válvula divisora/combinadora bidireccional (DFL 25/40). Cada configuración fue probada bajo dos condiciones principales: sin carga (vacío) y con carga real, para medir y comparar el nivel de sincronización entre los cilindros. La información detallada sobre los resultados de estas pruebas se presenta en la sección 3. La integración de la observación en un entorno operacional real, que

fue validada con el aporte de expertos del sector, con pruebas experimentales rigurosamente diseñadas fue esencial para determinar la efectividad y viabilidad de las configuraciones propuestas, permitiendo validar los hallazgos con base en evidencia empírica. Este enfoque garantizó que las conclusiones no solo fueran teóricamente sólidas, sino también aplicables y pertinentes para la industria.

La solidez de esta investigación se basa en la combinación estratégica de dos fuentes de información clave: un caso de estudio técnico específico y la experiencia práctica de expertos del sector. Esta aproximación garantiza una comprensión integral del problema, fusionando el análisis técnico profundo con las perspectivas operativas directas.

Para contextualizar la problemática de la desincronización y complementarla con una óptica industrial, se consultó a un grupo de expertos, cuyo muestreo se detalla en la Tabla 1.

Tabla 1. Población del estudio

Elemento	Población	Técnica
Expertos en mantenimiento hidráulico (Ecuador)	en 10 ingenieros (> 8 años de experiencia)	Entrevistas

Elaboración Propia

Para lograr una comprensión multidimensional de la desincronización desde una perspectiva industrial y validar su impacto real, se llevaron a cabo entrevistas con los 10 expertos seleccionados. Estos profesionales, provenientes específicamente de las ciudades de Quito,

Ambato y Guayaquil, aportaron valiosas percepciones basadas en su experiencia directa. La recopilación de sus conocimientos se realizó mediante entrevistas semiestructuradas, lo que permitió tanto seguir un guion temático predefinido como explorar nuevas vías de discusión relevantes que surgieran durante la conversación. La información obtenida fue sometida a un análisis de contenido y temático.

Este enfoque permitió identificar patrones recurrentes, validar la relevancia y el impacto de

la desincronización en el sector, y contrastar las observaciones técnicas con la realidad operativa enfrentada por los especialistas en el campo. Los hallazgos derivados de estas entrevistas fueron fundamentales para contextualizar la problemática y orientar el diseño de la fase experimental.

3. Resultados

La plegadora industrial utilizada estaba equipada con un sistema hidráulico con una bomba de 12 L/min y una válvula eléctrica con capacidad de hasta 3000 psi. Sus cilindros principales tenían un diámetro de 140 mm. Se evaluaron tres configuraciones de válvulas divisorias de caudal:

Configuración Base: Sin válvula especial de sincronización.

Válvula PRINCE D300: Válvula divisora de flujo (50/50) con compensación de presión unidireccional.

Válvula DFL 25/40: Válvula divisora/combinadora de flujo más avanzada, con capacidad bidireccional y compensación de presión (Oleodinamica Marchesini, s.f.).

Para medir y registrar las variables clave, se emplearon:

Calibradores Vernier marca Inzize de 200 mm, para mediciones precisas del desplazamiento de los cilindros.

Manómetros calibrados para el control y registro de la presión del sistema.

Medidor de flujo para verificar el caudal de la bomba. Los datos de las pruebas se recopilaron manualmente mediante el registro directo de las mediciones y observaciones.

El procedimiento se estandarizó y aplicó idénticamente para cada una de las tres configuraciones de válvulas, abarcando:

Instalación: Montaje de la válvula correspondiente.

Pruebas sin Carga: Movimiento libre de los cilindros con flujo constante y baja presión; se registró el comportamiento de sincronización.

Pruebas con Carga Real: Doblado de una plancha de metal de 6 mm de espesor, con la presión del sistema alcanzando 2500 psi.

Registro de Ciclos: Se registraron tres ciclos completos de movimiento de los cilindros en ambas condiciones (sin carga y con carga) para asegurar la representatividad.

Los datos recopilados fueron procesados y analizados estadísticamente. Se organizó la información, se calcularon promedios y se determinó la variabilidad (ej., desviación estándar) de las diferencias de movimiento entre los cilindros.

Los resultados de sincronización de cada configuración de válvula se compararon utilizando métodos estadísticos para determinar la que ofrecía el mejor rendimiento en términos de precisión y eficiencia.

Los resultados de las tres pruebas experimentales se resumen en la tabla 2.

Tabla 2. Comparación de resultados experimentales en distintas configuraciones de regulación de caudal.

Aspecto evaluado	Sin válvula (sistema base)	Válvula PRINCE D300 (Divisora 50/50, unidireccional)	Válvula DFL 25/40 (Divisora/Combinadora, bidireccional)
Condición de carga	Sin carga (vacío)	Sin carga (vacío)	Sin carga (vacío)
Observación de sincronización	Desincronización notable en bajada y subida	Sincronía solo en bajada	Sincronía en subida y bajada
Presión operativa	0–2500 psi	0–2500 psi	0–2500 psi
Comportamiento con carga	Desincronización notable	Desincronización observada	No se notó compensación; desincronía con carga
Conclusión / hallazgo clave	No permite sincronía de cilindros	Sincronía unidireccional	Rango de caudal inadecuado

	insuficiente bajo carga	(requerido 25 L/min)
Elaboración propia		

Para una visualización más inmediata y una comparación cuantitativa de los desfases, se presenta la Tabla 3 con los valores medidos en milímetros para cada una de las configuraciones y condiciones de carga.

Tabla 3. Desfase de Sincronización en las Configuraciones Evaluadas.

Configuración del sistema	Condición de carga	Desfase promedio (mm)
Sistema base	Sin carga y con carga	20 mm
Válvula Prince D300	Sin carga (bajada)	2 mm
Válvula Prince D300	Sin carga (subida) y con carga	20 mm
Válvula DFL 25/40	Sin carga	1 mm
Válvula DFL 25/40	Con carga	5 mm

Elaboración Propia.

Análisis de las Pruebas

Los resultados obtenidos demuestran claramente el impacto de la ausencia y la incorporación de válvulas divisoras de caudal en la sincronización de cilindros hidráulicos en paralelo, evidenciado por las marcadas diferencias en el comportamiento observado entre las configuraciones evaluadas (ver Tabla 2). La Configuración Base, sin ninguna válvula especial, mostró una desincronización notable tanto en la bajada como en la subida de los cilindros, lo que confirma su ineficacia para lograr la sincronía. Por su parte, la inclusión de la válvula PRINCE D300 mejoró parcialmente el control, logrando sincronía únicamente en la bajada y fallando en la subida, lo que resalta la limitación de su diseño unidireccional. Finalmente, la válvula DFL 25/40, a pesar de su capacidad bidireccional, solo consiguió una sincronía efectiva en vacío, mientras que bajo carga se observó una desincronía debido a que el caudal del sistema (12 L/min) era inferior al mínimo requerido por la válvula (25 L/min para una operación compensada, según sus especificaciones). Estas observaciones cualitativas, respaldadas por las presiones operativas uniformes en todas las pruebas (0–2500 psi), subrayan la importancia

crítica de la selección adecuada de válvulas divisorias de caudal y la compatibilidad con el caudal del sistema para asegurar un funcionamiento sincrónico eficaz.

3.1 Configuración 1: Sistema sin Válvulas Reguladoras (Control Base)

En la configuración inicial, donde no se integró ningún dispositivo externo de regulación de caudal, se evaluó un sistema de control base. Esta configuración es fundamental y se considera el punto de referencia inicial en cualquier análisis de sincronización hidráulica, ya que representa el comportamiento intrínseco del sistema sin intervenciones controladas (Merritt, 1967; Esposito, 2018).

La plegadora exhibió una desincronización marcada y constante en el movimiento de sus dos cilindros hidráulicos.

Este fenómeno fue evidente tanto en las pruebas realizadas sin carga (operación en vacío) como en aquellas donde se aplicaba una carga real al doblar una plancha de metal de 6 mm, con presiones operativas que alcanzaron los 2500 psi.

Observaciones de Desincronización y Cuantificación: Durante los ciclos de prueba, se observó claramente que un cilindro se movía perceptiblemente más rápido que el otro, lo que resultaba en un movimiento irregular y una inclinación visible del cabezal de la plegadora. Esta falta de coordinación era evidente a simple vista. Específicamente, en condiciones de vacío (sin carga), se midió un desfase promedio de 20 mm entre los cilindros. Este valor se mantuvo constante a lo largo de las fases de bajada y subida, lo que indicó una falta total de coordinación en el desplazamiento, afectando ambos sentidos de movimiento de igual manera.

Al introducir la carga de trabajo (el doblado de una plancha de metal de 6 mm), la descompensación entre los cilindros persistió y se mantuvo similar, fluctuando entre 18 y 20mm. A pesar de la aplicación de una carga significativa, el patrón de desincronización base no se alteró sustancialmente, lo que demostró la incapacidad

del sistema para compensar variaciones de resistencia. Es importante destacar que, a diferencia de lo que podría esperarse en algunos fallos mecánicos, no se observó sonido ni vibración inusual asociada directamente a este desfase o al desgaste diferencial en los sellos.

Análisis del Fenómeno: El "Efecto Camino Fácil" por Desgaste de Sellos: La causa principal de esta desincronización radica en el principio de "camino de menor resistencia" del fluido hidráulico. En ausencia de mecanismos de regulación de caudal, cualquier diferencia, por mínima que sea, en la resistencia mecánica interna de cada cilindro provoca que el caudal de aceite se dirija preferentemente hacia el actuador que ofrece la menor oposición. En este caso específico, la principal fuente de esta diferencia de resistencia se atribuye al desgaste en los poli-pack o sellos de los cilindros. Un mayor desgaste en los sellos de un cilindro permite un paso de fluido ligeramente más libre o una menor fricción interna. Esto, a su vez, genera una diferencia de presión en las líneas de suministro de aceite a los cilindros, lo que resulta en que el cilindro con los sellos más desgastados (y, por ende, de menor resistencia) avance más rápido que su compañero. Este "efecto camino fácil" es un fenómeno bien documentado y una causa común de la falta de sincronía en sistemas hidráulicos paralelos (Gómez et al., 2007).

Implicaciones Operativas: Impacto en la Precisión y Eficiencia: La descompensación observada tuvo un impacto directo y negativo en la calidad del proceso de plegado. Al intentar doblar una plancha, se evidenció que un lado de la pieza se doblaba más que el otro, lo que generaba deformaciones notables y una falta de uniformidad crítica a lo largo de la línea de pliegue. Dado que esta falla surgía de manera errática y sin control, se convirtió en un problema imprevisto que repercutía significativamente en la operación. Las consecuencias directas incluían:

Baja calidad del producto final: Comprometiendo la precisión requerida en el plegado de chapas y la integridad estructural de las piezas.

Pérdidas de tiempo y costes: Al generar la necesidad de retrabajos en los dobleces mal realizados o, en el peor de los escenarios, el descarte de material costoso.

Ineficiencia operativa: Los ciclos de producción se ralentizaban debido a la interrupción constante de la operación para realizar ajustes manuales o intentar corregir la desincronización.

Esta situación subraya la necesidad crítica e imperante de implementar dispositivos de control en sistemas paralelos como las plegadoras. La precisión es un requisito fundamental en el plegado de chapas, y cualquier desviación, como la observada en esta configuración base, compromete directamente la viabilidad técnica y la rentabilidad económica del proceso industrial.

3.2 Configuración 2: Válvula PRINCE D300 (Divisora de Caudal Unidireccional)

La segunda fase de las pruebas involucró la integración de la válvula PRINCE D300, un componente diseñado para dividir el caudal hidráulico en una proporción de 50/50 y compensar las diferencias de presión. Esta válvula divisora de caudal unidireccional representa un tipo de control pasivo bien establecido en sistemas hidráulicos (Kumar et al., 2022; Li et al., 2023a). La instalación de esta válvula fue relativamente fácil, implicando la remoción de una conexión en 'T' que unía los dos cilindros a la línea principal de distribución de aceite y la subsiguiente colocación de la válvula en ese punto. La expectativa inicial era que esta válvula lograría la sincronización hidráulica de la máquina, dado que su ficha técnica (Prince Manufacturing Corporation, s.f.) la presenta como específica para problemas de desincronización, aunque sin enfatizar de forma explícita su limitación a un único sentido de flujo.

Desempeño en Bajada en Vacío: Sincronización Efectiva Durante la fase de bajada de los cilindros y bajo condiciones de operación en vacío (sin carga aplicada), la válvula PRINCE D300 demostró una mejora significativamente buena en la sincronización. Se notó una reducción drástica en el desfase entre los cilindros, alcanzando una

descompensación de tan solo 2 mm. Esta mejora fue sobresaliente en comparación con los 20 mm de desfase observados en la configuración sin válvula. El efecto visual fue inmediato y notable: la cortina de la plegadora descendía de manera perfectamente nivelada y con una suavidad considerable, evidenciando un trabajo de sincronización excelente en esta dirección específica.

El éxito en esta fase se debe directamente al principio de operación de la válvula PRINCE D300. Al ser una válvula divisora compensada por presión, su diseño permite que el caudal de aceite proveniente de la bomba se distribuya de forma equitativa (50/50) hacia ambos cilindros. La característica de "compensada por presión" es clave: si uno de los cilindros encuentra una mayor resistencia al movimiento (por ejemplo, debido a fricción interna o un ligero desalineamiento), la válvula es capaz de redirigir o asegurar un mayor caudal de aceite hacia ese cilindro. Esto asegura que ambos actuadores avancen a la misma velocidad, manteniendo la sincronización y la posición nivelada del cabezal de la plegadora durante el descenso.

Limitaciones: Desincronización en Subida y el Problema del Desfase Acumulado A pesar del excelente desempeño en la bajada, las limitaciones de la válvula PRINCE D300 se hicieron palpables en otras condiciones. Al iniciar la fase de subida (retorno), se observó una clara desincronización de los cilindros. La descompensación regresó a niveles alarmantes, alcanzando nuevamente los 20 mm de desfase, similar a la configuración sin ninguna válvula de control. Este comportamiento se explica por la naturaleza unidireccional de la válvula. En la dirección de retorno, la PRINCE D300 incorpora un "paso libre" para el aceite; esto significa que el fluido no es dividido ni compensado, sino que se le permite circular sin restricciones. Como resultado, los cilindros vuelven a depender de sus resistencias internas, permitiendo que el que ofrece menor oposición se adelante, tal como sucedía en la configuración base.

El problema más crítico y complejo surgió al observar el comportamiento continuo. Una vez

que los cilindros se descompensaban durante la subida (por ejemplo, el cilindro A subía 20 mm más que el cilindro B), esta desincronización se acumulaba y se mantenía para el siguiente ciclo. Es decir, al volver a bajar, y aunque la válvula PRINCE D300 sí lograba que ambos cilindros se desplazaran a la misma velocidad en su descenso (gracias a su función compensada en esa dirección), lo hacían partiendo de una posición inicial desfasada. Esto significaba que, aunque la "velocidad" de bajada era sincronizada, la "altura" o posición relativa entre ellos se mantenía descompensada, con un cilindro más arriba que el otro por el mismo margen de 20 mm. Este fenómeno se observó consistentemente tanto en condiciones de vacío como bajo carga real, afectando directamente la precisión de los plegados sucesivos.

Implicaciones Operativas: Incompatibilidad con la Operación de la Plegadora Este patrón de comportamiento revela que la válvula PRINCE D300, a pesar de su eficacia en un sentido de operación, no es la solución ideal para aplicaciones como las plegadoras industriales que demandan una sincronización precisa en ambos sentidos de movimiento y a lo largo de ciclos repetitivos. La dependencia de que los cilindros "lleguen a contraerse por completo para que se sincronicen" y solo entonces puedan extenderse de manera coordinada es una limitación severa. Las plegadoras rara vez operan con los cilindros totalmente extendidos o totalmente contraídos entre cada plegado, ya que se requieren movimientos intermedios y ajustes constantes.

Este resultado enfatiza la importancia crítica de seleccionar válvulas con capacidades de compensación bidireccional para maquinaria que requiere una sincronización constante y precisa en todas las fases de su ciclo de trabajo. La ficha técnica de la válvula, aunque promete sincronización, no especifica de forma prominente su limitación unidireccional, lo que destaca la necesidad de una lectura atenta y una comprensión profunda de las especificaciones de diseño versus los requisitos operativos reales de la aplicación.

3.3 Configuración 3: Válvula DFL 25/40 (Divisora/Combinadora Bidireccional)

La tercera fase de pruebas se centró en la válvula DFL 25/40, un componente hidráulico con un diseño más avanzado. Esta válvula, clasificada como divisora/combinadora bidireccional y compensada por presión, representa una forma avanzada de control pasivo en la sincronización hidráulica (Li et al., 2023a; Sun & Zhang, 2023). Su instalación fue relativamente sencilla, solo requirió el cambio de algunos acoples para integrarla correctamente en el sistema de la plegadora. Después de identificar las limitaciones de la válvula PRINCE D300 en el movimiento ascendente, se esperaba que la DFL 25/40, con su capacidad bidireccional, fuera la solución definitiva para lograr la sincronización total de la máquina, tanto en la bajada como en la subida, y bajo todas las condiciones de carga.

Desempeño en Vacío: Éxito Prometedor y Alta Precisión En condiciones de operación en vacío (sin carga aplicada), la válvula DFL 25/40 mostró un desempeño excelente en la sincronización. El movimiento de los cilindros era notablemente coordinado y fluido, tanto al descender como al ascender. Las mediciones confirmaron una reducción drástica del margen de desincronización a tan solo 1 mm de desfase promedio, tanto en la bajada como en la subida. Este resultado fue una mejora sustancial no solo frente a los 20 mm de la configuración base sin válvula, sino también superó el rendimiento de la válvula PRINCE D300. En este punto, el equipo de investigación consideró que el objetivo de sincronización en vacío se había logrado plenamente, observando cómo el cabezal de la plegadora se desplazaba de manera perfectamente nivelada.

El éxito de la DFL 25/40 en vacío se debe directamente a su diseño como válvula bidireccional y compensada por presión. Su cualidad bidireccional le permite dividir el caudal equitativamente durante la bajada y unificarlo (combinar el flujo de retorno) de manera igualitaria durante la subida, manteniendo el control en ambos sentidos del movimiento. Además, la característica de "compensada por

presión" es crucial: la válvula está diseñada para "absorber" o contrarrestar las pequeñas diferencias de presión que puedan surgir entre los dos cilindros, distribuyendo el caudal de manera equitativa. Esto se logra mediante mecanismos internos como muelles o carretes que se ajustan dinámicamente para abrir o cerrar orificios, asegurando que ambos cilindros se desplacen de forma coordinada a pesar de las variaciones menores de resistencia cuando no hay carga.

El Desafío Crítico: Desempeño bajo Carga y la Incompatibilidad de Caudal A pesar de su prometedor desempeño en vacío, la válvula DFL 25/40 presentó un resultado decepcionante al ser sometida a condiciones de carga real durante el plegado de planchas metálicas. La desincronización reapareció, aunque en menor medida que en la configuración base, con un desfase que ascendió a 5mm. Si bien este valor es significativamente menor que los 18-20 mm observados sin válvula, representó una pérdida considerable de la precisión lograda en vacío. Al doblar las planchas, se seguía notando que un lado del doblez estaba más pronunciado que el otro, lo que, aunque era mucho menor en comparación con los dobleces realizados sin ninguna válvula, comprometía la calidad final del producto. Este resultado inesperado y el hecho de que la válvula no funcionara como se esperaba bajo carga, llevó al equipo a una investigación más profunda para identificar la causa subyacente.

La investigación reveló que la causa principal de esta ineficacia bajo carga residía en una incompatibilidad crítica entre el caudal de la bomba del sistema y el rango de operación óptimo de la válvula DFL 25/40. Mientras que la bomba de la plegadora suministra un caudal de 12 L/min, las especificaciones del fabricante para la válvula DFL 25/40 (Oleodinamica Marchesini, s.f.) indican que su funcionamiento óptimo, y la garantía de sus propiedades compensadas, se encuentran en un rango de caudal de entrada de 25 a 40 L/min.

Las válvulas compensadas por presión tienen un rango de operación definido por el fabricante porque sus mecanismos internos (los muelles y carretes) dependen de un cierto flujo y presión

para activarse y modular el caudal correctamente. Cuando el caudal de entrada (12 L/min) cae muy por debajo de este umbral mínimo (25 L/min), los muelles o carretes internos no logran activarse o posicionarse adecuadamente y se quedan atascados o cerrados parcialmente. Esto provoca que la válvula no pueda compensar eficazmente las diferencias de presión ni distribuir el caudal equitativamente. El efecto más alarmante de esta condición de bajo caudal fue la presurización excesiva de la máquina, llegando a los 2500 psi incluso sin estar doblando material, es decir, solo al intentar levantar la cortina de la plegadora. Esta presurización indicaba un bloqueo interno que impedía el flujo normal, confirmando que la válvula no estaba operando dentro de sus parámetros esperados. El resultado práctico fue una división de flujo imprecisa y una consecuente pérdida de sincronización bajo carga, donde las demandas de fuerza y flujo son mayores, comportándose de manera errática. Investigaciones previas han demostrado que el rendimiento de división de flujo de estas válvulas es sensible a la variación del caudal de entrada, siendo menos precisas cuando operan fuera de sus condiciones óptimas o a caudales reducidos (Li et al., 2005).

4. Discusión

Los resultados de las pruebas experimentales confirman inequívocamente que la desincronización del flujo hidráulico en sistemas de cilindros paralelos, como el de la plegadora industrial evaluada, es un problema real y altamente significativo, tal como se evidenció en las marcadas diferencias de movimiento entre los cilindros bajo distintas configuraciones y condiciones de carga (ver Tabla 2 y pp. 7-9).

La ausencia de cualquier sistema de control resultó en un desfase promedio de hasta 20 mm entre los cilindros, lo que se traduce directamente en pérdidas económicas sustanciales. Estas pérdidas derivan no solo de la ineficiencia en la operatividad de la máquina y el tiempo de producción, sino también de la necesidad de reparar dobles defectuosos o, en el peor de los casos, de tener que descartar piezas completas, aumentando los costos de material y desperdicio.

Este escenario inicial subraya la imperiosa necesidad de implementar una solución efectiva para garantizar la precisión en el plegado.

La evaluación de las válvulas divisoras de caudal ofreció perspectivas valiosas sobre los factores críticos para lograr la sincronización. La válvula PRINCE D300, aunque es un componente de alta calidad y muy efectivo en su diseño, demostró las limitaciones de las soluciones unidireccionales en aplicaciones que demandan un control preciso en ambos sentidos de movimiento. Su capacidad para reducir el desfase a solo 2 mm en la bajada en vacío fue notable, evidenciando su eficiencia en el sentido para el que fue concebida. Sin embargo, su diseño de "paso libre" en el retorno y su incapacidad para manejar la carga de manera bidireccional resultaron en una desincronización persistente y, crucialmente, en un desfase acumulativo que comprometía la operación continua de la plegadora. Esto resalta que, si bien la PRINCE D300 sería una excelente opción para máquinas donde la sincronización solo se requiere en una dirección (como un elevador hidráulico de automóviles), no es apta para el ciclo de trabajo bidireccional y de precisión de una plegadora.

Por otro lado, la prueba con la válvula DFL 25/40 arrojó un hallazgo aún más relevante para el diseño y la implementación de sistemas hidráulicos. Esta válvula, con su capacidad divisora/combinadora bidireccional y compensación por presión, logró una sincronización casi perfecta en condiciones de vacío, reduciendo el desfase a un extraordinario 1 mm. Este resultado inicial sugería que se había encontrado la solución ideal para la sincronización. No obstante, el comportamiento decepcionante bajo carga, donde el desfase aumentó a 5 mm y se evidenciaron problemas de presurización y atascamientos internos, puso de manifiesto la importancia crítica del dimensionamiento adecuado.

Los resultados de la DFL 25/40 demuestran que, independientemente de las capacidades teóricas y avanzadas de un componente, su rendimiento real está intrínsecamente ligado a la compatibilidad con el caudal de la bomba del sistema. Específicamente, nuestras pruebas revelaron que

la bomba de la plegadora, con sus 12 L/min, no alcanzaba el caudal mínimo de operación de 25 L/min requerido por la válvula DFL 25/40 (ver Sección 3.3 de Resultados). Esta incompatibilidad impedía que los mecanismos internos de compensación de la válvula (muelles y carretes) funcionaran correctamente, anulando su capacidad de dividir el flujo y llevando el sistema a un estado de desincronización similar al de no tener control. Esto resalta un error común en la industria, a menudo por desconocimiento tanto de operadores como de vendedores, donde no se considera la interacción fundamental entre el caudal de la bomba y los rangos de operación de la válvula (Li et al., 2005).

En síntesis, los hallazgos de este estudio ofrecen una clara comparativa entre el comportamiento desincronizado de los cilindros hidráulicos previo a cualquier intervención y el potencial de mejora tras la implementación de soluciones de regulación de caudal. Antes de las propuestas, el sistema exhibía una desincronización persistente y significativa, impactando directamente la calidad del producto y la eficiencia operativa al generar deformaciones, retrabajos y ralentización de los ciclos. Sin embargo, los resultados demuestran que, si bien las soluciones unidireccionales ofrecen una mejora parcial en fases específicas, es la adecuada selección y el dimensionamiento compatible de válvulas divisorias/combinadoras bidireccionales lo que realmente permite alcanzar una sincronización precisa. Esto transforma un problema de rendimiento crónico en una operación potencialmente más estable y productiva, aunque subrayando la importancia crítica de la compatibilidad del caudal del sistema con las especificaciones de la válvula.

A partir de estos resultados, se abren varias líneas de acción para optimizar el rendimiento de la plegadora y servir como guía para futuras aplicaciones industriales. Una opción inmediata sería la sustitución de la bomba hidráulica por una de mayor caudal (superando los 25 L/min) para permitir que la válvula DFL 25/40 opere dentro de sus parámetros óptimos y se evalúe su máximo potencial. Otra alternativa, en el caso de que la sustitución de la bomba no sea viable, sería la

adopción de una válvula divisora/combinadora bidireccional de un rango de caudal más bajo y compatible con los 12 L/min del sistema actual. Finalmente, a largo plazo, la implementación de un sistema de control activo, que utiliza sensores y retroalimentación en tiempo real para corregir la posición de los cilindros de manera electrónica (en lugar de pasiva), podría ser una solución definitiva para alcanzar una precisión milimétrica, si las necesidades de producción lo justifican.

5. Conclusiones

La falta de regulación de caudal conduce a una desincronización persistente en sistemas hidráulicos de cilindros paralelos, resultando en diferencias de movimiento de hasta 20mm. Este problema es significativo, causando pérdidas económicas considerables y evidenciando la necesidad crítica de soluciones de control para una operación sincrónica.

Las válvulas unidireccionales son limitadas para aplicaciones que demandan control en ambos sentidos del movimiento. Aunque la válvula PRINCE D300, por su diseño divisorio unidireccional y compensado por presión (Prince Manufacturing Corporation, s.f.), redujo el desfase a 2 mm en bajada en vacío, su diseño de paso libre en el retorno y su incapacidad bajo carga provocaron desincronización y desfase acumulativo, haciéndola inadecuada para ciclos operativos complejos.

El rendimiento de las válvulas avanzadas depende críticamente de la compatibilidad con el caudal del sistema. La DFL 25/40, caracterizada por su capacidad divisora/combinadora bidireccional y compensada por presión (Oleodinamica Marchesini, s.f.), logró sincronización excepcional en vacío (1 mm), pero falló bajo carga debido a que el caudal de la bomba (12 L/min) era inferior al mínimo requerido (25 L/min). Esto subraya la importancia vital del dimensionamiento correcto de los componentes para asegurar la precisión deseada.

Como recomendación final y práctica para el sector industrial, la selección de una válvula

divisora/combinadora bidireccional compatible con el caudal real de la bomba es un factor decisivo para garantizar una sincronización precisa. Adquirir un componente de alta tecnología sin verificar su compatibilidad con el sistema existente es ineficaz y puede llevar a un rendimiento deficiente, anulando los beneficios teóricos de la solución.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al Magíster Marco Checa, Coordinador de Investigación del Instituto Superior Tecnológico 17 de Julio (IST17J), y al Ingeniero Romel Obando, Coordinador de la carrera de Tecnología Superior en Mecánica Industrial (TSMI), por su acompañamiento y seguimiento permanente, así como por su compromiso con la rigurosidad y calidad científica durante todo el desarrollo del artículo.

Referencias:

- Carreira, A. V., Reis, J. B., & Martins, C. A. (2023). *Application of multi-cylinder synchronous control for telescopic mechanism of an offshore crane*. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(5), 1010. <https://doi.org/10.3390/jmse11051010>
- Cengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2018). *Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones (4.a ed.)*. McGraw-Hill.
- Dinca, L., Iliescu, M., Ilie, D. S., Neacsu, M. D., Ciuperca, R., & Prundus, D. (2025). *Studies on the Thermal Behavior of an Electro-Hydrostatic Servo Actuator*. *Actuators*, 14(2), 48. <https://doi.org/10.3390/act14020048>
- Esposito, A. (2018). *Fluid Power with Applications (7th ed.)*. Pearson Education.
- García, J., Rios-Colque, L., Peña, A., & Rojas, L. (2025). *Condition Monitoring and Predictive Maintenance in Industrial Equipment: An NLP-Assisted Review of Signal Processing, Hybrid Models, and Implementation Challenges*. *Applied Sciences*, 15(10), 5465. <https://doi.org/10.3390/app15105465>
- Gómez R., V., Goytisolo E., R., & Cabello E., J. J. (2007). *Cálculo a la estabilidad del equilibrio en cilindros hidráulicos de simple etapa*. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 16(2), 78-84.
- International Organization for Standardization. (2009). *ISO/TS 16949:2009—Quality management systems—Particular requirements for the application of ISO 9001:2008 for automotive production and relevant service parts organizations*. iso.org
- International Organization for Standardization. (2015). *ISO 9001:2015—Quality management systems—Requirements*. iso.org.
- Jensen, S. (2024, 16 de diciembre). *Modernizing Hydraulic Systems Through New Technology Developments*. *Power & Motion. Endeavor Business Media*. Recuperado el 4 de julio de 2025, de <https://www.powermotiontech.com/hydraulics/hydraulic-valves/article/55248760/modernizing-hydraulic-systems-through-new-technology-developments>
- Kenett, R. S., Zonnenshain, A., & Swarz, R. S. (2020). *Systems engineering as a data-driven and evidence-based discipline*. *INCOSE International Symposium*, 30(1), 757-770. <https://doi.org/10.1002/j.2334-5837.2020.00753.x>
- Kumar, D., Mahato, A. C., Prakash, O., & Kumar, K. (2022). *Priority flow divider valve and its dynamic analysis using various hydraulic drive systems: a bond graph approach*. *Mechanical Sciences*, 13, 459-472. <https://doi.org/10.5194/ms-13-459-2022>
- Lewis, K. (2023). *How to Synchronize Hydraulic Cylinders: A Comprehensive Guide*. *Cylinders Inc*. <https://www.cylindersinc.com/blog/how-to-synchronize-hydraulic-cylinders-a-comprehensive-guide/>
- Li, R., Yuan, W., Ding, X., Xu, J., Sun, Q., & Zhang, Y. (2023a). *Review of research and development of hydraulic synchronous control system*. *Processes*, 11(4), 981. <https://doi.org/10.3390/pr11040981>

- Li, R., Zhang, Y., Feng, Z., Xu, J., Wu, X., Liu, M., Xia, Y., Sun, Q., & Yuan, W. (2023b). *Review of the progress of energy saving of hydraulic control systems. Processes, 11(12), 3304.* <https://doi.org/10.3390/pr11123304>
- Li, S. Y., Zhang, B. J., & Zhang, Y. B. (2005). *Experimental investigation on the flow dividing characteristics of two types of hydraulic flow dividers. International Journal of Fluid Power, 6(1), 17-23.*
- Li, Z., Wang, J., & Wang, Q. (2024). *Two-cylinder synchronous electro-hydraulic servo system and its control technology development. Recent Patents on Engineering, 18(7), 117-131.* <https://doi.org/10.2174/1872212118666230829161037>
- Li, H., Lyu, S., & Wu, P. (2023). *Synchronous Control of a Multi-Cylinder Hydraulic Press System. Processes, 11(1), 163.* <https://doi.org/10.3390/pr11010163>
- Lyu, S., Wang, Y., & Zhao, Z. (2021). *A novel synchronous control method for hydraulic cylinders in parallel. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 43(11), 540.* <https://doi.org/10.1007/s40430-021-03264-9>
- Lyu, L., Liang, X., y Guo, J. (2021). *Synchronization control of a dual-cylinder lifting gantry of segment erector in shield tunneling machine under unbalance loads. Machines, 9(8), 152.* <https://doi.org/10.3390/machines9080152>
- Manring, N. D., & Fales, R. S. (2019). *Hydraulic Control Systems (3rd ed.). Wiley.*
- Merritt, H. E. (1967). *Hydraulic Control Systems. Wiley.*
- Murrenhoff, H., Berlinger, M., & Scholz, T. (2022). *Energy efficiency in modern fluid power systems. En Proceedings of the 13th International Fluid Power Conference (IFK 2022) (págs. 23–35). Aachen, Alemania.* Obtenido de: https://www.fluidpower.rwth-aachen.de/fileadmin/user_upload/Publications/13th_IFK_Proceedings_2022/IFK_2022_Vol_2_Pages_23-35.pdf
- Novak, N., Trajkovski, A., Kalin, M., & Majdič, F. (2023). *Degradation of hydraulic system due to wear particles or medium test dust. Applied Sciences, 13(13), 7777.* <https://doi.org/10.3390/app13137777>
- Oleodinamica Marchesini. (s.f.). *V1025 – DFL 25 – 40 – Oleodinamica Marchesini [Ficha técnica].* Recuperado el 4 de julio de 2025, de <https://www.hydrabuy.com/hydraulic-valves/2-ways-flow-divider/v1025>
- Pedersen, J. F., Schlanbusch, R., Meyer, T. J. J., Caspers, L. W., & Shanbhag, V. V. (2021). *Acoustic emission-based condition monitoring and remaining useful life prediction of hydraulic cylinder rod seals. Sensors, 21(18), 6012.* <https://doi.org/10.3390/s21186012>
- Pingdom. (2023). *Average Cost of Downtime per Industry.* <https://www.pingdom.com/outages/average-cost-of-downtime-per-industry/>
- Prince Manufacturing Corporation. (s.f.). *Model RD-300 Proportional Divider Valve with Free Return Checks – 30 GPM.* Recuperado el 4 de julio de 2025, de <https://www.princehyd.com/Products/Hydraulic-Valves/Flow-Control/Model-RD300>
- Rankka, A., & Dell'Amico, A. (2024). *Procedure of developing more energy-efficient and electrified hydraulic systems for loader cranes. Frontiers in Mechanical Engineering, 10, Article 1494642.* <https://doi.org/10.3389/fmech.2024.1494642>
- Su, X., & Zheng, X. (2024). *Sliding mode control of electro-hydraulic servo system based on double observers. Mechanical Sciences, 15(1), 77–85.* <https://doi.org/10.5194/ms-15-77-2024>
- Sun, X., Deng, X., & Li, J. (2023). *Cross-coupled sliding mode synchronous control for a double lifting-point hydraulic hoist. Sensors, 23(23), 9387.* <https://doi.org/10.3390/s23023987>
- Sun, Y., & Zhang, L. (2023). *Review of the Progress of Energy Saving of Hydraulic Control Systems. Processes, 11(12), 3304.* <https://doi.org/10.3390/pr11123304>

Viersma, T. J. (1980). *Analysis, Synthesis and Design of Hydraulic Servosystems and Pipelines*. Elsevier.

Watton, J. (2007). *Fundamentals of Hydraulic Control Systems*. Wiley.

Woś, P., & Dindorf, R. (2022). *Synchronization of the movement for multi-cylinder electro-hydraulic servo driver*. *EPJ Web of Conferences*, 269, 01069.
<https://doi.org/10.1051/epjconf/202226901069>

Wu, G., & Zhang, Y. (2024). *Research on a synchronization control strategy for a large-scale hydraulic press system*. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 210, 111162.
<https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2023.111162>

Zhang, K., Yuan, Y., & Sun, H. (2024). *Multi-cylinder Leveling Control Systems Based on Dual-Valve Parallel Pressure Loops*. *Expert Systems with Applications*, 232, 120461.
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120461>

Zhu, Y., Wu, Q., Tang, S., & Khoo, B. C. (2023). *Intelligent Fault-Diagnosis Methods for Hydraulic Piston Pumps: A Review*. *Journal of Marine Science & Engineering*, 11(8), 1609.
<https://doi.org/10.3390/jmse11081609>



Felipe Santiago Torres Andrade, nacido el 8 de septiembre de 1991, es un ingeniero mecánico soltero, residente en Atuntaqui, Imbabura. Se graduó de la Universidad Politécnica Salesiana el 10 de mayo de 2018. Ha desempeñado roles como ingeniero en Diseño Innovación y Construcción (DIINCO) (2013-2015), técnico operador en Servicios Industriales (2013-2014), y diseñador de túneles hidroeléctricos para LOMBARDI S.A. (2016). Actualmente, es docente en SENESCYT-IST 17J desde noviembre de 2020. También ha recibido capacitación en diseño de estructuras metálicas, inteligencia artificial generativa y soldadura de alto nivel.

BIOGRAFÍAS



Jonathan Alexander Paucar Gavilanez es un Tecnólogo Superior en Metalmecánica con una destacada trayectoria de 15 años en la industria. Se ha especializado en la fabricación, montaje y mantenimiento de equipos industriales y estructuras metálicas. Su experiencia incluye el manejo de máquinas

herramienta convencionales, una sólida habilidad en procesos de soldadura (TIG, MIG, arco eléctrico), y la implementación de sistemas hidráulicos, neumáticos y eléctricos. A lo largo de su carrera, Jonathan ha liderado proyectos y desarrollado soluciones innovadoras para optimizar procesos, siempre con el objetivo de asegurar la fiabilidad operativa y contribuir al fortalecimiento del sector industrial.