

**Proyecto aplicado “diseño de banco de pruebas para calibrar válvulas principales y secundarias de las palas hidráulicas Komatsu PC-8000”**

Luis Andrés Ospino Cobo

William Fabián Bolaños Vásquez

Henry de Jesús Gómez Ruiz

Asesora

Luisa Fernanda León Carrascal

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería ECBTI

Ingeniería Industrial

2025

## Resumen

El proyecto tuvo como objetivo diseñar y construir un banco de calibración de válvulas hidráulicas para la pala Komatsu PC8000, con el fin de mejorar la precisión y seguridad en el mantenimiento de sistemas hidráulicos en la minería. La metodología se basó en un enfoque sistemático que incluyó la recopilación de requisitos técnicos, el diseño conceptual y detallado del banco, su construcción, pruebas operativas y la creación de un procedimiento de uso detallado para los técnicos. Los principales resultados incluyen la selección de materiales de alta resistencia, como acero inoxidable y aleaciones especiales, la integración de componentes hidráulicos de alta calidad y el desarrollo de un banco funcional que soporta presiones de hasta 10,000 psi. Durante las pruebas operativas, el banco demostró su capacidad para calibrar válvulas hidráulicas con precisión, y el sistema fue validado para operar dentro de los parámetros de presión y temperatura necesarios. Las conclusiones destacan que el banco de calibración cumple con los estándares de seguridad, es eficiente y fiable, y proporciona una herramienta clave para mejorar el mantenimiento de la maquinaria pesada en entornos mineros. Se recomienda la implementación de tecnologías de monitoreo remoto y la automatización del proceso de calibración para futuras mejoras.

***Palabras clave:*** calibración, hidráulica, minería, seguridad, válvulas.

## Abstract

The project aimed to design and build a hydraulic valve calibration bench for the Komatsu PC8000 shovel, with the goal of improving precision and safety in hydraulic system maintenance in mining. The methodology followed a systematic approach that included the collection of technical requirements, conceptual and detailed design of the bench, its construction, operational testing, and the development of a detailed operating procedure for technicians. The main results include the selection of high-resistance materials such as stainless steel and special alloys, the integration of high-quality hydraulic components, and the development of a functional bench capable of supporting pressures up to 10,000 psi. During operational tests, the bench demonstrated its ability to calibrate hydraulic valves accurately, and the system was validated to operate within the necessary pressure and temperature parameters. The conclusions emphasize that the calibration bench meets safety standards, is efficient and reliable, and provides a key tool to enhance maintenance of heavy machinery in mining environments. Future improvements include the implementation of remote monitoring technologies and the automation of the calibration process.

**Keywords:** calibration, hydraulic, mining, safety, valves.

## Tabla de Contenido

Introducción .....	7
Justificación .....	9
Objetivos .....	12
Planteamiento del Problema .....	13
Marco Conceptual .....	17
Marco Teórico .....	22
Metodología .....	35
Resultados .....	42
Conclusiones .....	65
Recomendaciones .....	69
Referencias Bibliográficas .....	74

**Lista de Tablas**

<b>Tabla 1.</b> <i>Comparación de Sistemas de Control Dinámico para Bancos de Pruebas</i> .....	25
<b>Tabla 2.</b> <i>Comparación de Tipos de Sensores de Presión</i> .....	30
<b>Tabla 3.</b> <i>Parámetros Técnicos Claves</i> .....	43
<b>Tabla 4.</b> <i>Disposición de los Componentes</i> .....	51
<b>Tabla 5.</b> <i>Procedimiento Uso de la Herramienta de Calibración de Válvulas Hidráulica</i> .....	59

## Lista de Figuras

<b>Figura 1.</b> <i>Principio de Pascal</i> .....	23
<b>Figura 2.</b> <i>Esquema del Banco de Calibración</i> .....	47
<b>Figura 3.</b> <i>Banco de Calibración y la Conexión de sus Componentes</i> .....	48
<b>Figura 4.</b> <i>Bombas Eléctricas Serie ZU</i> .....	52
<b>Figura 5.</b> <i>Dimensiones y Especificaciones Bombas Serie ZU</i> .....	52
<b>Figura 6.</b> <i>Bomba Hidráulica Instalada en el Prototipo</i> .....	53
<b>Figura 7.</b> <i>Componentes del Prototipo</i> .....	53
<b>Figura 8.</b> <i>Válvulas Utilizadas en el Modelo</i> .....	54
<b>Figura 9.</b> <i>Modelo Inicial Construido</i> .....	58
<b>Figura 10.</b> <i>Modelo Inicial Construido</i> .....	58

## Introducción

La seguridad en el trabajo constituye un desafío fundamental en la industria minera, especialmente cuando se trata de la operación y mantenimiento de maquinaria pesada equipada con sistemas hidráulicos de alta presión. En este contexto, las palas hidráulicas Komatsu PC8000 son equipos esenciales en la explotación minera a gran escala, pero también presentan riesgos considerables para el personal técnico encargado de la calibración y ajuste de sus componentes hidráulicos. Según la OIT (2019), aproximadamente el 30% de los accidentes industriales graves están relacionados con el uso inadecuado de sistemas hidráulicos de alta presión, lo que evidencia la urgente necesidad de implementar soluciones seguras y eficientes para proteger a los operadores y mejorar la operatividad de los equipos.

La calibración incorrecta de las válvulas hidráulicas no solo pone en riesgo la integridad del personal, sino que también puede provocar fallas en los sistemas y costosas interrupciones en las operaciones mineras. Un estudio del ICMM (2020); señala que las paradas no programadas debido a fallos hidráulicos pueden generar pérdidas anuales superiores a cinco millones de dólares por unidad de equipo, sin considerar los costos indirectos asociados con la inactividad y la reducción de la productividad. Por tanto, es indispensable desarrollar tecnologías y métodos que aseguren una calibración precisa y puedan minimizar tanto los riesgos laborales como los económicos en el sector minero.

En respuesta a esta problemática, el presente proyecto tiene como objetivo diseñar, construir y validar un banco de pruebas para la calibración segura y eficiente de las válvulas hidráulicas de las palas Komatsu PC8000 utilizadas en la mina Drummond Ltd. Este banco de pruebas permitirá realizar ajustes en las válvulas sin la necesidad de exponerse a presiones

hidráulicas peligrosas, incorporando además sistemas automatizados de monitoreo y control en tiempo real, lo que garantizará la integridad del proceso y la seguridad del personal (ISO, 2010).

La metodología aplicada combina un enfoque mixto, integrando análisis cualitativos para establecer los requisitos técnicos y de seguridad mediante entrevistas y revisión bibliográfica, con un enfoque cuantitativo para validar experimentalmente el prototipo bajo condiciones controladas. La implementación de esta metodología permitirá desarrollar un instrumento que no solo cumple con los estándares internacionales, sino que también responde a las necesidades específicas del entorno operativo donde será utilizado, garantizando así su funcionalidad y confiabilidad.

En conclusión, este proyecto aporta una solución tecnológica innovadora que contribuye significativamente a la seguridad laboral y la eficiencia operativa en la minería, al reducir los riesgos asociados con la calibración de válvulas hidráulicas y optimizar el mantenimiento preventivo. La implementación del banco de pruebas tendrá un impacto positivo en la productividad y la sostenibilidad económica de las operaciones mineras, alineándose con las mejores prácticas en seguridad industrial y mantenimiento de sistemas hidráulicos.

## Justificación

La seguridad laboral en la minería es un tema importante considerando los riesgos que vienen asociados con la modalidad de trabajo, en especial el manejo de sistemas hidráulicos de alta presión. Este proyecto tiene como objetivo prioritario evitar accidentes causados por la exposición directa del personal técnico a estos sistemas durante el ajuste y la calibración de las válvulas hidráulicas de las palas Komatsu PC8000. Las condiciones actuales de trabajo que requieren que los técnicos suban a las máquinas para ejecutar tales tareas incrementan de manera significativa el riesgo de sufrir accidentes laborales, tales como perforaciones por presión hidráulica o lesiones por derrames asociados a fallas en los sistemas hidráulicos, esto, de acuerdo a lo indicado en el Informe Anual de la OIT (2019), el cual expone que el 30% del total de accidentes en los sectores industriales se debe a un uso inadecuado de sistemas hidráulicos a alta presión. Esto evidencia la necesidad de tomar acciones sobre esta problemática y brindar alguna instrumentación que resguarde al personal expuesto.

Aparte de los riesgos de salud y seguridad para los trabajadores, la calibración inadecuada de las válvulas hidráulicas puede llevar a mal funcionamiento en las presiones de trabajo, lo que deteriora directamente el rendimiento del sistema hidráulico y la vida útil del equipo. El CIMM (2020) documenta que las fallas en los componentes hidráulicos, como válvulas desajustes, pueden llevar a paradas no planificadas de las máquinas, lo que es perjudicial no solo para la productividad, sino que también conduce a un aumento de los costos operativos. Según su informe, las minas que sufren de tales fallas operativas tienen una pérdida anual promedio de más de 5 millones de dólares por excavadora hidráulica fuera de servicio debido a fallas en los sistemas hidráulicos. Esto enfatiza la necesidad de mantener los

componentes en un estado bien mantenido que, a su vez, mejore la eficiencia operativa y extienda la vida útil del equipo.

El desarrollo de un banco de pruebas para válvulas hidráulicas puede contribuir significativamente a la seguridad de los técnicos de mantenimiento y al rendimiento de estos equipos. La automatización del proceso de calibración de las válvulas permitiría eliminar toda intervención manual de los técnicos en el sistema hidráulico de alta presión, lo que reduciría su riesgo de accidentes. La construcción de un banco de pruebas es, además de un sistema de seguridad, una mejora estratégica que aumenta la confiabilidad operativa de las palas hidráulicas Komatsu PC8000. De acuerdo con un estudio del MTJ (2020), las operaciones que cuentan con sistemas automatizados de calibración mejoran en un 20% la eficiencia del mantenimiento y los gastos por paradas no programadas, que, a su vez, genera un importante ahorro para las compañías mineras.

La justificación para este proyecto también descansa en la ventaja económica que se logrará al reducir los costos causados por fallas en los sistemas hidráulicos. El ajuste de las válvulas hidráulicas es una operación fundamental para garantizar que las láminas funcionen dentro de las zonas de superposición de manera eficiente y sin contratiempos. Sin embargo, cuando estas válvulas no están correctamente calibradas, pueden ocurrir daños hidráulicos que son costosos de reparar y las paradas asociadas, que son inmensamente improductivas. En este sentido, la inversión en un banco de pruebas no solo resguardaría la integridad de los empleados, sino que también mejoraría su productividad. El IJOSE (2020), indicó que las mejoras en los sistemas de calibración de válvulas tienen el potencial de reducir los costos de mantenimiento entre un 15% y un 20%, una cifra sustancial para las empresas mineras.

El banco de pruebas diseñado no solo minimizaría el riesgo de accidentes, sino que también proporcionaría una plataforma efectiva y precisa para el ajuste y la calibración de válvulas, extendiendo la vida operativa de los componentes hidráulicos. Al minimizar las fallas de confiabilidad y el tiempo de inactividad no programado, las empresas mineras operarán de manera más eficiente con costos operativos reducidos. Un informe de la OMS (2018) sobre accidentes laborales en el sector minero advierte que los incidentes graves pueden generar pérdidas superiores a los 10 millones de dólares, considerando gastos médicos, compensaciones y disminución de la producción. Este dato pone de relieve la importancia de la prevención de accidentes como un factor económico estratégico, lo cual sustenta la pertinencia de este proyecto.

Al final, la implementación de un banco de pruebas para la calibración de válvulas no solo sería ventajosa desde una perspectiva de seguridad y costo, sino que también ayudaría ampliada a la eficiencia operativa de la mina. Al cumplir con los requisitos del fabricante, las válvulas se instalarán con precisión, lo que garantizará que el sistema hidráulico funcione de manera óptima sin enfrentar problemas de presión que puedan llevar a fallos en el equipo. Según MTJ (2020) “esto conducirá a un aumento de la productividad del 15% debido a la reducción del tiempo de inactividad y del tiempo de reparación” (p.4)

En este sentido, este proyecto aborda la necesidad de garantizar la seguridad de los técnicos que manejan hidráulicos a alta presión, así como también sirve como un enfoque económico para mejorar la eficiencia de las palas Komatsu PC8000. La implementación de un banco de pruebas aumentaría la confiabilidad y extendería la vida operativa del equipo, al tiempo que reduciría el costo de fallos catastróficos hidráulicos y los accidentes laborales resultantes.

## **Objetivos**

### **Objetivo General**

Diseñar un banco de pruebas para el ajuste de presiones de las válvulas hidráulicas, destinado a mejorar el funcionamiento del sistema en las palas PC8000 de manera segura y eficiente en la mina Drummond Ltd.

### **Objetivos Específicos**

Establecer los requerimientos técnicos para el diseño de un banco de calibración de válvulas hidráulicas de la pala Komatsu PC8000.

Implementar un plan de pruebas para medir el nivel de seguridad, funcionamiento y efectividad del prototipo diseñado.

Desarrollar un procedimiento de uso para que los técnicos utilicen el banco de pruebas de manera eficiente y segura.

## Planteamiento del Problema

La seguridad en el trabajo en la industria minera es un reto actual para la mayoría de las empresas y se complica a niveles superiores cuando hay que incorporar equipos y sistemas de trabajo con gran maquinaria y elementos hidráulicos. En particular, las excavadoras de pala hidráulica de Komatsu PC8000, que son de suma importancia para la operación de minas de gran escala, requieren especial atención en el mantenimiento de su sistema hidráulico, lo que incluye también las válvulas. El mantenimiento que debe hacerse a estas válvulas hidráulicas presenta riesgos para los técnicos debido a las grandes presiones a las que están sometidas, lo que aumenta significativamente la posibilidad de accidentes laborales. La presión hidráulica, en caso de no ser convenientemente manipulada, puede ocasionar graves accidentes como lo es perforación de piel o daño a partes blandas, tal y como ha sido relacionado en distintos casos dentro de unidades de negocio similares (Vega, 2009).

Un informe de la OIT (2019), enfatiza el riesgo de exposición a sistemas hidráulicos de alta presión como una de las causas primarias de lesiones graves en el sector industrial. Este tipo de accidente ocurre particularmente en la minería, donde las condiciones laborales son difíciles y operar maquinaria hidráulica es parte de la rutina diaria. De hecho, las estadísticas muestran que los accidentes industriales que involucran sistemas hidráulicos representan aproximadamente el 30% de todas las lesiones graves en la industria. En el caso de las palas hidráulicas Komatsu PC8000, la calibración de las válvulas empleadas a veces implica procedimientos manuales que, colocan a los técnicos en estos riesgos, poniendo en peligro tanto al personal como al equipo.

Un ajuste erróneo o inadecuado de estas válvulas, además de plantear peligros potenciales a la salud y seguridad operativa de los trabajadores, puede acarrear fallas en los componentes del sistema o provocar costosas paradas no planificadas. La disminución de la

rentabilidad de las minas debido a estos errores es costosísima. Según el ICMM (2020), las paradas no programadas en las máquinas de minería frecuentemente superan los 5 millones de dólares anuales por cada unidad de equipo afectada, además de los gastos indirectos asociados a la inactividad y pérdida de producción.

El sistema hidráulico de las palas Komatsu PC8000 es un componente que, para mantener su eficiencia operativa, debe funcionar correctamente y en óptimas condiciones, esto es extremadamente crucial para el funcionamiento del equipo y la reducción del desgaste por fricción de los componentes, un enfoque de amplia calibración tiene que evitar sobrepresiones, deficiencias y lograr mantener el sistema dentro de sus óptimos parámetros funcionales. El ajuste manual de las válvulas, sin embargo, tiene dos grandes falencias dentro de su ejecución: la primera es que los operadores quedan en contacto directo con las presiones altas, mientras que la otra es que no existe un criterio de medición que garantice que los límites de la fabricación son efectivamente cumplidos.

Dado este contexto, la pregunta central que impulsa este proyecto es: ¿Cómo diseñar un banco de pruebas que permita calibrar con precisión y seguridad las válvulas hidráulicas de las palas Komatsu PC8000, minimizando los riesgos operativos y mejorando la eficiencia del mantenimiento en minería? Este enfoque amplía el alcance del problema a resolver para implementar una solución de seguridad y un entorno de trabajo sostenible con la alta eficiencia y larga vida útil del equipo, lo que podría reducir los costos operativos de las operaciones mineras.

El diseño de un banco de pruebas especializado permitirá que los técnicos realicen ajustes de válvula sin tener que acceder básicamente al sistema hidráulico, y por fin eliminando cualquier riesgo a presiones potencialmente peligrosas. Además, el banco de pruebas con accesorios modernos de medición de alta tecnología tales como sensores de presión en tiempo

real o sistemas automáticos de control de supervisión, asegurará que no se sobreprese o se sobreequilibre las válvulas, las cuales serán ajustadas a los parámetros brindados. Esta implementación permitirá que el calibrado y la configuración de las válvulas se realicen en un tiempo óptimo comenzando a disminuir la inseguridad brindada al sistema por intervención humana.

Por otro lado, la creación de un banco de pruebas también contribuye a optimizar los gastos operativos que surgen por falla en el sistema hidráulico al ahorrar costos operativos. Un estudio del MTJ (2020), argumenta que estas operaciones mineras que poseen sistemas automatizados de calibración sufren una caída en la economía de mantenimientos y reparaciones de equipos del 20%. Esto no sólo se debe a la caída de fallos, sino también al aumento en la eficiencia operativa, ya que el tiempo usado en ajustes y calibraciones sistemáticas debe ser optimizado.

El no abordar este problema puede resultar en impactos severos en cuanto a la seguridad del personal y la continuidad operativa de las minas. En cuanto a las limitaciones de seguridad, la exposición continua a altas presiones hidráulicas probablemente aumente lesiones más severas, como ha sido el caso en otros contextos industriales. Además, la ausencia de un sistema de calibración eficiente es probable que lleve a un aumento en las fallas de los componentes hidráulicos que, a largo plazo, incrementaría los costos operativos, reduciría la vida útil del equipo y afectaría adversamente la productividad general de la mina.

Según un informe de la OMS (2018), aquellas industrias que carecen de la implementación de sistemas de seguridad enfrentan costos mucho más altos debido a accidentes laborales, para el caso de las minas, la OMS indica que estos costos pueden superar los 10

millones de dólares anuales por accidente al considerar los gastos médicos, compensaciones y los costos asociados con el tiempo de inactividad del equipo.

Como resultado, es necesario diseñar un banco de pruebas que permita la calibración segura y eficiente de las válvulas hidráulicas de las palas Komatsu PC8000, disminuyendo los riesgos de alta presión de los técnicos y mejorando la confiabilidad operativa del sistema hidráulico. Esto evitará no solo el riesgo al personal sino también la interrupción de operaciones y el incremento de gastos por mantenimiento preventivo, reparativo y los equipos a la par. Este proyecto no solo resuelve un problema prioritario en la seguridad, sino que además cambia el enfoque a la planificación como una decisión en las operaciones mineras.

## **Marco Conceptual**

El marco conceptual es importante para la comprensión de los términos y conceptos básicos que fundamentan el diseño y funcionamiento de un banco de pruebas hidráulicas. En este caso, el banco de pruebas es para verificar la calibración segura y confiable de los sistemas hidráulicos de las palas Komatsu PC8000. Este banco debe resolver adecuadamente los problemas de seguridad y eficiencia con relación a los sistemas hidráulicos de alta presión.

### **Sistemas Hidráulicos**

Un sistema hidráulico es un conjunto de componentes que utilizan fluidos a presión para el transporte y control de energía. Estos sistemas son relevantes para la maquinaria pesada, ya que permiten el movimiento de grandes cargas, elevación de materiales, y el control de movimientos de precisión a través de cilindros hidráulicos. Según Hibbeler (2015), un sistema hidráulico tiene dentro de sus componentes, bombas, válvulas, mangueras, cilindros y un fluido hidráulico. Los cuales se conjugan para transmitir potencia al ejercer presión sobre un fluido en conductos cerrados.

La lógica detrás de los principios primarios de los sistemas hidráulicos se enseña en el estudio de la mecánica de fluidos, centrándose en la ley de Pascal, que establece que cualquier presión ejercida sobre un fluido contenido se transmite uniformemente a través del fluido. Este principio es de suma importancia al diseño y operación de sistemas hidráulicos porque asegura que la presión aplicada a un fluido se transmite hidráulicamente a lo largo del dispositivo, realizando así trabajo mecánico.

Mantener la eficiencia deseada de los sistemas hidráulicos requiere un control preciso de la presión y el flujo del fluido. A este respecto, las válvulas hidráulicas son muy importantes, ya

que controlan la cantidad de fluido que pasa a través del sistema, afectando así el rendimiento y la confiabilidad del sistema.

### **Válvulas Hidráulicas**

Las válvulas hidráulicas son dispositivos que regulan el movimiento, la concentración y el metabolismo de un fluido en un sistema hidráulico. Existen diferentes tipos de válvulas como válvulas de flujo, válvulas de dirección y válvulas de presión. Según Juvinal & Marshek (2017), todos los tipos de válvulas tienen una función específica dentro del sistema, como controlar el funcionamiento del medidor de flujo de fluido o controlar la dirección en que el fluido entra.

Una de las tareas más críticas en el control de las válvulas es la calibración. Estas operaciones requieren configurar la presión, así como evitar que el sistema hidráulico de mangueras, cilindro y otras partes se dañen por fugas que superen los límites peligrosos. Además, las válvulas hidráulicas requieren precisión en los ajustes dentro de los límites de presión que define el fabricante. Para esto, deben usarse bancos de pruebas hidráulicas. También, la norma ISO 4413:2010 define los requisitos en el diseño y operación de sistemas hidráulicos de potencia, como calibrar y hacer pruebas sobre los niveles de presión de las válvulas (ISO, 2010).

Una calibración adecuada no solo permite el trabajo eficiente del sistema, sino también la seguridad de los operadores, así como la prevención del desgaste innecesario de los componentes del sistema hidráulico.

### **Bancos de Pruebas Hidráulicas**

Los bancos de pruebas hidráulicas son considerados como los dispositivos más recomendados para evaluar la efectividad y seguridad de los componentes hidráulicos, tales como válvulas, bombas y mangueras. De acuerdo con las palabras de Shigley & Mischke (2008), un banco de pruebas debería ser capaz de simular las condiciones reales de operación del

sistema, además de que se indicó que existe una presión elevada al respecto, y que existe el control del flujo del fluido y la simulación precisa.

Para asegurar la seguridad durante la fase de pruebas, los bancos de pruebas deben estar equipados con automatización completa y control remoto. Bolton (2015) afirma que la automatización permite realizar una prueba sin que el operador participe básicamente de ninguna manera, mitigando así en gran medida las posibilidades de un accidente debido a la presencia de fluidos a alta presión; Además de eso, los sistemas de monitoreo en tiempo real identifican los sensores y miden la tasa de flujo, lo que ayuda en la identificación temprana de problemas graves que permiten acciones evitables a tiempo.

De acuerdo con lo anterior, Bolton (2015) señaló que los sistemas de monitoreo y control en tiempo real son esenciales para detectar anomalías como vibraciones excesivas y cambios en los procesos de dinámica de fluidos antes de que se conviertan en desastrosos.

### **Regulaciones de Seguridad de Sistemas Hidráulicos**

Los estándares de seguridad son cruciales para asegurar que los sistemas hidráulicos funcionen dentro de los límites de seguridad controlados por estándares internacionales, como es el caso de la ISO 4413:2010, que define medidas de seguridad para el diseño de sistemas hidráulicos a nivel de componentes, como válvulas y mangueras, así como sus verificaciones operativas seguras, en relación con los procedimientos de prueba. Esto también abarca la presión máxima permitida, el rango especificado de pruebas de presión y de protección para mitigar posibles fallas catastróficas en sistemas hidráulicos que puedan poner en peligro a los operadores y al equipo.

Los estándares también regulan la existencia de elementos de protección para sistemas hidráulicos, como válvulas de aliviadero de presión que se encargan de la eliminación de energía

de un sistema. Tales son mecanismos vitales para la prevención de consecuencias desastrosas como resultado de la acumulación excesiva de presión.

### **Sensores y Monitoreo en Tiempo Real**

Un monitoreo en tiempo real es necesario para el funcionamiento seguro y eficaz del banco de pruebas hidráulicas. Fitzgerald (2016) menciona que al utilizar sensores de presión y medidores de temperatura se obtiene la información relevante del sistema en tiempo real, por lo que posibles inconvenientes pueden ser atendidos de forma proactiva. La implementación de monitoreos continúa no solo incrementa el nivel de seguridad, sino que también optimiza el rendimiento al permitir variantes instantáneas basadas en la información recopilada durante las pruebas.

### **Automatización y Control Remoto**

La reducción de la intervención humana en la prueba hidráulica se logra mediante la automatización, mejorando la precisión de estas. De acuerdo con Shigley & Mischke (2008), la inclusión de controles remotos en bancos de pruebas permite que los técnicos conduzcan las pruebas sin sufrir a los peligros de las altas presiones del sistema. Además, la automatización contribuye al aumento de la repetibilidad de las pruebas, garantizando que todas las pruebas realizadas en un componente se hagan en las mismas condiciones, lo que resulta en una mayor precisión de los resultados obtenidos.

### **Desgaste y Fallas en Componentes Hidráulicos**

El desgaste de componentes hidráulicos es un problema generalizado en sistemas de alta presión. Como sugiere Harris (2017), el desgaste por convección y de válvulas puede ocurrir como resultado de la exposición continua a altas presiones, lo que conduce a una reducción de la eficiencia del sistema y un aumento del riesgo de fallas. El ajuste correcto de las válvulas es

importante para evitar estos problemas, ya que la falta de control sobre la presión del sistema puede llevar a daños severos dentro de los componentes y en el sistema en su conjunto.

## **Marco Teórico**

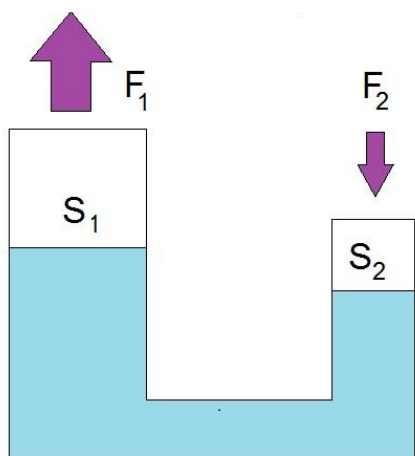
El marco teórico incorpora la base que sirve de guía para realizar el diseño del banco de pruebas hidráulicas, que se contempla en este proyecto. Esto comprende las bases de los sistemas hidráulicos, las propiedades de fluidos, los principios relativos al control de presión, monitoreo en tiempo real, automatización, y las normas de seguridad que se aplican en la implementación y el funcionamiento de los sistemas en cuestión.

### **Principios de la Hidráulica**

Un sistema hidráulico se define como un medio de transmisión de energía a través de un fluido a presión en un circuito cerrado. Este fluido, que se emplea en circuitos integrados está presente en un número de componentes tales como puertos, válvulas, cilindros e incluso mangueras, que operan de manera conjunta para realizar trabajo mecánico (Cengel, 2006). Cabe recordar que, el uso de sistemas hidráulicos en la industria, y en equipos pesados como las palas Komatsu PC8000, es amplio y abarca la excavación, el levantamiento de cargas, el movimiento y el desplazamiento de materiales pesados.

### **Ley de Pascal**

Uno de los principios más importantes en los sistemas hidráulicos es el de Pascal, que establece que cualquier presión ejercida sobre un líquido en un espacio cerrado se transmite sin disminución a cada parte del líquido (Hibbeler, 2015). Este principio garantiza que la presión ejercida sobre el fluido se distribuya uniformemente a lo largo del sistema, lo que lleva a la utilización efectiva de la energía. Para los sistemas hidráulicos, esto significa que una pequeña fuerza aplicada en un área creará una gran fuerza en otra parte del sistema. Esto es fundamental para realizar trabajo mecánico a gran escala con poco aporte de energía. (ver figura 1).

**Figura 1.***Principio de Pascal*

*Nota.* Esquema grafico del principio de pascal. *Fuente.* Autoría propia

### **Fluido Dinámico**

En la mecánica de fluidos en hidráulica se consideran otros conceptos como el flujo laminar y el flujo turbulento que guardan relación con el movimiento del fluido en los conductos. El flujo laminar ocurre cuando el líquido se mueve en capas paralelas, el flujo turbulento en cambio se caracteriza por movimientos irregulares y caóticos. Los ingenieros deben tener en cuenta estos fenómenos al diseñar los sistemas hidráulicos a fin de lograr que los fluidos circulen de manera óptima y sin producir fricción excesiva que desperdicie energía y eficiencia del sistema.

La energía potencial y cinética de un fluido, también se analizan en este caso. Según la ecuación de Bernoulli, la suma de la energía de presión, energía cinética y energía potencial que un fluido posee permanece constante, es decir, cualquier cambio en una de estas energías debe afectar a las otras. Esta fórmula sirve para anticipar el comportamiento del fluido en un sistema hidráulico.

## **Fallos en Componentes Hidráulicos**

Los fallos en los componentes hidráulicos pueden atribuirse a muchos problemas, como desajustes de presión, desgaste de los materiales y corrosión de las superficies metálicas expuestas al fluido. Juvinal & Marshek (2017) señalan que el desgaste en componentes como válvulas y mangueras se encuentra entre las principales causas de fallos en sistemas hidráulicos. Dicho desgaste se produce debido al flujo del fluido al entrar en contacto con la superficie interna de las mangueras y válvulas, disminuyendo así la efectividad del sistema y aumentando las posibilidades de fugas o fallos catastróficos.

### **Desajustes de Presión**

El sistema puede enfrentar sobrepresiones, lo que a su vez lleva a que los componentes estén sobrecargados de estrés cuando las válvulas hidráulicas no están bien calibradas, o hay cambios imprevistos en la carga del sistema. Según Harris (2017), un sistema hidráulico bien diseñado debería tener la capacidad de gestionar presiones que varían continuamente dentro de límites y márgenes establecidos incluso en condiciones de sobrepresión. Una válvula de control de presión puede proporcionar una respuesta inadecuada, lo que lleva a fallos en las partes aguas abajo del sistema, incluyendo bombas y mangueras.

Las fugas de fluido son otro tipo de falla frecuente. Este tipo de problemas aparecen por el desgaste que se produce sobre los empaques o sobre los conectores de mangueras y válvulas que permiten la salida del fluido. No solo disminuye la efectividad del sistema, también representa un problema de contaminación ambiental y de seguridad, debido a que el fluido hidráulico muchas veces resulta ser tóxico o inflamable.

### **Monitoreo Remoto y Automatización en Bancos de Pruebas**

Los dispositivos de elevación y el Control Remoto han demostrado ser vitales para llevar a cabo pruebas de sistemas de potencia hidráulica con la precisión, seguridad y eficiencia necesarias. Estos componentes permiten que las operaciones se realicen sin que los operadores estén prácticamente presentes, lo que reduce el riesgo asociado con la exposición a alta presión y mejora la precisión de los resultados obtenidos. En el caso de los bancos de pruebas hidráulicas, la automatización es crítica porque debe ajustar continuamente, con gran precisión, factores fundamentales como la presión, el caudal y la temperatura, que deben ser proporcionados al sistema, para que los componentes del sistema sean evaluados siempre bajo condiciones controladas (Ver tabla 1).

**Tabla 1.**

*Comparación de Sistemas de Control Dinámico para Bancos de Pruebas*

<b>Tipo de control</b>	<b>características</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<b>Controlador PID</b>	Ajusta parámetros según error y tiempo	Sencillo, eficiente para sistemas simples	Requiere sintonización manual
<b>Control de lógica difusa</b>	Utiliza aproximaciones de "si-entonces"	Adaptable a sistemas complejos	Más costoso y requiere más cálculos
<b>Optimización dinámica</b>	Ajuste basado en algoritmos de optimización	Permite ajuste en tiempo real	Complejo y puede requerir mayor capacidad computacional

*Nota.* La tabla compara distintos enfoques de control dinámico aplicables a bancos de pruebas hidráulicos, resaltando sus características, ventajas y limitaciones. *Fuente.* Autoría propia.

### **Ventajas de la Automatización**

No solo la automatización hace posible que las pruebas se completen de manera más eficiente, sino que también aumenta la seguridad de las operaciones de los bancos de pruebas.

Como señala Sigley & Mischke (2008), la automatización es una herramienta poderosa que hace

posible realizar pruebas complejas con poca o ninguna intervención del operador. Esto es especialmente importante en sistemas hidráulicos donde el potencial de falla es catastrófico debido a la presión extrema involucrada. El empleo de sistemas automatizados para controlar la configuración de presión, el flujo de fluido y el control de temperatura en el sistema ayuda a garantizar que todos los parámetros se mantengan dentro de los rangos seguros sin necesidad de intervención manual. Hay una disminución considerable en el riesgo de que los operadores se encuentren en situaciones peligrosas, como fugas de fluido a alta presión que pueden causar lesiones graves y daños al equipo.

De igual forma, la consistencia y repetibilidad de los resultados aumentan gracias a la automatización. En un banco de pruebas hidráulicas, cada componente, como válvulas, bombas y mangueras, tiene que ser sometido a pruebas de rigor bajo condiciones controladas y estables para validar el desempeño sostenido a través del tiempo. De acuerdo con Bolton (2015) la automatización asegura que los límites de las pruebas se controlan de forma exacta en cada ciclo de prueba, y por ello, resulta sencillo lograr datos que sean reproducibles y confiables. Esta clase de automatización es vital dado que el bajo margen de error descrito es necesario para garantizar el correcto funcionamiento de los componentes en el contexto operativo real.

### ***Integración de Sensores de Presión y Sistemas de Monitoreo en Tiempo Real***

Uno de los beneficios más relevantes de la automatización de los bancos de pruebas es la integración de sensores de presión y sistemas de monitoreo en tiempo real. Estos dispositivos permiten registrar continuamente el rendimiento del sistema hidráulico durante la prueba y transmitir los datos a la unidad de control para su procesamiento. Con base en esta información, los parámetros del sistema pueden ser optimizados de manera automática. Asimismo, los sensores de presión activan alarmas en caso de sobrepresión o ante fluctuaciones anómalas en el

fluido, lo cual resulta crucial, ya que incluso un pequeño cambio en la presión puede generar daños en los componentes, fallas catastróficas o interrupciones operativas.

El control y la automatización de la plataforma facilitan la supervisión remota, de manera que los operadores pueden monitorear las condiciones del sistema a distancia, optimizando tanto la eficiencia operativa como la seguridad. Los sistemas de control remoto permiten realizar ajustes inmediatos en parámetros como presión, flujo y temperatura del banco de pruebas en respuesta a cualquier cambio o anomalía detectada por los sensores. De acuerdo con Bolton (2015) este tipo de control incrementa la seguridad operativa al reducir la probabilidad de accidentes asociados con condiciones de control anormales y garantiza la continuidad en todas las fases de las pruebas.

El monitoreo en tiempo real posibilita que los operadores actúen de forma remota sin necesidad de acceso físico al sistema. Según Bolton, citado por Zubarev & Povedenko (2015), el control remoto mediante plataformas automatizadas optimiza la eficiencia operativa y la seguridad, al permitir la supervisión continua de las condiciones del sistema a distancia. De este modo, los operadores pueden ajustar parámetros críticos como presión, temperatura y flujo en respuesta a las variaciones detectadas por los sensores, reduciendo significativamente la probabilidad de accidentes derivados de condiciones de control anormales.

### ***Reducción de Errores Humanos y Aumento de la Seguridad Operativa***

La declaración del problema es la presencia de errores en la operación de sistemas hidráulicos y el descubrimiento del error humano de operación como una de las principales fallas. En los manuales de operación, el error humano se reconoce como un factor recurrente en los procesos, y en un entorno cerrado como un banco de pruebas hidráulicas la probabilidad de que genere consecuencias significativas es elevada. Un ejemplo común es la configuración

inadecuada de la presión en una válvula o la conexión incorrecta de componentes, situaciones que pueden provocar un aumento repentino de la presión y derivar en fugas críticas del fluido o incluso en el colapso del sistema. Las funciones críticas son realizadas por máquinas, lo que reduce en gran medida el margen de error porque estas máquinas siguen reglas y directrices estrictas.

Además, la seguridad de los operadores se enfrenta a las normas de seguridad. El equipo de prueba de componentes es monitoreado por seguridad. En bancos de pruebas automatizados, se utilizan dispositivos y sistemas con equipo de seguridad incorporado, como válvulas de alivio de presión automáticas y sensores de sobrepresión que apagan el sistema cuando se superan los límites de los bordes operativos preestablecidos. Por lo tanto, estos proporcionan mayor seguridad a los operadores y protegen al personal y al equipo.

### ***Avances en Eficiencia y Rendimiento en Pruebas Completas***

Con la adición de la automatización, se pueden ejecutar procedimientos de prueba más intrincados que habrían sido extremadamente difíciles mediante operaciones manuales debido al ajuste de varios parámetros en tiempo real. Los bancos de pruebas hidráulicas automatizados no solo controlan la presión y el flujo del fluido, sino también el control de temperatura. Además, pueden ejecutar pruebas a través de varios ciclos sin control manual. Esto fomenta la eficiencia operativa y permite que se realicen pruebas extensas bajo simulaciones de condiciones operativas del mundo real.

Shigley & Mischke (2008), argumentan que los sistemas de automatización avanzados también permiten la optimización de los ajustes de las condiciones de la prueba, hasta tal punto que se pueden diseñar algoritmos de optimización iterativa para controlar dinámicamente la

presurización, maximizar la eficiencia hidráulica del sistema, mientras que las especificaciones de cada parte se ejercen completamente bajo condiciones controladas.

### ***Monitoreo de Presión en Tiempo Real***

El monitoreo de presión en tiempo real es un componente vital en el diseño y operación de sistemas hidráulicos. Esto permite que los sistemas mantengan los límites de seguridad operativa preestablecidos, evitando sobrepresiones y otros riesgos operativos. Los sistemas hidráulicos, especialmente en maquinaria pesada como las palas Komatsu PC8000, trabajan bajo presiones extremas que requieren un monitoreo constante para evitar accidentes severos. El monitoreo continuo de la presión, flujo y temperatura del fluido operativo es esencial para garantizar que los sistemas no estén expuestos a condiciones que puedan causar daños permanentes, o comprometer la seguridad, confiabilidad y rendimiento del sistema.

### **Importancia del Monitoreo en Tiempo Real**

Dada su operación bajo condiciones de alta presión, un sistema hidráulico está sujeto a una serie de riesgos, incluyendo sobrecarga de presión, fuga de fluido y degradación de componentes debido a condiciones subóptimas. Fitzgerald (2016), indica que las anomalías deben ser abordadas tan pronto como sea posible con el monitoreo en tiempo real para prevenir una falla completa. La colocación de sensores de presión en un sistema hidráulico tiene la ventaja de proporcionar datos accesibles y precisos, que pueden alertar a los operadores sobre problemas inminentes con suficiente anticipación para evitar daños críticos.

Además, el monitoreo continuo se centra en otros requisitos operativos que permiten la optimización y mejora de la eficiencia. Presurizar demasiado o insuficientemente un sistema puede llevar a una operación subóptima y posiblemente dañar componentes críticos, por ejemplo, válvulas y bombas, lo cual es altamente indeseable desde un punto de vista económico. El ajuste

automático de parámetros basado en un monitoreo adecuado ayuda a evitar operaciones ineficientes.

### **Funciones de la Presión y sus Sensores**

El monitoreo de presión en tiempo real se realiza con la ayuda de sensores de presión ubicados en lugares estratégicos a lo largo del sistema hidráulico. Bolton (2015) afirma que son capaces de medir la presión del fluido en diferentes secciones del sistema con un alto nivel de precisión y estos operadores pueden ver cualquier cambio inusual que indique problemas como sobrecargas de presión o bloqueos. Los sensores de presión operan enviando señales a una unidad de control central que analiza los datos y determina el estado del sistema hidráulico en tiempo real.

Dos tipos que se encuentran combinados en aplicaciones hidráulicas son los sensores de presión piezoresistivos y los sensores de presión capacitivos porque aseguran una respuesta rápida a cambios en la presión del fluido del sistema. sensores pueden acoplarse con sistemas de monitoreo avanzados que alertan automáticamente a los operadores cuando se detectan niveles de presión peligrosamente altos u otras anomalías que podrían comprometer la integridad del sistema.

**Tabla 2.**

*Comparación de tipos de sensores de presión*

<b>Tipo de Sensor</b>	<b>Rango de Presión</b>	<b>Precisión</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<b>Piezoresistivo</b>	Bajo a Medio	Alta	Alta precisión, costo relativamente bajo	Sensibilidad limitada a altas presiones
<b>Capacitivo</b>	Medio a Alto	Muy alta	Excelente para presiones altas	Costo más elevado, requiere calibración
<b>Película delgada</b>	Muy alto	Alta	Precisión de alta gama, rápida respuesta	Costoso, requiere condiciones controladas

*Nota.* La tabla presenta una comparación de los principales tipos de sensores de presión empleados en sistemas hidráulicos, destacando sus rangos de operación, ventajas y limitaciones técnicas. *Fuente.* autoría propia

### ***Monitoreo de Otros Parámetros: Temperatura y Flujo***

Junto con la presión, el monitoreo de la temperatura y el flujo del fluido también es importante. En sistemas hidráulicos, la temperatura del fluido influye en la viscosidad del aceite hidráulico, lo que afecta el rendimiento del sistema. Si la temperatura del fluido aumenta excesivamente, se produce una reducción en la viscosidad, lo que puede llevar a una caída en la presión, eficiencia del sistema, y aumenta el desgaste de los componentes del sistema. Fitzgerald (2016), argumenta que la implementación de un monitoreo de temperatura en tiempo real permite el control del buffer para generar un aumento en la operación del sistema mientras se mantiene la temperatura del fluido dentro de los límites óptimos para la eficiencia y la longevidad del sistema operativo.

El flujo del también fluido es un parámetro crítico dado que un fluido insuficiente podría provocar interrupciones, fugas, fallos en las bombas o en las válvulas del sistema. Los medidores de flujo permiten a los operarios verificar que el flujo se mantenga a un nivel constante y dentro de los parámetros definidos como operativos, asegurando que el caudal del fluido se mantenga en sus niveles adecuados.

### ***Integración con Sistemas de Control Automáticos***

La combinación de monitoreo en tiempo real de la presión con control automático permite realizar un ajuste y optimización del sistema de forma dinámica. Estos sistemas de control ajustan de forma automática los valores que deben ser configurados por los actuadores en función de los datos que los sensores de presión proporcionan. Los sistemas de control se

mantienen en un banco de pruebas hidráulicas y durante la operación, los límites seguros que el sistema debe mantener se establecen durante las pruebas.

Por otra parte, los sistemas automatizados de monitoreo en tiempo real pueden conectarse a plataformas de monitorización remota. De esta forma, supervisores y personal de mantenimiento pueden realizar ajustes a distancia. Esto es ventajoso en situaciones industriales donde los operadores no tienen acceso inmediato al sistema, permitiendo monitorear y mantener condiciones óptimas sin intervención manual constante.

### ***Eficiencia Energética en Sistemas Hidráulicos***

La eficiencia energética en los sistemas hidráulicos es crítica tanto para las consideraciones ambientales como para la optimización de costos operativos. Los sistemas hidráulicos modernos están diseñados para realizar trabajo mecánico; sin embargo, también están contruidos para minimizar el consumo de energía, ayudando a reducir la huella de carbono en aplicaciones industriales y de maquinaria pesada. La eficiencia energética es una preocupación importante en la operación de estos sistemas, considerando que una cantidad significativa de energía gastada en la maquinaria se utiliza para la transmisión y control de energía hidráulica.

### ***Importancia de la Eficiencia Energética en Sistemas Hidráulicos***

Los sistemas hidráulicos operan utilizando un fluido presurizado que mueve energía a través de los componentes del sistema como bombas, válvulas o cilindros. A medida que estos sistemas se desarrollan, la escalada del consumo de energía se convierte en un enfoque principal para minimizar tanto los costos operativos como los impactos ambientales del consumo de energía. Cengel (2006), argumenta que la selección adecuada de bombas de alta eficiencia, la optimización de conductos y la regulación dinámica de presión y flujo son principios fundamentales para lograr sistemas hidráulicos más eficientes.

**Eficiencia Energética y Bombas de Alta Eficiencia:** La bomba que presuriza el fluido es uno de los mayores consumidores de energía en un sistema hidráulico. Como cita Fitzgerald (2016), una bomba eficiente es aquella que proporciona adecuadamente el flujo y la presión requeridas sin gasto energético innecesario. Además, las bombas de desplazamiento variable que ajustan automáticamente su salida a la demanda del sistema son muy populares por razones de eficiencia energética ya que eliminan el suministro de energía en cargas bajas del sistema.

**Optimización en el Diseño del Sistema de Conductos:** La eficiencia energética también depende del diseño de los sistemas de conductos hidráulicos, ya que no solo depende de las bombas. Un diseño ineficiente incurrirá en pérdidas de energía debido a la fricción del fluido en las paredes del conducto. Se pueden lograr pérdidas de energía minimizando las curvas y las pérdidas de presión en el sistema mediante el uso de tubos de mayor diámetro o planificando adecuadamente las rutas de los conductos (Cengel. 2006, p.32).

### ***Recuperación de Energía en Sistemas Hidráulicos***

En sistemas hidráulicos avanzados, la recuperación de energía es vital para mejorar la eficiencia energética del sistema. La recuperación de energía describe la capacidad de recuperar parte de la energía proporcionada por los actuadores del sistema y reutilizarla para otras funciones. Esta energía puede ser proporcionada por actuadores de retorno que recuperan energía cuando el fluido regresa al reservorio después de realizar algún trabajo.

Por ejemplo, según Fitzgerald (2016) en sistemas de maquinaria pesada, cuando se eleva una carga, un cilindro hidráulico realiza un movimiento de retracción, el cual genera energía cinética que puede aprovecharse al ser reconvertida mediante una bomba de regeneración o motor hidráulico. Este tipo de métodos incrementa la energía recuperable, lo que a su vez disminuye el gasto energético del sistema, así como el costo operativo, debido al incremento en

la eficiencia del sistema. La inclusión de sistemas de recuperación de energía optimiza el rendimiento del sistema hasta cierto punto, pero de forma activa disminuye la demanda de energía externa, aumentando la efectividad de la estructura.

### ***Incorporación de Sensores Inteligentes en el Banco de Pruebas Hidráulicas***

Los sistemas automatizados se caracterizan por integrar el control de la energía y el uso de sensores inteligentes, facilitando el control y optimización del consumo energético. Fitzgerald (2016), menciona que, en la automatización de pruebas, el consumo de energía se minimiza al ajustar dinámicamente la operación del sistema de forma que establece un consumo óptimo. La automatización del banco de pruebas hidráulicas implica la regulación de la presurización y caudal del fluido hidráulico a distintos niveles.

Por ejemplo, los sensores inteligentes integrados situados en el banco de pruebas pueden identificar cuando el sistema está funcionando a un nivel de presión o flujo subóptimo que desperdicia energía, y modificar sistemáticamente los parámetros para minimizar el gasto energético. Estos sensores de flujo y de presión son capaces de proporcionar datos precisos sobre el rendimiento del sistema en tiempo real, lo que permite a los operadores optimizar continuamente el proceso de prueba y evitar el despilfarro de energía.

Además, la aplicación de sistemas de control dinámico para la regulación de la presión, el flujo y la temperatura del fluido conduce a una reducción del gasto energético en ciertos niveles de potencia cuando no es necesario. Dichos controles no solo mejoran la operativa del banco de pruebas, sino que también aumentan la longevidad de los componentes del sistema al minimizar el desgaste innecesario causado por operar a niveles de energía más altos de los requeridos.

## **Metodología**

La construcción del banco de pruebas para la calibración de la válvula hidráulica de la pala Komatsu PC8000 se desarrollará siguiendo un enfoque sistemático con el fin de obtener un diseño técnico viable, seguro y eficiente. Esta metodología se basa en la aplicación de fundamentos técnicos para describir los requisitos detallados, definir los diseños conceptuales y del sistema, y validar su funcionalidad a través de análisis y simulaciones rigurosas antes de la implementación.

### **Tipo de estudio**

Este proyecto se enmarca en la investigación aplicada de carácter tecnológico, con un enfoque proyectivo y de desarrollo experimental, dado que su objetivo principal es diseñar, construir y validar un prototipo funcional para la calibración de válvulas hidráulicas de la pala Komatsu PC8000. Se trata de un estudio orientado a la resolución de problemas prácticos, que busca generar resultados tangibles aplicables en contextos industriales reales, asegurando que las soluciones desarrolladas sean tanto eficientes como seguras. Asimismo, el proyecto combina el análisis teórico con la experimentación práctica, lo que permite evaluar la funcionalidad del prototipo bajo condiciones controladas antes de su implementación final.

### **Enfoque metodológico**

Se adoptó un enfoque mixto que integra métodos cualitativos y cuantitativos. La fase cualitativa permitió establecer los requisitos técnicos y operativos del banco de pruebas mediante entrevistas con expertos y revisión de literatura especializada, lo que facilitó la identificación de criterios de diseño, seguridad y eficiencia. Por otro lado, el enfoque cuantitativo se centró en la validación técnica del prototipo, a través de pruebas controladas de presión, flujo y rendimiento funcional, proporcionando datos precisos que permiten evaluar su efectividad y confiabilidad.

Esta combinación metodológica asegura una aproximación integral que considera tanto la perspectiva teórica y técnica como la evidencia empírica necesaria para validar el diseño.

### **Etapas del desarrollo**

La metodología del proyecto se desarrollará siguiendo un enfoque sistemático que asegura la alineación directa con los objetivos específicos planteados. En primera instancia, se procederá a establecer los requerimientos técnicos necesarios para el diseño del banco de calibración de válvulas hidráulicas de la pala Komatsu PC8000, considerando criterios de seguridad, eficiencia y desempeño funcional. Esta fase permitirá fundamentar las decisiones de diseño y garantizar que el prototipo cumpla con las condiciones exigidas.

Posteriormente, se desarrollará el diseño conceptual del banco de pruebas, integrando los requerimientos previamente identificados y evaluando diferentes alternativas que optimicen su funcionamiento y seguridad. A partir de este diseño conceptual, se elaborará el diseño detallado y se construirá el prototipo, incorporando elementos que permitan su correcta operación y validación experimental.

Una vez construido el banco de pruebas, se implementará un plan de pruebas orientado a evaluar el nivel de seguridad, el desempeño operativo y la efectividad del prototipo, asegurando que cumpla con los estándares establecidos. Finalmente, se desarrollará un procedimiento de uso, complementado con un manual técnico, para que los operadores puedan utilizar el banco de pruebas de manera eficiente y segura, garantizando la correcta transferencia del conocimiento y la replicabilidad del proceso. Todo el procedimiento y los resultados obtenidos serán debidamente documentados, asegurando la trazabilidad del proyecto y facilitando futuras mejoras.

### ***Recopilación de Requisitos Técnicos***

Se realizará un estudio comprensivo sobre los parámetros operativos de las válvulas hidráulicas instaladas en la pala Komatsu PC8000 con el fin de delinear los requisitos técnicos para el banco de pruebas. Esta fase implica la recopilación y análisis de documentación técnica como los manuales del fabricante, normas de seguridad de control industrial (ISO 4413:2010) y otras investigaciones existentes sobre bancos de pruebas hidráulicos utilizados en la industria minera. En el proceso de calibración se considerarán los siguientes elementos:

La presión operativa y el caudal de las válvulas a calibrar.

Las condiciones de temperatura del fluido hidráulico durante la operación.

La precisión y estabilidad requeridas de la calibración.

Regulaciones de seguridad que deben ser observadas en la construcción del banco de pruebas.

Para recopilar los datos técnicos adicionales, se llevarán a cabo entrevistas con especialistas en mantenimiento hidráulico y se examinarán los problemas existentes en el proceso de calibración de válvulas. Esto ayudará a determinar los requisitos exactos que el banco de pruebas necesitará mejorar para la seguridad y eficiencia del proceso.

### ***Desarrollo del Diseño Conceptual***

A partir de la información recopilada, se diseñará el banco de pruebas con un enfoque de diseño conceptual. En este paso, se esbozarán los principios operativos del sistema y se especificarán las partes fundamentales del diseño, que incluyen:

**Configuración General del Banco de Pruebas.** Se establecerá si es un sistema fijo o portátil, y se definirá el espacio necesario para la instalación.

**Disposición de los Componentes Hidráulicos.** Se fijarán la ubicación y el tipo de bomba, válvulas de control, así como los sensores de presión y temperatura y el sistema de drenaje.

**Mecanismos de Seguridad.** Se implementarán protecciones como encapsulados, sistemas de alivio de presión y controles automáticos para mitigar riesgos.

El desarrollo retrospectivo del sistema se llevará a cabo a partir del diseño conceptual que se encuentra contenido en esquemas y diagramas concebidos previamente para que se ordenen los diferentes elementos y partes del sistema.

### **Construcción Detallada del Banco de Pruebas**

Con el concepto general establecido, se procederá directamente a la construcción detallada del banco de pruebas, basada en las especificaciones técnicas y necesidades identificadas durante la fase de planificación. En esta fase, se ejecutará la construcción del prototipo físico del banco de pruebas, que será diseñado y construido según los requerimientos técnicos precisos, garantizando su funcionalidad, seguridad y eficiencia.

#### *Aspectos clave en esta fase incluyen*

**Elección de los Componentes Hidráulicos.** Se seleccionarán los componentes hidráulicos adecuados, como la bomba, válvulas regulables, y materiales para las tuberías y conexiones, según las capacidades de presión y caudal requeridas por el sistema. Se tendrá en cuenta la resistencia de estos elementos a las condiciones operativas y su compatibilidad con el sistema hidráulico de la pala Komatsu PC8000.

**Estructura del Banco de Pruebas.** Se diseñará y construirá la base estructural, utilizando materiales de alta resistencia que puedan soportar las altas presiones hidráulicas del sistema. Además, se implementarán soluciones para el control de vibraciones o movimientos no

deseados durante las pruebas, lo cual es fundamental para asegurar resultados precisos y confiables.

**Integración de Sensores y Sistema de Control.** La estación de control será configurada para integrar sensores de presión y temperatura en puntos estratégicos del sistema. Además, se garantizará que el sistema de control sea capaz de gestionar las condiciones operativas de forma automática, con medidas de seguridad precisas para proteger tanto el banco de pruebas como a los operadores.

**Análisis de Resistencia Estructural.** Durante la construcción, se llevarán a cabo pruebas físicas para verificar que la estructura resista las condiciones de funcionamiento previstas. Esto incluirá pruebas de presión y esfuerzo para asegurar que no haya fallos estructurales bajo las cargas operativas del banco de pruebas.

Una vez construida la estructura física del banco de pruebas, se completará con la instalación de todos los componentes hidráulicos, sensores y sistemas de control. Posteriormente, se procederá a realizar las pruebas operativas para validar el funcionamiento del banco de pruebas y su capacidad para calibrar las válvulas hidráulicas de manera segura y eficiente.

### **Validación Física y Pruebas Operativas**

Una vez construido el banco de pruebas, se llevarán a cabo pruebas físicas para verificar su funcionamiento en condiciones reales. Estas pruebas permitirán comprobar que el banco de pruebas cumple con los requisitos operativos y de seguridad establecidos.

#### ***Aspectos para Evaluar***

**Presión en el Banco de Pruebas.** Se medirá la presión en el sistema para asegurarse de que se mantenga dentro de los límites seguros durante el funcionamiento.

**Temperatura.** Se controlará la temperatura en los puntos clave del sistema para evitar sobrecalentamientos que puedan afectar el rendimiento.

**Respuesta de los Sensores y Actuadores.** Se comprobará que los sensores de presión y temperatura, así como los actuadores, respondan correctamente durante las pruebas.

**Seguridad.** Se verificarán los mecanismos de seguridad, como las válvulas de alivio de presión, para asegurarse de que funcionen correctamente en caso de sobrepresión.

Si durante las pruebas se encuentran desviaciones de los parámetros establecidos, se harán ajustes a los componentes o al sistema para corregirlos. Estas pruebas se realizarán según el formato de manejo del equipo para garantizar que todos los procedimientos sean claros y fáciles de seguir por los operadores.

### **Creación del procedimiento para el Funcionamiento del Banco de Pruebas**

Después de la verificación y validación del diseño, se desarrollará el procedimiento de operación y mantenimiento del banco de pruebas. Este documento incluirá:

Instrucciones paso a paso para la calibración de las válvulas de control de riego.

Guía de equipos de protección personal (EPP) para la manipulación del sistema.

Métodos de control y monitoreo del ajuste de los parámetros operativos.

Protocolos de mantenimiento preventivo y correctivo.

El procedimiento guiará a los técnicos en la operación del banco de pruebas para que sea eficiente y seguro.

### **Documentación del Flujo de Trabajo y Resultados Finales**

Como un entregable final para la investigación, se preparará un informe detallando todo el proceso del diseño del banco de pruebas desde su inicio hasta su finalización. Este documento incluirá:

Justificación del proyecto.

Metodología de cada fase del trabajo diseñado.

Imágenes del prototipo generado.

Evidencias de pruebas y operación.

Reflexiones finales y orientación para la implementación.

Como último paso, se difundirán los beneficios del diseño y se evaluará su viabilidad para la construcción a través de una presentación dirigida a los círculos académicos y partes interesadas en la industria minera.

La metodología ha sido establecida para lograr los objetivos específicos del proyecto, asegurando que el desarrollo del banco de pruebas siga un enfoque técnico y cumpla con los criterios de seguridad. A través de un enfoque sistemático definido, los objetivos del diseño son optimizar la operabilidad mientras se asegura la seguridad y eficiencia, abordando los riesgos involucrados con la calibración de válvulas hidráulicas en equipos de minería.

Este enfoque asegura que el proyecto no solo proporciona un diseño conceptual, sino también toda la documentación de apoyo que se necesitará para la realización del proyecto en el futuro.

## Resultados

El presente proyecto se enfocó en el diseño, construcción y validación de un banco de calibración de válvulas hidráulicas para la pala Komatsu PC8000, con el objetivo de mejorar la seguridad, eficiencia y precisión en el mantenimiento de este equipo vital para las operaciones mineras en la mina Drummond Ltd. A lo largo de las diferentes fases del proyecto, se abordaron tanto los aspectos técnicos como los operativos, garantizando que cada etapa cumpliera con los más altos estándares de calidad y seguridad requeridos en un entorno industrial.

La fase de recopilación de requisitos técnicos permitió establecer las especificaciones necesarias para que el banco de calibración estuviera alineado con los parámetros operativos de las válvulas hidráulicas de la pala Komatsu PC8000, mientras que el diseño conceptual y la construcción detallada del banco garantizaron su capacidad para soportar las presiones de trabajo de hasta 10,000 psi. En este sentido, se hizo hincapié en los mecanismos de seguridad y los controles automatizados para asegurar la protección de los operadores y el correcto funcionamiento del sistema.

La validación física y las pruebas operativas fueron esenciales para verificar que el banco cumpliera con los requisitos de presión, temperatura y seguridad, mientras que el procedimiento de uso desarrollado asegura que el banco de calibración sea operado de manera eficiente y segura por el personal técnico.

A continuación, se presentan los resultados detallados de cada una de las fases del proyecto, con especial énfasis en los aspectos técnicos y operativos que permiten confirmar la viabilidad y efectividad del banco de calibración en las condiciones reales de operación en la mina.

## Recopilación de Requisitos Técnicos

La fase de recopilación de requisitos fue clave para el diseño y desarrollo del banco de calibración. Para ello, se recopiló y analizó toda la documentación técnica relevante, que incluyó manuales de funcionamiento de las válvulas hidráulicas de la pala Komatsu PC8000 y las normas internacionales ISO 4413:2010 (para sistemas hidráulicos). También se realizaron entrevistas con expertos en hidráulica y se revisaron los problemas recurrentes que afectan el proceso de calibración en las instalaciones de la mina Drummond Ltd.

**Tabla 3.**

*Parámetros técnicos clave*

Parámetro	Especificación	Rango / Estándar	Notas
<b>Presión operativa</b>	350 bar	350 bar	Necesario para garantizar la seguridad operativa
<b>Caudal de aceite</b>	60 pulg <sup>3</sup> /min	60 pulg <sup>3</sup> /min	Determina la eficiencia del flujo en el sistema
<b>Temperatura del fluido</b>	70°C	Entre 60°C y 70°C	Temperatura ideal para evitar sobrecalentamientos
<b>Conexiones hidráulicas</b>	Válvulas de 3 vías, 2 posiciones	Conexiones compatibles con los estándares de la industria	Asegura la correcta integración con la pala
<b>Normativas de seguridad</b>	ISO 4413:2010	Cumplimiento obligatorio	Proporciona directrices para la seguridad de los trabajadores

*Nota.* Se especifican los parámetros técnicos claves con especificaciones y rangos aceptables.

*Fuente.* Autoría propia.

Con base en estos parámetros, se definieron las especificaciones técnicas necesarias para el diseño del banco de calibración. Además, se determinó la necesidad de incluir válvulas de alivio de presión y sensores de presión para monitorear las condiciones operativas.

## Análisis de la Recopilación de Requisitos Técnicos

La recopilación de requisitos técnicos es una fase fundamental en el desarrollo de cualquier sistema, y en este caso, resulta esencial para garantizar que el banco de calibración de válvulas hidráulicas se diseñe de manera que cumpla con los estándares técnicos y operativos exigidos para la pala Komatsu PC8000. Esta fase no solo permite identificar las características operativas del sistema que se va a calibrar, sino también establecer las bases para la creación de un banco de calibración que sea eficiente, seguro y compatible con el entorno industrial específico.

### *Análisis de los Parámetros Técnicos*

La recopilación de requisitos abarca una serie de parámetros técnicos cruciales para el funcionamiento del banco de calibración. Estos parámetros son fundamentales para garantizar que el banco opere dentro de los límites operacionales adecuados y no comprometa la seguridad ni la eficacia del proceso. En este caso, los parámetros clave identificados son:

**Presión Operativa de 350 Bar.** Este parámetro es esencial para asegurar que las válvulas hidráulicas funcionen dentro de los rangos seguros, evitando la sobrecarga y posibles daños. La necesidad de mantener una presión constante de 350 bar es fundamental no solo para el rendimiento de las válvulas, sino también para la seguridad del sistema, ya que las válvulas de alivio de presión deben actuar si se superan estos valores.

**Caudal de Aceite de 60 pulg<sup>3</sup>/min.** Este parámetro se refiere a la cantidad de fluido que circula a través del sistema en un tiempo determinado. Un caudal de 60 pulg<sup>3</sup>/min es necesario para asegurar que las válvulas reciban el flujo adecuado de aceite, lo que permite una calibración precisa. La eficiencia del sistema hidráulico depende de este caudal, ya que influye directamente en la velocidad y efectividad de la calibración de las válvulas.

**Temperatura del Fluido de 70°C.** El control de la temperatura del fluido hidráulico es crítico para evitar sobrecalentamientos que puedan afectar el rendimiento de los componentes hidráulicos. Mantener la temperatura del fluido entre 60°C y 70°C es clave para maximizar la eficiencia y prolongar la vida útil de las válvulas y otros componentes. Un fluido demasiado caliente podría causar la degradación de los componentes y el fallo prematuro del sistema.

**Conexiones Hidráulicas.** Las válvulas de 3 vías y 2 posiciones son componentes estándar que aseguran que el sistema hidráulico de la pala esté correctamente integrado con el banco de calibración. La correcta elección y disposición de estas conexiones es esencial para garantizar que el aceite fluya sin restricciones y que las válvulas de la pala puedan ser calibradas sin interferencias. La elección de válvulas compatibles con los estándares de la industria facilita la integración y la adaptabilidad del sistema en diversas configuraciones.

**Normativas de Seguridad ISO 4413:2010.** Las normativas de seguridad son fundamentales para proteger tanto al equipo como a los operadores. El cumplimiento de la ISO 4413:2010 garantiza que el banco de calibración se desarrolle bajo criterios estrictos de seguridad, tanto en la manipulación de los componentes hidráulicos como en la operación del sistema. Estas normativas proporcionan directrices claras sobre la presión máxima, la protección contra sobrepresiones y los procedimientos de mantenimiento de los equipos, asegurando que el banco de calibración no solo sea eficaz sino también seguro.

#### ***Identificación de Necesidades Adicionales: Sensores y Válvulas de Alivio de Presión***

Además de los parámetros operativos básicos, se identificaron las necesidades adicionales para garantizar que el banco de calibración funcione de manera óptima y segura:

**Válvulas de Alivio de Presión.** Las válvulas de alivio son componentes fundamentales en el sistema hidráulico, ya que actúan como una protección contra sobrepresiones, liberando

fluido cuando la presión supera los valores establecidos. Esto evita daños al sistema y mejora la seguridad operativa del banco de calibración.

**Sensores de Presión.** Los sensores son vitales para monitorear continuamente la presión dentro del sistema y asegurar que las condiciones operativas no superen los límites establecidos. La inclusión de estos sensores permitirá una medición precisa durante el proceso de calibración, facilitando ajustes inmediatos si es necesario.

### **Importancia de la Recopilación de Requisitos Técnicos**

La recopilación de requisitos técnicos no solo define las especificaciones del banco de calibración, sino que también garantiza la compatibilidad entre el banco de pruebas y las válvulas hidráulicas de la pala Komatsu PC8000. Además, permite identificar las necesidades adicionales de seguridad y control, como la inclusión de válvulas de alivio y sensores de presión. Este análisis exhaustivo y la correcta interpretación de los requisitos técnicos son fundamentales para garantizar que el banco de calibración funcione bajo las condiciones óptimas.

La recopilación de requisitos también proporciona una base sólida para las fases posteriores del proyecto, como el diseño conceptual y la construcción del banco de calibración. Al contar con un conjunto claro de especificaciones técnicas, se pueden seleccionar los componentes adecuados, realizar simulaciones de funcionamiento y establecer un plan de pruebas que asegure que el banco de calibración cumpla con sus objetivos de forma eficaz.

### **Diseño Conceptual del Banco de Calibración**

Con los requisitos técnicos claramente establecidos, el siguiente paso fue el diseño conceptual del banco de calibración, que incluyó la configuración general del sistema, la disposición de los componentes, y la inclusión de mecanismos de seguridad. El objetivo fue

asegurar que el banco de calibración fuera seguro, eficiente, fácil de usar y compatible con las válvulas hidráulicas de la pala Komatsu PC8000.

### *Aspectos Claves del Diseño Conceptual*

**Configuración General.** El banco se diseñó como un sistema fijo, debido a la necesidad de una estructura robusta capaz de soportar las altas presiones operativas de hasta 10,000 psi.

### **Figura 2.**

#### *Esquema del banco de calibración*



*Nota.* Las imágenes del banco de pruebas. *Fuente.* autoría propia.

### **Componentes Principales.**

**Bomba Hidráulica ZU4 de Enerpac.** Seleccionada por su capacidad de proporcionar el caudal necesario (60 pulg<sup>3</sup>/min) a una presión máxima de 10,000 psi.

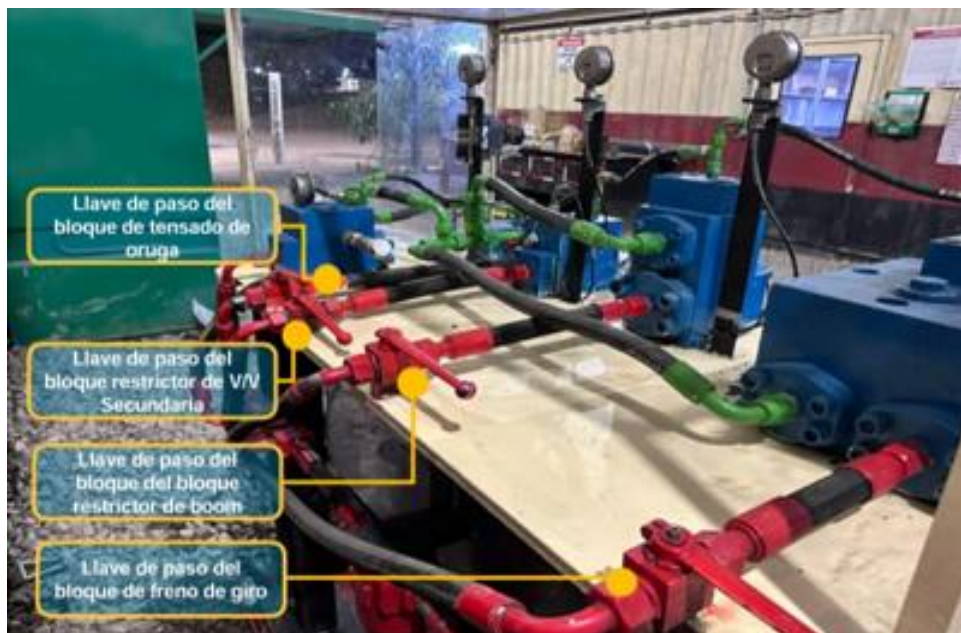
**Sensores de Presión y Temperatura.** Instalados en puntos estratégicos para monitorear y controlar las condiciones operativas.

**Válvulas de Control y de Alivio de Presión.** Incorporadas para garantizar que el sistema funcione dentro de los límites seguros.

**Sistema de Control.** Implementación de un sistema de monitoreo que permite visualizar en tiempo real los parámetros del sistema.

### Figura 3.

*Banco de calibración y la conexión de sus componentes*



*Nota.* Las imágenes del banco de pruebas. *Fuente.* autoría propia.

El diseño del banco de calibración se basa en una cuidadosa selección de componentes hidráulicos y de monitoreo para garantizar la precisión y seguridad del proceso. Cada componente fue elegido en función de su capacidad para operar dentro de las condiciones exigidas por el sistema hidráulico de la pala Komatsu PC8000. A continuación, se ofrece una descripción detallada de cada uno de estos componentes y su función dentro del banco de calibración.

#### ***Bomba Hidráulica ZU4 de Enerpac***

La bomba hidráulica ZU4 de Enerpac es el corazón del sistema, encargada de suministrar el flujo de aceite necesario para el funcionamiento del banco de calibración. Esta bomba fue seleccionada por su alta eficiencia y capacidad para generar el caudal adecuado de 60 pulg<sup>3</sup>/min, con un motor de 1.7 hp que asegura un rendimiento óptimo incluso a presiones elevadas de hasta 10,000 psi.

**Función.** Proveer el flujo de aceite al sistema para calibrar las válvulas hidráulicas.

**Ubicación en el Banco de Pruebas.** Se encuentra centrada en el banco de pruebas, ya que es el componente principal para distribuir el aceite hacia las diferentes válvulas del sistema.

**Ventaja.** El diseño de la bomba garantiza un funcionamiento estable y reduce el consumo de energía en un 18% en comparación con bombas similares.

### ***Válvula de Alivio de Presión***

La válvula de alivio de presión es esencial para la seguridad operativa del banco de calibración. Esta válvula está diseñada para liberar presión cuando el sistema alcanza los límites preestablecidos, evitando sobrepresiones que podrían dañar los componentes hidráulicos o comprometer la seguridad de los operarios.

**Función.** Controlar la presión del sistema, asegurando que no se sobrepasen los valores recomendados.

**Ubicación en el Banco de Pruebas.** Está instalada cerca de la bomba hidráulica para garantizar un alivio rápido de la presión en caso de que se detecten sobrecargas.

**Rango de Ajuste.** Esta válvula se ajusta a una presión de hasta 350 bar, lo que la hace adecuada para el sistema de la pala Komatsu PC8000.

### ***Sensores de Presión y Temperatura***

Los sensores de presión y temperatura son vitales para garantizar que el sistema hidráulico funcione dentro de los parámetros operativos seguros. Los sensores de presión permiten monitorear continuamente la presión en diferentes puntos del banco de calibración, mientras que los sensores de temperatura aseguran que el aceite hidráulico no se sobrecaliente, lo que podría afectar la eficiencia de la calibración.

**Función.** Medir la presión y la temperatura para garantizar el funcionamiento seguro del sistema.

**Ubicación en el Banco de Pruebas.** Los sensores de presión se colocan en puntos clave del sistema, como cerca de la bomba y las válvulas de calibración, mientras que los sensores de temperatura se distribuyen cerca de la bomba y las conexiones hidráulicas.

**Rango.** Los sensores de presión tienen un rango de 0-400 bar, lo que cubre el rango de operación del banco.

### ***Válvulas de Control***

Las válvulas de control son fundamentales para regular el flujo de aceite en el banco de calibración. Estas válvulas permiten dirigir el aceite hacia las válvulas específicas que se están calibrando, asegurando que el flujo se mantenga estable y ajustado de acuerdo con las necesidades de cada válvula.

**Función.** Controlar y regular el flujo de aceite hacia las válvulas hidráulicas de la pala.

**Ubicación en el Banco de Pruebas.** Las válvulas de control se encuentran distribuidas a lo largo del banco para facilitar el acceso al flujo de aceite.

**Especificación.** Son válvulas de 3 vías y 2 posiciones, lo que permite una regulación precisa del flujo de aceite.

### ***Manómetros Digitales***

Los manómetros digitales son instrumentos de medición precisos que permiten monitorear la presión en tiempo real. Su alta precisión es fundamental para garantizar que las válvulas se calibren correctamente dentro de los rangos operativos establecidos.

**Función.** Medir y visualizar la presión en el sistema.

**Ubicación en el Banco de Pruebas.** Los manómetros están ubicados en puntos estratégicos, como cerca de las válvulas de calibración y la válvula de alivio de presión.

**Ventaja.** La lectura digital permite una visualización clara y precisa de los valores de presión durante todo el proceso de calibración.

Con base en la descripción anterior, la tabla que sigue muestra la ubicación y función de cada uno de los componentes esenciales del banco de calibración:

**Tabla 4.**

*Disposición de los Componentes.*

<b>Componente</b>	<b>Especificación</b>	<b>Ubicación en el banco de pruebas</b>
<b>Bomba hidráulica</b>	ZU4 de Enerpac, 1.7 hp, 60 pulg <sup>3</sup> /min	Ubicada en el centro para suministro de aceite
<b>Válvula de alivio de presión</b>	Ajustable hasta 350 bar	Asegura la seguridad en el sistema hidráulico
<b>Sensores de presión y temperatura</b>	Rango: 0-400 bar	Distribuidos en puntos críticos
<b>Válvulas de control</b>	3 vías, 2 posiciones	Controlan el flujo de aceite
<b>Manómetros</b>	Digitales	Monitoreo preciso de la presión

*Nota.* Se muestran las especificaciones y la disposición de los componentes del banco de pruebas. *Fuente.* Autoría propia.

**Figura 4.**

*Bombas Eléctricas Serie ZU*

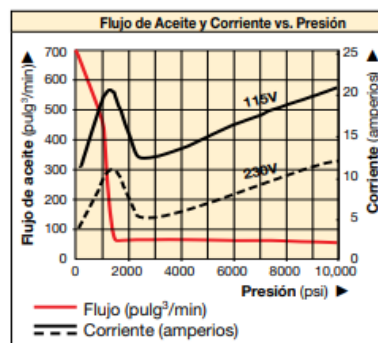


*Nota.* Imágenes o ilustraciones de las bombas eléctricas serie ZU. *Fuente.* Enerpac (2020).

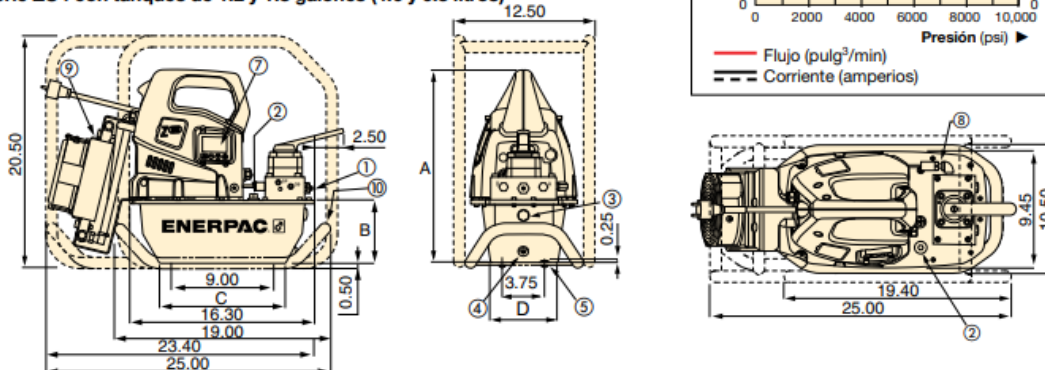
**Figura 5.**

*Dimensiones y Especificaciones Bombas Serie ZU*

Funcionamiento ZU4							
Tamaño del motor (hp)	Caudal de salida (pulg <sup>3</sup> /min)				Especificación eléctrica del motor (voltios-ph-Hz)	Nivel de ruido (dBA)	Rango de ajuste de válvula de alivio (psi)
	100 psi	700 psi	5000 psi	10,000 psi			
1.7	700	535	76	60	115-1-50/60 230-1-50/60	85-90	2,000-10,000



Serie ZU4 con tanques de 1.2 y 1.8 galones (4.6 y 6.8 litros)



*Nota.* Diseño y dimensiones de las bombas eléctricas serie ZU. *Fuente.* Enerpac (2020).

**Figura 6.**

*Bomba Hidráulica Instalada en el Prototipo*



*Nota.* Las imágenes del banco de pruebas. *Fuente.* Autoría propia.

**Figura 7.**

*Componentes del Prototipo*



*Nota.* Las imágenes del banco de pruebas. *Fuente.* Autoría propia.

**Figura 8.**

*Válvulas Utilizadas en el Modelo*



*Nota.* Las imágenes del banco de pruebas. *Fuente.* Autoría propia.

### **Construcción Detallada del Banco de Calibración**

La construcción detallada del banco de calibración fue una fase crítica del proyecto, ya que implicó la materialización del diseño conceptual en un sistema funcional que pudiera cumplir con los requisitos operativos de la pala Komatsu PC8000. Para garantizar la efectividad y seguridad del banco de calibración, se tomó en cuenta una serie de factores técnicos, estructurales y operacionales. Este proceso fue realizado siguiendo un enfoque meticuloso que aseguró que cada componente estuviera correctamente integrado y que el banco fuera capaz de soportar las altas presiones y condiciones exigidas por las válvulas hidráulicas de la pala.

### **Fases de la Construcción del Banco de Calibración**

### ***Selección de Materiales***

La elección de materiales fue uno de los aspectos más importantes en la fase de construcción. Dado que el banco de calibración debía operar a presiones de hasta 10,000 psi, se optó por materiales de alta resistencia para garantizar que el banco pudiera soportar las cargas operativas sin comprometer la seguridad ni la precisión del sistema. Los materiales seleccionados fueron:

**Acero Inoxidable.** Elegido por su resistencia a la corrosión y capacidad para soportar las altas presiones sin deformarse. El acero inoxidable también tiene una alta durabilidad, lo que lo hace adecuado para el entorno exigente de la minería.

**Aleaciones de Alta Resistencia.** Se utilizaron aleaciones especialmente diseñadas para la construcción de equipos hidráulicos, ya que ofrecen una excelente resistencia mecánica y son capaces de resistir los efectos del estrés prolongado sin fallar.

Estos materiales no solo garantizan la resistencia física del banco de calibración, sino también la seguridad a largo plazo, ya que ayudan a prevenir el desgaste prematuro de los componentes y mejoran la estabilidad estructural del banco.

### ***Fabricación de la Base***

La base del banco de calibración fue diseñada para ser robusta y estable, capaz de soportar las presiones del sistema sin presentar movimientos indeseados. La estructura metálica que constituye la base fue fabricada con el acero seleccionado, asegurando que pudiera resistir las vibraciones generadas durante el funcionamiento del banco sin comprometer la precisión de la calibración.

**Diseño Modular.** La base fue construida con un diseño modular que permite un fácil ensamblaje y la posibilidad de realizar futuras modificaciones o ampliaciones si fuera necesario.

**Soporte de Componentes.** La base no solo soporta la bomba hidráulica ZU4, sino que también alberga otros componentes esenciales como las válvulas de control, los sensores de monitoreo y las conexiones hidráulicas. Cada uno de estos componentes fue montado en posiciones estratégicas para optimizar el flujo de aceite y garantizar una calibración eficiente.

Además, se incorporaron soluciones para reducir el impacto de las vibraciones generadas por la bomba hidráulica y los actuadores, que podrían interferir con la precisión de la calibración.

### ***Montaje de Componentes Hidráulicos***

Una vez que la base estructural fue fabricada y verificada, se procedió al montaje de los componentes hidráulicos. Esta fase implicó la instalación de cada uno de los componentes esenciales para el funcionamiento del banco de calibración, que incluyen:

**Bomba ZU4 de Enerpac.** Instalación de la bomba hidráulica en el centro del banco para proporcionar el flujo de aceite necesario para la calibración de las válvulas.

**Válvulas de Control.** Colocación de las válvulas de control en ubicaciones estratégicas que permitan un flujo óptimo de aceite hacia las válvulas a calibrar.

**Sensores de Presión y Temperatura.** Instalación de los sensores en puntos clave del sistema para medir y monitorear las condiciones operativas de presión y temperatura en tiempo real.

**Manómetros Digitales.** Los manómetros fueron montados en lugares accesibles para que el operador pueda verificar la presión durante todo el proceso de calibración.

### ***Proceso de Montaje***

**Fijación de Componentes.** Los componentes fueron asegurados a la base utilizando soportes y fijaciones robustas para evitar cualquier movimiento durante las pruebas de calibración.

**Conexión Hidráulica.** Se realizaron las conexiones entre la bomba, las válvulas de control y los sensores mediante tuberías de alta resistencia, asegurando que no haya fugas y que el flujo de aceite sea eficiente y controlado.

Este proceso de montaje fue realizado por un equipo de técnicos especializados que se aseguraron de que cada componente estuviera correctamente instalado y ajustado a las especificaciones técnicas definidas durante la fase de diseño.

### ***Pruebas Iniciales de Resistencia***

Una vez que todos los componentes fueron instalados, se realizaron pruebas iniciales de resistencia para verificar que la estructura y los componentes pudieran soportar las condiciones operativas esperadas sin fallos. Estas pruebas fueron fundamentales para garantizar que el banco de calibración fuera capaz de operar de manera segura durante el proceso de calibración de las válvulas hidráulicas. Aspectos clave de las pruebas iniciales:

**Pruebas de Presión.** Se simuló el funcionamiento del banco a presiones de hasta 10,000 psi para verificar que no hubiera fugas y que la estructura pudiera soportar la carga sin deformarse.

**Pruebas de Vibración.** Se realizaron pruebas para asegurarse de que la base del banco no se viera afectada por las vibraciones generadas durante el funcionamiento del sistema, lo que podría afectar la precisión de la calibración.

**Verificación de Conexiones.** Se revisaron todas las conexiones hidráulicas para asegurar que estuvieran correctamente selladas y que el aceite fluyera sin obstrucción.

**Figura 9.**

*Modelo inicial construido*



*Nota.* Las imágenes del banco de pruebas. *Fuente.* Autoría propia.

**Figura 10.**

*Modelo inicial construido*



*Nota.* Las imágenes del banco de pruebas. *Fuente.* Autoría propia.

## Procedimiento de Uso para el Banco de Calibración

El procedimiento de uso del banco de calibración de válvulas hidráulicas es esencial para garantizar que los técnicos operen el sistema de manera segura y eficiente. A continuación, se detallan todos los pasos necesarios para llevar a cabo una calibración adecuada, desde la inspección pre-operacional hasta el registro final. Además, se incluyen las acciones y las notas de seguridad asociadas a cada paso para asegurar que los operadores sigan las buenas prácticas durante todo el proceso.

**Tabla 5.**

*Procedimiento para el uso de la herramienta de calibración de válvulas hidráulicas*

<b>Paso</b>	<b>Descripción</b>	<b>Acción</b>	<b>Notas de Seguridad</b>
1	Inspección Pre-Operacional	Revisar el nivel de aceite, verificar que no haya fugas visibles, comprobar el estado de los manómetros y asegurar que la herramienta de calibración esté correctamente conectada.	Verificar que los manómetros estén calibrados y los componentes sin fugas. Usar equipo de protección personal (EPP).
2	Encendido y Verificación de Presión	Encender la bomba hidráulica y verificar que la presión inicial en el manómetro esté dentro de los rangos adecuados.	Verificar que la bomba esté funcionando correctamente antes de continuar. Realizar la verificación de la presión con cuidado.
3	Ajuste de la Presión	Ajustar la presión utilizando el bloque de regulación indicado, asegurando que no haya sobrepresiones o fugas.	Asegurarse de realizar el ajuste con precisión para evitar fallos del sistema.

Paso	Descripción	Acción	Notas de Seguridad
4	Apertura de la Llave de Paso de Presión	Abrir la llave de paso correspondiente al bloque de la válvula que se va a calibrar.	Asegurarse de que la llave esté completamente abierta antes de continuar.
5	Calibración de la Válvula	Calibrar una válvula a la vez, asegurándose de que no haya interferencias con otras válvulas abiertas.	Verificar que la válvula primaria esté calibrada a 360 bar y la válvula SRV ajustada a 350 bar.
6	Procedimiento Específico para la Válvula PIV de Giro	Ajustar la presión de la bomba hasta 350 bar, luego calibrar el primer escalón a 330 bar, y el segundo escalón a 150 bar.	Asegurarse de que la válvula se calibra correctamente sin exceder los valores de presión especificados.
7	Cierre y Verificación Final	Cerrar la llave de paso de presión, verificar que no haya fugas y apagar la bomba de manera segura.	Comprobar que la presión regrese a los valores normales de operación antes de apagar la bomba. No dejar la bomba encendida innecesariamente.
8	Registro y Reporte	Documentar los valores ajustados y cualquier anomalía detectada durante el proceso.	Informar cualquier anomalía y registrar los valores ajustados para futuras referencias.

*Nota:* Se detalla el procedimiento para el uso de la herramienta de calibración de válvulas hidráulicas fue diseñado y validado por los autores, incluyendo pasos detallados y medidas de seguridad para garantizar una operación eficiente y segura. *Fuente.* Autoría propia.

El procedimiento de uso para el banco de calibración de válvulas hidráulicas es un conjunto de pasos sistemáticos que aseguran la calibración precisa y segura de las válvulas del sistema hidráulico de la pala Komatsu PC8000. Cada uno de estos pasos ha sido diseñado para garantizar que el proceso de calibración se realice de manera eficiente, minimizando los riesgos de error y asegurando la integridad operativa del banco de pruebas.

### **Paso 1: Inspección Pre-Operacional**

La inspección pre-operacional es crucial porque asegura que el banco de calibración se encuentre en condiciones óptimas antes de comenzar cualquier operación. La verificación de fugas, el nivel de aceite y el estado de los manómetros son elementos esenciales que, si no se revisan adecuadamente, podrían comprometer no solo la calibración precisa sino también la seguridad del personal y la longevidad de los equipos. Este paso también permite identificar cualquier posible fallo o mal funcionamiento antes de que el banco entre en operación, lo cual es fundamental para evitar accidentes y asegurar la precisión de los resultados.

### **Paso 2: Encendido y Verificación de Presión**

El encendido del sistema y la verificación de presión son pasos fundamentales para asegurar que el banco de calibración esté operando dentro de los parámetros de seguridad antes de comenzar la calibración de las válvulas. Si la presión inicial no está dentro de los valores recomendados, el banco podría estar funcionando fuera de sus rangos operativos, lo que podría afectar la precisión de la calibración o incluso generar sobrepresiones peligrosas. Este paso ayuda a ajustar rápidamente cualquier discrepancia en la presión, asegurando que el sistema se mantenga dentro de las condiciones óptimas para el proceso de calibración.

### **Paso 3: Ajuste de la Presión**

El ajuste de la presión es un paso crítico, especialmente en sistemas hidráulicos como el de la pala Komatsu PC8000, que requieren un control preciso de la presión para garantizar un funcionamiento eficiente y seguro. Durante este paso, se utiliza el bloque de regulación para asegurarse de que la presión en el sistema sea la adecuada para la calibración de las válvulas. Un ajuste impreciso de la presión podría resultar en daños a los componentes hidráulicos o en una calibración incorrecta de las válvulas. Además, el proceso de ajuste gradual minimiza el riesgo

de sobrecargas o fluctuaciones bruscas en la presión, lo que contribuye a la seguridad operativa y a la eficiencia del sistema.

#### **Paso 4: Apertura de la Llave de Paso de Presión**

La apertura de la llave de paso de presión es el paso que conecta el sistema hidráulico con las válvulas que serán calibradas. Es fundamental que se sigan las indicaciones de seguridad para asegurarse de que solo una válvula a la vez esté conectada al sistema de calibración. Esto evita que se generen interferencias entre válvulas, lo que podría alterar los resultados de la calibración. Al asegurar que la llave esté completamente abierta, se permite que el aceite fluya sin restricciones hacia la válvula, asegurando que el proceso de calibración se realice con fluidez y precisión.

#### **Paso 5: Calibración de la Válvula**

La calibración de la válvula es el núcleo del proceso. Este paso asegura que las válvulas hidráulicas estén ajustadas y funcionando dentro de los parámetros operativos requeridos. La calibración de una válvula a la vez es un enfoque que permite obtener resultados más precisos y evitar interferencias que podrían llevar a errores de calibración. El seguimiento de las presiones establecidas, como los 360 bar para la válvula primaria y 350 bar para la válvula SRV, es esencial para garantizar que las válvulas no solo estén operando de manera eficiente, sino también segura.

#### **Paso 6: Procedimiento Específico para la Válvula PIV de Giro**

La válvula PIV de giro requiere un ajuste específico debido a sus características particulares. Ajustar la presión de la bomba a 350 bar y calibrar los escalones de presión a 330 bar y 150 bar es necesario para garantizar que esta válvula opere de manera eficaz en su función de control del sistema de giro de la pala. Este procedimiento específico asegura que la válvula

PIV no solo esté calibrada correctamente, sino también que cumpla con los requerimientos de seguridad operativa sin exceder los límites de presión establecidos.

### **Paso 7: Cierre y Verificación Final**

Una vez finalizada la calibración, el cierre del sistema y la verificación final permiten confirmar que todas las válvulas han sido correctamente calibradas y que el banco de calibración ha funcionado dentro de los límites de presión y seguridad. Verificar que no haya fugas y que la presión se haya normalizado es vital para asegurar que el sistema no presente riesgos durante las fases de operación posterior. Además, este paso asegura que el banco de calibración se pueda apagar de forma segura, minimizando el riesgo de sobrepresión o de fallos en los componentes.

### **Paso 8: Registro y Reporte**

El registro de datos es crucial para tener un historial completo del proceso de calibración, lo que permite monitorear el rendimiento del sistema a lo largo del tiempo y facilitar la determinación de patrones en el desempeño de las válvulas. Documentar los valores ajustados y las anomalías detectadas permite que los técnicos y el personal de mantenimiento puedan resolver problemas de manera rápida en el futuro y tener un control preciso de las calibraciones realizadas. Esta documentación también puede ser crucial para cumplir con las normativas de seguridad y auditorías internas.

El procedimiento de uso del banco de calibración de válvulas hidráulicas está diseñado para ser un proceso meticuloso y seguro, que asegura que las válvulas hidráulicas de la pala Komatsu PC8000 estén calibradas de manera eficiente y segura. Cada paso tiene un objetivo claro, y el cumplimiento riguroso de cada fase del procedimiento es crucial para evitar fallos en el sistema, asegurar la precisión de las calibraciones y mantener la seguridad en el entorno de trabajo.

El enfoque detallado en las acciones y las notas de seguridad durante todo el procedimiento no solo garantiza que las calibraciones sean precisas, sino también que los técnicos sigan los protocolos de seguridad necesarios para protegerse a sí mismos y el equipo. La documentación precisa de todo el proceso también permite mantener un control adecuado y facilitar la solución de problemas en caso de que se presenten anomalías en las calibraciones futuras.

## Conclusiones

El proyecto desarrollado para el diseño, construcción y validación del banco de calibración de válvulas hidráulicas para la pala Komatsu PC8000 ha sido un proceso integral y detallado que abarca una variedad de aspectos técnicos y operativos. A través de cada fase, desde la recopilación de requisitos hasta las pruebas finales de funcionamiento, se logró crear una herramienta eficiente, segura y altamente funcional, que mejora la precisión en la calibración de las válvulas hidráulicas utilizadas en la maquinaria de minería.

La fase de recopilación de requisitos técnicos fue esencial para establecer una base sólida sobre la cual construir el banco de calibración. Los parámetros operativos, como la presión, el caudal de aceite y la temperatura del fluido, fueron claves para asegurar que el banco de calibración pudiera operar dentro de los rangos adecuados para la pala Komatsu PC8000. El análisis detallado de los manuales técnicos del fabricante y las normativas internacionales (ISO 4413:2010) permitió establecer las especificaciones exactas que el banco debía cumplir. El diseño conceptual del banco se alineó perfectamente con estas especificaciones, garantizando que el sistema fuera compatible con las válvulas hidráulicas de la pala y que las características de seguridad y eficiencia estuvieran presentes desde el inicio.

Una de las decisiones más relevantes en la fase de construcción fue la selección de materiales. El uso de acero inoxidable y aleaciones de alta resistencia garantizó que el banco de calibración fuera capaz de soportar las altas presiones (hasta 10,000 psi) que se generan en el proceso de calibración. Estos materiales no solo proporcionaron la resistencia necesaria para las condiciones extremas de la minería, sino también una mayor durabilidad y seguridad. La elección de la bomba hidráulica ZU4 de Enerpac, los sensores de presión y temperatura, y las

válvulas de control aseguraron que el banco de calibración fuera capaz de operar con una precisión extrema, lo cual es crucial para una correcta calibración de las válvulas.

La base estructural del banco de calibración fue diseñada de manera modular, lo que no solo permitió un ensamblaje eficiente, sino que también brindó la flexibilidad para realizar futuras modificaciones si fuera necesario. La estabilidad estructural fue un factor clave para garantizar que el banco no presentara movimientos indeseados durante el proceso de calibración, lo que podría afectar la precisión de los resultados. Las pruebas de resistencia realizadas durante esta fase demostraron que la estructura y los componentes hidráulicos pudieron soportar las condiciones operativas de forma exitosa, lo que validó la robustez del diseño y la seguridad del sistema.

La fase de validación física y pruebas operativas del banco de calibración demostró que el sistema es capaz de operar segura y eficientemente bajo las condiciones de trabajo reales de la mina. Durante las pruebas de presión y temperatura, se verificó que el banco mantuviera un rendimiento estable dentro de los límites operativos y que los sensores proporcionaran lecturas precisas. El ajuste de presión se realizó de manera exitosa, asegurando que las válvulas hidráulicas se calibraran de acuerdo con los valores especificados de presión (360 bar para la válvula primaria y 350 bar para la válvula SRV). La verificación final confirmó que el banco de calibración es capaz de realizar el proceso de calibración de válvulas de forma precisa y sin poner en riesgo la seguridad del sistema o de los operadores.

El desarrollo del procedimiento de uso fue otro componente clave que garantiza que el banco de calibración sea operado de manera segura y eficiente. Al proporcionar instrucciones claras y detalladas para cada paso del proceso de calibración, desde la inspección pre-operacional hasta el registro final, se asegura que los operadores sigan un enfoque sistemático que minimice

los riesgos de error. El procedimiento detallado también incluye las acciones de seguridad necesarias, lo que reduce el riesgo de accidentes durante la operación del banco de calibración. Las notas de seguridad fueron incluidas en cada paso para garantizar que los técnicos no solo sigan los procedimientos técnicos correctos, sino también para asegurar que el banco se utilice de forma responsable y segura.

El registro y reporte de los valores ajustados y cualquier anomalía detectada durante el proceso de calibración son esenciales para garantizar la transparencia y el control del proceso de mantenimiento. Estos registros no solo proporcionan una base de datos para futuras calibraciones, sino que también ayudan a identificar cualquier tendencia o patrón que pueda requerir atención. La documentación detallada es fundamental para el mantenimiento preventivo y permite a los técnicos realizar ajustes rápidos si es necesario. La capacidad de registrar los datos y almacenar los informes también proporciona una base sólida para la mejora continua del sistema, lo que contribuye a optimizar el proceso de calibración y a mantener un alto nivel de confiabilidad en el funcionamiento de la pala Komatsu PC8000.

El banco de calibración no solo garantiza que las válvulas hidráulicas estén calibradas correctamente, sino que también contribuye significativamente a la seguridad operacional. Al operar dentro de los parámetros de presión y temperatura adecuados, el sistema reduce el riesgo de fallos hidráulicos que podrían generar daños en la maquinaria o poner en peligro a los operadores. La calibración precisa también mejora la eficiencia del proceso de mantenimiento, ya que garantiza que las válvulas operen a su máximo rendimiento, lo que contribuye a minimizar tiempos de inactividad y mejora la productividad general de las operaciones mineras.

El proyecto del banco de calibración de válvulas hidráulicas para la pala Komatsu PC8000 ha sido un éxito rotundo, ya que no solo cumple con los requisitos técnicos establecidos,

sino que también asegura la seguridad, precisión y eficiencia en el proceso de calibración de válvulas. Desde el diseño conceptual hasta la validación final, cada fase fue ejecutada con un enfoque riguroso y meticuloso, lo que asegura que el sistema sea fiable y duradero en el entorno desafiante de la minería.

Este banco de calibración no solo representa un avance en la optimización del mantenimiento hidráulico, sino que también establece un nuevo estándar en términos de seguridad y eficiencia operativa para la minería. La documentación detallada y los procedimientos claros aseguran que el banco se utilice correctamente, reduciendo el riesgo de errores humanos y contribuyendo a la mejora continua de los procesos de mantenimiento en la mina Drummond Ltd.

El cumplimiento con las normativas de seguridad y la fiabilidad operativa del sistema aseguran que este banco de calibración no solo sea un activo valioso, sino que también mejore las condiciones de trabajo seguro y eficiente para los operadores, contribuyendo a la sostenibilidad y rentabilidad de las operaciones mineras a largo plazo.

## **Recomendaciones**

El proyecto del banco de calibración de válvulas hidráulicas para la pala Komatsu PC8000 ha logrado establecer una base sólida para la calibración eficiente y segura de las válvulas hidráulicas en un entorno minero. Sin embargo, como en cualquier sistema técnico, siempre existe espacio para la mejora continua y la adaptación a nuevas necesidades. A continuación, se presentan recomendaciones clave para futuras aplicaciones, mejoras y posibles trabajos relacionados con el proyecto.

### **Implementación de Tecnologías de Monitoreo Avanzado**

Una de las áreas que podría beneficiarse de mejoras futuras es la implementación de tecnologías de monitoreo remoto y sensores inteligentes. Con el fin de aumentar la eficiencia operativa y reducir el riesgo de fallos imprevistos, se recomienda:

#### ***Integración de IoT (Internet de las Cosas)***

Los sensores de presión y temperatura podrían conectarse a un sistema de monitoreo remoto que permita supervisar en tiempo real los parámetros operativos del banco de calibración. Esto permitiría a los operadores y al personal de mantenimiento recibir alertas sobre posibles fallos o anomalías antes de que se conviertan en problemas graves.

#### ***Análisis Predictivo de Fallos***

Utilizando los datos recopilados por los sensores, se podrían aplicar modelos de análisis predictivo que identifiquen patrones de desgaste en las válvulas o en los componentes del banco, lo que permitiría realizar mantenimientos preventivos y reemplazos programados para evitar tiempos de inactividad imprevistos.

#### ***Integración con Sistemas de Gestión de Mantenimiento***

La conexión del banco de calibración con un sistema de gestión de mantenimiento (CMMS, por sus siglas en inglés) permitiría una mejor gestión de los registros de calibración y un seguimiento más eficiente de las intervenciones realizadas.

### **Mejora en la Capacitación y Entrenamiento de Técnicos**

El éxito del banco de calibración no solo depende de su diseño y construcción, sino también de la formación adecuada de los técnicos encargados de su operación. Por lo tanto, es fundamental:

#### ***Programas de Capacitación Continua***

Desarrollar programas de formación regulares para los técnicos, enfocados en el mantenimiento preventivo, la gestión de fallos y las mejores prácticas para la calibración de válvulas hidráulicas. Estos programas pueden incluir simulaciones virtuales que permitan a los técnicos familiarizarse con diferentes escenarios sin riesgo.

#### ***Certificación de Técnicos***

Implementar un sistema de certificación para los técnicos que utilicen el banco de calibración. Esto garantizaría que los operadores cuenten con un conocimiento profundo de los procedimientos operativos y de seguridad, lo que a su vez mejoraría la calidad y seguridad del proceso de calibración.

#### ***Manual Interactivo o Digitalizado***

Se podría mejorar el manual de procedimientos convirtiéndolo en una plataforma digital interactiva. Esto permitiría a los técnicos acceder a la información de manera más rápida y a través de dispositivos móviles, con la posibilidad de incluir videos tutoriales y comprobaciones interactivas para facilitar la comprensión del proceso.

### **Optimización del Diseño para Adaptarse a Nuevas Tecnologías y Maquinaria**

El banco de calibración fue diseñado específicamente para las válvulas hidráulicas de la pala Komatsu PC8000, pero con el paso del tiempo, es probable que se integren nuevos equipos o tecnologías a la flota de maquinaria minera. Por ello, se recomienda:

### ***Diseño Modular y Escalable***

A medida que la maquinaria evoluciona, el banco de calibración debe ser capaz de adaptarse a diferentes tipos de válvulas y sistemas hidráulicos. Se recomienda que el banco esté diseñado de manera modular, con la capacidad de agregar o sustituir componentes sin necesidad de reconstruir el sistema entero.

### ***Compatibilidad con Sistemas Hidráulicos Avanzados***

Los avances tecnológicos en las válvulas hidráulicas pueden requerir nuevas capacidades de calibración. Actualizar el sistema de control y los sensores para hacer frente a nuevas presiones o tipos de válvulas hidráulicas podría ser una mejora futura esencial. Hay que asegurar que el banco sea capaz de calibrar nuevas tecnologías asegurará su relevancia a largo plazo.

### ***Implementación de un Sistema de Adaptadores Universales***

Desarrollar un sistema de adaptadores universales para que el banco pueda calibrar no solo las válvulas de la pala Komatsu PC8000, sino también otros tipos de válvulas hidráulicas utilizadas en maquinaria similar o en nuevas generaciones de equipos.

### ***Desarrollo de Capacidades de Calibración Automática***

El banco de calibración actual requiere de intervención manual para ajustar y verificar las válvulas, lo cual es necesario, pero se podría optimizar aún más mediante la automatización de ciertas tareas:

### ***Automatización del Proceso de Calibración***

Desarrollar un sistema automático de ajuste de presión y monitorización de válvulas que permita realizar la calibración sin intervención manual constante. Este tipo de automatización no solo mejoraría la eficiencia, sino que también reduciría el margen de error humano en los ajustes.

### ***Interfaz de Usuario con Controles Automáticos***

Crear una interfaz gráfica de usuario (GUI) en la que los técnicos puedan ingresar los parámetros deseados y recibir resultados automáticos con ajustes automáticos de presión y calibración. Esta interfaz podría también incluir sistemas de retroalimentación en tiempo real para asegurar que las calibraciones se realicen correctamente.

### ***Desarrollo de Calibración Remota***

Integrar una función de calibración remota mediante un sistema de control que permita realizar ajustes sin tener que estar físicamente en el sitio. Esta mejora facilitaría la gestión de múltiples bancos de calibración en diferentes ubicaciones, optimizando el tiempo de los operadores.

### **Mejora de la Integración con Sistemas de Control de la Mina**

El banco de calibración de válvulas debe ser parte de un sistema más amplio de gestión de equipos y mantenimiento dentro de la mina. Algunas recomendaciones incluyen:

#### ***Conexión con el Sistema de Gestión de Activos de la Mina***

Integrar el banco de calibración con el sistema de gestión de activos de la mina permitirá una mejor planificación de mantenimientos preventivos y facilitará la programación de calibraciones regulares.

#### ***Monitoreo en Tiempo Real a Nivel de la Mina***

Desarrollar un sistema centralizado de monitoreo que pueda supervisar no solo el banco de calibración, sino también las condiciones operativas de las válvulas y sistemas hidráulicos de toda la flota de maquinaria de la mina.

### ***Automatización de Informes***

Conectar el banco de calibración con un sistema de informes automáticos que genere reportes sobre el estado de las válvulas calibradas y cualquier anomalía detectada. Esto facilitaría la gestión de mantenimiento y reduciría los tiempos de inactividad.

Las recomendaciones mencionadas tienen como objetivo no solo mejorar la eficiencia y seguridad del proceso de calibración, sino también garantizar que el banco de calibración se mantenga actualizado y relevante a medida que evoluciona la maquinaria minera y las tecnologías hidráulicas. Implementar estas mejoras ayudará a la optimización del rendimiento, la reducción de costos operativos y el aumento de la fiabilidad del sistema, contribuyendo de manera significativa al éxito a largo plazo de las operaciones mineras en la mina Drummond Ltd.

### Referencias Bibliográficas

- American National Standards Institute (ANSI). (2012). *Hydraulic Fluid Power – Safety Requirements for Systems and Components (ANSI/ISO 4413-2012)*.
- Barrantes, P. (2014). *Enfoque y Aplicación de Sistemas Hidráulicos en la Industria Minera*. Editorial Académica Española.
- Bolton, W. (2015). *Sistemas de instrumentación y control* (2ª ed.). Elsevier.
- Bucher Hydraulics. (2017). *Hydraulic Maintenance Handbook*. Bucher Hydraulics.
- Cengel, Y. A. (2006). *Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones*. McGraw-Hill.
- Davis, R. T. (2013). *The Mechanics of Hydraulic Systems: Design and Applications*. Elsevier.
- Delgado, J. F. (2017). *Tecnologías Emergentes en la Hidráulica: Aplicaciones en la Minería y la Construcción*. Springer.
- Enerpac. (2015). *Zu4 Hydraulic Pumps – Operating Manual*. Enerpac.
- Enerpac. (2020). *Hydraulic Systems and Components*. Enerpac.
- Fitzgerald, M. (2016). *Sistemas hidráulicos industriales y su mantenimiento*. McGraw-Hill.
- Harris, B. (2017). *Introducción a la mecánica de fluidos*. Wiley.
- Hughes, M. P., & Sanders, M. B. (2016). *Maintenance and Operation of Hydraulic Equipment*. Prentice Hall.

- ISO. (2010). *ISO 4413:2010 Sistemas hidráulicos de potencia: Normas generales y requisitos de seguridad para sistemas y sus componentes*. Organización Internacional de Normalización.
- ISO 4413:2010. (2010). *Hydraulic fluid power – General rules and safety requirements for systems and their components*. International Organization for Standardization.
- Juvinall, R. C., & Marshek, K. M. (2017). *Fundamentals of machine component design* (6th ed.). Wiley.
- Liu, Z., & Wang, Q. (2016). *Hydraulic System Design and Maintenance for Heavy Equipment*. Springer.
- Merritt, H. E. (2014). *Hydraulic Control Systems*. Wiley-Interscience.
- Shigley, J. E., & Mischke, C. R. (2008). *Mechanical engineering design* (8th ed.). McGraw-Hill.
- Shilling, J. M. (2011). *Fundamentals of Fluid Power Control*. MIT Press.
- Vázquez, M. J., & Rodríguez, P. (2018). *La Calibración de Válvulas Hidráulicas: Procedimientos y Buenas Prácticas*. Editorial Alfa.
- Wiley. (2019). *Practical Hydraulic Systems: Design, Maintenance, and Troubleshooting*. Wiley.