

Implementación de un sistema de monitoreo en tiempo real de presión e inclinación para el izaje del mástil en equipos NOV Rapid Rig 13

Implementation of a Real-Time Pressure and Tilt Angle Monitoring System for Mast Hoisting in NOV Rapid Rig 13 Equipment

Ing. Elkin Adoniz Mora Castañeda¹, Ph.D. Oscar Javier Suarez Sierra²
Ph.D. Rocco Tarantino Alvarado²

¹ Universidad de Pamplona, Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Maestría en Controles Industriales, Pamplona, Norte de Santander, Colombia.

² Universidad de Pamplona, Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Ingeniería Mecatrónica, Grupo de Investigación Automatización y Control (A&C), Pamplona, Norte de Santander, Colombia.

Correspondencia: oscar.suarez@unipamplona.edu.co

Recibido: 07 febrero 2025. Revisado: 27 mayo 2025. Aceptado: 19 junio 2025. Publicado: 30 julio 2025.

Cómo citar: E. A. Mora Castañeda, O. J. Suarez Sierra, y R. Tarantino Alvarado, «Implementación de un sistema de monitoreo en tiempo real de presión e inclinación para el izaje del mástil en equipos NOV Rapid Rig 13», RCTA, vol. 2, n.º 46, pp. 160–170, jul. 2025.
Recuperado de <https://ojs.unipamplona.edu.co/index.php/rcta/article/view/4115>

Esta obra está bajo una licencia internacional
Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0.



Resumen: este artículo presenta la implementación de un sistema de monitoreo en tiempo real para el izaje del mástil en equipos NOV Rapid Rig 13 utilizando una arquitectura distribuida con niveles de adquisición, procesamiento y visualización local. El sistema registra simultáneamente datos de presión hidráulica e inclinación angular, permitiendo analizar el comportamiento dinámico de los cilindros durante la operación de izaje. A partir de estos datos se construyó una gráfica de presión estática que relaciona presión e inclinación, representando el modelo teórico de un cilindro hidráulico de tres etapas. Esta curva permitió identificar transiciones críticas y desviaciones operativas, sirviendo como base para definir umbrales de alarma y mejorar la supervisión; lo cual le permite al operador tomar decisiones informadas y seguras. Los resultados obtenidos no solo mejoran la seguridad del proceso de izaje del mástil, sino que también sientan las bases para la futura automatización y la implementación de estrategias de mantenimiento predictivo en sistemas hidráulicos aplicados a la perforación.

Palabras clave: izaje del mástil, cilindro hidráulico, sistema hidráulico, monitoreo en tiempo real, perforación en hidrocarburos.

Abstract: this paper presents the implementation of a real-time monitoring system for mast hoisting operations in NOV Rapid Rig 13 equipment, using a distributed architecture with local data acquisition, processing, and visualization layers. The system simultaneously records hydraulic pressure and angular inclination data, enabling analysis of the dynamic behavior of hydraulic cylinders during hoisting operations. This data generated a static pressure curve to correlate pressure and inclination, representing the theoretical model of a three-stage hydraulic cylinder. This curve identified critical transitions and operational deviations, serving as the basis for defining alarm thresholds and enhancing operational

oversight—empowering operators to make informed, safety-driven decisions. The results improve hoisting safety and establish a foundation for future automation and predictive maintenance strategies in hydraulic systems applied to drilling operations.

Keywords: mast hoisting, hydraulic cylinder, hydraulic system, real-time monitoring, hydrocarbon drilling.

1. INTRODUCCIÓN

El sistema de izaje en los equipos de perforación desempeñan un papel esencial en la estabilidad y seguridad operativa durante las fases de montaje y desmontaje del mástil. Su diseño debe responder a condiciones exigentes, incluyendo cargas dinámicas, vibraciones, esfuerzos mecánicos repetitivos y exposición a ambientes severos. En particular, el mástil —componente vertical que soporta y alinea la sarta de perforación— está sujeto a estándares técnicos como la norma API 4F [1], que establece criterios para garantizar su integridad estructural frente dichas cargas estructurales [2]. Sin embargo, más allá del diseño, su comportamiento real durante las maniobras de izaje depende críticamente del sistema hidráulico que lo impulsa y del control ejercido sobre este.

Las operaciones de elevación del mástil no están exentas de riesgos. Casos documentados, como el descenso descontrolado ocurrido en 2021 en un equipo de perforación NOV Rapid Rig 13 [3], evidencian la fragilidad de procedimientos que dependen exclusivamente de la experiencia del operador y de controles manuales sin monitoreo continuo [4]. Estos incidentes no solo generan pérdidas materiales, sino que exponen al personal a condiciones inseguras que podrían evitarse con sistemas de monitoreo y supervisión.

En respuesta a estas vulnerabilidades, la industria ha introducido mejoras en las rutinas de mantenimiento, como la purga periódica de cilindros hidráulicos, inspecciones no destructivas y protocolos más exigentes de trazabilidad técnica [5]. Sin embargo, estas medidas correctivas y preventivas continúan siendo insuficientes sin una visualización en tiempo real del estado de las variables críticas. La ausencia de retroalimentación inmediata sobre presiones y ángulos de inclinación dificulta la detección de anomalías incipientes, aumentando el riesgo de fallos operativos; es así como los trabajos [6]-[8] destacan que este tipo de limitaciones incrementa la posibilidad de errores humanos y afecta no solo la estabilidad del mástil, sino también la de la subestructura que lo soporta.

En el ámbito investigativo, se han propuesto diversas soluciones para mejorar el control y

monitoreo de sistemas hidráulicos, especialmente en configuraciones de cilindros múltiples. En [9] y [10] han trabajado en esquemas de control avanzado mediante redes neuronales, con resultados prometedores en términos de sincronización, estabilidad y resistencia a perturbaciones. Complementariamente, en [11] han demostrado que el análisis de datos de presión permite implementar estrategias de mantenimiento predictivo, mientras que en [8] plantean el uso de algoritmos robustos como diferenciadores de Levant para aumentar la confiabilidad en entornos con alta incertidumbre.

Considerando los resultados mencionados anteriormente, el sistema propuesto representa un avance hacia la automatización parcial del izaje del mástil, permitiendo el monitoreo en tiempo real de la presión y el ángulo de inclinación, la identificación de eventos críticos y la activación automática de alarmas ante anomalías durante el izaje. El artículo establece así una base técnica sólida para mejorar la toma de decisiones operativas, aumentar la seguridad y reducir los tiempos improductivos en actividades de alto riesgo en la industria de perforación.

El contenido de este artículo se organiza en seis secciones: la primera presenta el contexto general de la investigación; la segunda resume los principales antecedentes y desarrollos previos; la tercera describe la metodología aplicada; la cuarta se enfoca en los resultados obtenidos y su análisis; la quinta expone la discusión y la sexta, las conclusiones derivadas del artículo.

2. ESTADO DEL ARTE

A pesar del papel crucial que cumple el izaje del mástil en las operaciones de perforación, la producción científica centrada en el monitoreo activo de este proceso es todavía incipiente, especialmente cuando se trata de variables críticas como la presión hidráulica o la inclinación estructural durante la maniobra.

Sin embargo, se destacan antecedentes como un caso representativo que fue el descenso no controlado del mástil en 2021 en un equipo de perforación, donde la acumulación de aire en el

cilindro hidráulico ODS desencadenó el evento. Este incidente impulsó ajustes en las prácticas de mantenimiento, como la mejora de los protocolos de purga y el fortalecimiento de la trazabilidad técnica [3]. Si bien existían documentos técnicos sobre el dimensionamiento estructural del mástil elaborados conforme a normativas como API 4F [12], no se había contemplado el monitoreo dinámico en campo como parte del sistema de control.

En la literatura internacional, diversos autores han abordado la problemática desde distintas perspectivas. En [6] se analizaron mecanismos de falla en cilindros de izaje y destacaron la necesidad de sistemas de monitoreo robustos que permitan anticipar comportamientos anómalos. Así mismo, en [13] evidenciaron cómo fallos en anclajes, diseños deficientes o inspecciones inadecuadas pueden comprometer seriamente la estabilidad estructural del mástil. Por otra parte, desde una perspectiva de control avanzado, en [8] propusieron un modelo basado en retroalimentación de salida para cilindros electrohidráulicos asimétricos, el cual mostró mejoras significativas en la capacidad de rechazo frente a perturbaciones externas.

Complementando lo anterior, en [14] aplicaron el enfoque de redes complejas para estudiar las causas que contribuyen a accidentes durante operaciones de izaje. Su análisis reveló interacciones no lineales entre errores humanos, fallas mecánicas y condiciones ambientales que, en conjunto, aumentan el nivel de riesgo en estas maniobras. Por su parte, en [7] desarrollaron una revisión sistemática sobre diagnóstico y pronóstico en cilindros hidráulicos, en la que se subraya la importancia creciente de las estrategias de mantenimiento predictivo basadas en monitoreo avanzado.

Recientemente, se han explorado soluciones basadas en inteligencia artificial. En [9] propusieron un esquema de control síncrono asistido por redes neuronales para sistemas de doble cilindro, con el objetivo de reducir las fuerzas internas excesivas y mejorar la sincronización en escenarios dinámicos. Mientras que en [10] también trabajaron con redes neuronales RBF difusas integradas a controladores PID, logrando mejoras sustanciales en precisión y estabilidad de sistemas de control de fuerza/posición, incluso bajo condiciones no lineales y con perturbaciones externas. Finalmente, en [11] evidenciaron que el análisis de la presión hidráulica puede utilizarse con fines predictivos, identificando tendencias de falla antes de que se manifiesten, lo cual permite optimizar el mantenimiento y reducir riesgos operativos.

A pesar del valor de estas investigaciones, la mayoría de ellas se han desarrollado en ambientes simulados o en aplicaciones industriales distintas al sector de perforación terrestre. Hasta el momento, no se ha documentado un enfoque que combine, en una única solución, el monitoreo en tiempo real tanto de la presión en cilindros hidráulicos como de la inclinación del mástil durante el izaje. En este sentido, el presente artículo busca contribuir a ese vacío, propone un sistema de monitoreo que permite la detección temprana de eventos críticos durante el proceso de izaje del mástil y establece las bases para el desarrollo futuro de modelos predictivos y sistemas de automatización adaptados a las condiciones operativas de los equipos de perforación en campo.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Descripción del problema

En los equipos de perforación tipo NOV Rapid Rig 13, el levantamiento del mástil se lleva a cabo mediante dos cilindros hidráulicos de doble efecto y tres etapas, montados respectivamente en los extremos DS (lado del perforador) y ODS (lado opuesto del perforador) del equipo [15]. El proceso de izaje es ejecutado manualmente por el operador, quien desde la consola acciona dos palancas independientes, cada una asociada a una válvula proporcional que regula el caudal hidráulico enviado a los cilindros. Aunque este método resulta funcional, en la práctica se han identificado limitaciones tanto en el plano técnico como en el operativo.

Una de las principales dificultades radica en la asincronía entre los cilindros provocada por el control manual no coordinado, lo que genera desbalances de presión que pueden derivar en inclinaciones transversales del mástil durante el ascenso. Estas desviaciones implican una redistribución irregular de las fuerzas en la estructura, afectando la estabilidad global del sistema y aumentando los riesgos de daño estructural. A esto se suma que la ubicación de la consola de control no permite al operador una visibilidad directa del mástil en su eje transversal como se observa en la Fig. 1. Como resultado, se requiere el apoyo de un segundo trabajador que, ubicado frente al equipo, emite señales visuales o manuales para indicar ajustes. Este esquema de trabajo genera dependencia de la comunicación entre operarios, incrementa la probabilidad de errores humanos y reduce la eficiencia del procedimiento de izaje.



Fig. 1. Perspectiva del operador en los mandos de izaje del mástil – limitaciones de visibilidad en la nivelación transversal.
Fuente: Autores.

La presión hidráulica es un indicador clave del comportamiento interno de los cilindros, y su monitoreo continuo es fundamental para detectar condiciones anómalas como sobreesfuerzos, caídas abruptas de presión, pérdidas por fugas internas o diferencias entre cámaras de trabajo. Del mismo modo, la inclinación transversal del mástil actúa como un parámetro externo que refleja la sincronía o desbalance entre ambos cilindros. La integración de estos dos tipos de datos permite no solo monitorear la operación en tiempo real, sino también establecer criterios técnicos para identificar desalineaciones, prevenir sobrecargas, evaluar la eficiencia de la maniobra y detectar desviaciones estructurales que puedan comprometer la estabilidad del sistema.

3.2 Metodología para solución del problema

El presente artículo se enmarca en la investigación aplicada, según la definición establecida en el Manual de Frascati [16], dado que se orienta al diseño, desarrollo e implementación de una solución tecnológica específica para resolver un problema operativo concreto. La Fig. 2 presenta un esquema de las fases metodológicas desarrolladas en este trabajo para el diseño, implementación y validación del sistema de monitoreo propuesto.



Fig. 2. Diagrama de flujo de las fases metodológicas para el diseño, implementación y prueba del sistema de monitoreo.
Fuente: Autores.

3.2.1 Diseño del Sistema de Monitoreo

El diseño del sistema de monitoreo se fundamentó en la selección de componentes industriales robustos, precisos y de rápida integración, enfocados en cumplir con los requisitos técnicos del entorno operativo. La caracterización de sensores, controladores y la interfaz de usuario se realizó bajo criterios de precisión, latencia, compatibilidad y condiciones ambientales.

Para la medición del ángulo de inclinación del mástil, se seleccionó un sensor biaxial SICK TMM88B-ALC090, capaz de detectar ángulos de hasta $\pm 90^\circ$ con una resolución de $0,01^\circ$ y una precisión típica de $\pm 0,1^\circ$. Su carcasa compacta, clasificación IP67 y rango de operación entre -40°C y $+80^\circ\text{C}$ lo hacen adecuado para ambientes industriales exigentes. Una ventaja clave del dispositivo es su capacidad de configuración mediante el programador PGT-12-Pro, lo que permitió ajustar el punto cero y redefinir el rango de medición. Se configuró específicamente para concentrar su salida de $0-10\text{ V}$ en un rango operativo reducido de -15° a $+15^\circ$ en el eje transversal, y 0° a $+90^\circ$ en el eje longitudinal, optimizando así la sensibilidad y resolución del sistema sin necesidad de modificar el hardware [17].

La medición de presión en los cilindros hidráulicos del sistema de izaje del mástil se llevó a cabo mediante transmisores Trafag EPI 8287, diseñados para operar hasta 3600 psig ($\sim 250\text{ bar}$). Estos dispositivos ofrecen señal de salida de $4-20\text{ mA}$, precisión típica de $\pm 0,3\%$ F.S., protección IP65, y operación en rangos de temperatura de -40°C a $+125^\circ\text{C}$, con resistencia a vibraciones de hasta 25 g. Su elección respondió a criterios de estabilidad, exactitud y resistencia mecánica en campo [18].

El sistema de control se estructuró sobre un PLC Delta DVP20SX2, el cual contiene cuatro entradas y dos salidas analógicas, junto con una memoria de 16 k pasos, inmunidad electromagnética y expansión de E/S. Se privilegió su integración nativa con el software de desarrollo de lógica *ladder* y su compatibilidad con dispositivos industriales estandarizados [19].

La interfaz hombre-máquina (HMI) seleccionada fue la Delta DOP-107EG, una pantalla táctil de 7" que opera en conjunto con el PLC a través del protocolo RS-485 Modbus RTU. Esta HMI permitió implementar visualización gráfica, alarmas, registro de datos y despliegue de tendencias mediante el entorno DIAScreen, una solución SCADA embebida de uso libre [20].

El análisis de latencia total del sistema —sumando

los tiempos de respuesta de sensores, escaneo del PLC y refresco de pantalla— arrojó un tiempo estimado entre 120 y 200 ms, cumpliendo con los criterios de monitoreo en tiempo real tipo *soft real-time* (<500 ms). Este rendimiento garantiza una supervisión efectiva del izaje sin afectar la capacidad de reacción del operador.

La Fig. 3 presenta el diagrama P&ID del sistema de monitoreo diseñado, mostrando las conexiones principales entre sensores, PLC, HMI y elementos hidráulicos.

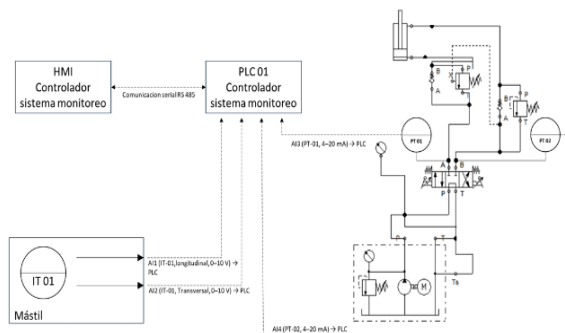


Fig. 3. Diagrama P&ID del sistema de monitoreo.

Fuente: Autores.

3.2.2 Construcción e implementación del sistema de monitoreo

Durante la construcción del sistema de monitoreo para el izaje del mástil, se priorizó el cumplimiento de los requisitos técnicos establecidos en el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE), garantizando una instalación segura y conforme con la normativa vigente en Colombia. Asimismo, se tomaron como referencia los lineamientos del *National Electrical Code* (NEC – NFPA 70), ampliamente adoptado en instalaciones industriales *oil & gas*, con el fin de asegurar altos estándares de protección eléctrica y confiabilidad operativa.

Una vez completada la integración del sistema como se visualiza en la Fig. 4, se llevaron a cabo pruebas funcionales bajo los protocolos de seguridad definidos por la organización. El procedimiento se inició con la gestión de autorizaciones, donde se incluyó documentación técnica detallada sobre las intervenciones realizadas en el sistema hidráulico, acompañada de un Análisis de Trabajo Seguro que permitió identificar peligros potenciales y establecer controles preventivos. Posteriormente, se tramitó el permiso de trabajo correspondiente, validado por las autoridades internas.



Fig. 4. Sistema de monitoreo de izaje de mástil.

Fuente: Autores.

La instalación en campo del sistema comprendió la adecuación de los puntos de medición de presión en los cilindros DS y ODS del equipo NOV Rapid Rig 13, utilizando acoples rápidos de alta presión para asegurar conexiones firmes y confiables como se visualiza en la Fig. 5. Con el mástil posicionado y asegurado sobre la subestructura, se procedió al montaje del sensor de inclinación, complementado con una inspección visual previa para validar las condiciones estructurales antes del inicio del proceso de izaje.



Fig. 5. Sensores de presión instalados en salida de las válvulas de la consola del "mast raising".

Fuente: Autores.

Con el sistema de monitoreo conectado en campo, se verificó la correcta operatividad de los sensores y la interfaz de visualización. Antes de dar inicio al izaje del mástil, se ejecutó una revisión integral de seguridad operacional, en la que se repasaron riesgos asociados y protocolos de respuesta ante emergencias, conforme a los procedimientos establecidos por la compañía [4]. Durante la maniobra, se registraron y visualizaron en tiempo

real las variables críticas —presión hidráulica e inclinación angular— lo que permitió evaluar *in situ* la precisión de las mediciones y la capacidad de respuesta del sistema ante los cambios dinámicos del proceso.

4. RESULTADOS

4.1 Gráfica de presión estática

La gráfica de presión estática fue construida a partir de los valores mínimos registrados en condiciones sin movimiento, reflejando el comportamiento teórico ideal de la presión de los cilindros hidráulicos en función del ángulo de inclinación longitudinal del mástil. Esta representación sirve como punto de referencia dentro del fenómeno de histéresis observado durante el izaje del mástil, ya que las presiones reales en operación dinámica tienden a mantenerse ligeramente por encima de los valores estáticos estimados.

Debido a la complejidad geométrica del mástil y la dificultad para determinar teóricamente su peso y su centro de masa, se optó por una medición experimental para obtener el peso como se muestra la Fig. 6, para ello, se tomaron valores de campo utilizando grúas telescópicas con sistemas LMI (Load Moment Indicator) calibrados de donde se extrajeron los pesos de la carga, garantizando datos confiables.



Fig. 6. Izaje de mástil mediante grúas telescópicas, procedimiento usado para tomar valor de peso del mástil del NOV rapid Rig 13.

Fuente: Autores.

Basado en el procedimiento anterior, la Fig. 7 presenta el análisis geométrico de las distancias involucradas, mostrando la posición de los cilindros y los ángulos.

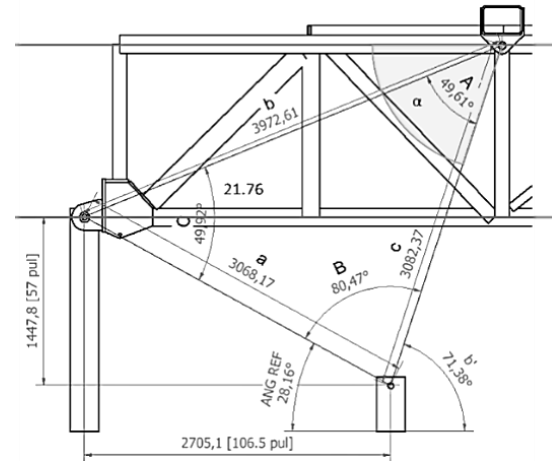


Fig. 7. Diagrama de la geometría del sistema de levante del mástil, mostrando la posición de los cilindros, los ángulos y las distancias involucradas en el movimiento.

Fuente: [12].

Así mismo, para el cálculo de las fuerzas se realizó un análisis de fuerzas y momentos a través de un diagrama de cuerpo libre simplificado como se ilustra en la Fig. 8, considerando la sumatoria de momentos igual a cero, integrando factores como la ubicación del centro de masa y los brazos de palanca de las fuerzas actuantes.

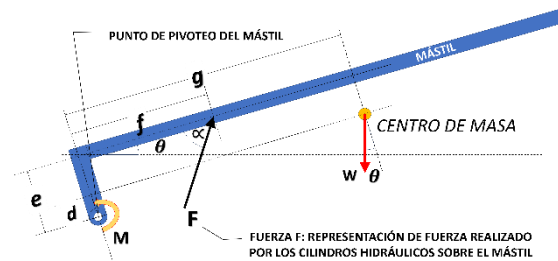


Fig. 8. Diagrama de cuerpo libre para el análisis de la dinámica de movimiento del mástil, mostrando las fuerzas y momentos involucrados en el sistema.

Fuente: Autores.

A continuación, se listan los valores medidos y calculados para las distancias y fuerzas de la Fig. 8:

$$w = 42,547 \text{ Ton} = 93,736 \text{ Klb}$$

$$g = 12 \text{ m}$$

$$f = 3,68 \text{ m}$$

$$e = 1,47 \text{ m}$$

$$d = 0,74 \text{ m}$$

$$\alpha = 21.76 + A$$

donde A depende de la variación del ángulo θ y se calcula con ley de cosenos.

Considerando la sumatoria de momento igual a cero se puede calcular cualquier valor de fuerza de los cilindros en cualquier ángulo por medio de la ecuación (1):

$$F = \frac{w(-g \cdot \cos \theta + d \cdot \sin \theta)}{(-f \cdot \sin \alpha + e \cdot \cos \alpha)} \quad (1)$$

De la ecuación (1) se obtienen los datos de la fuerza del sistema para cada ángulo de inclinación del mástil la cual se grafica a continuación en la Fig. 9.

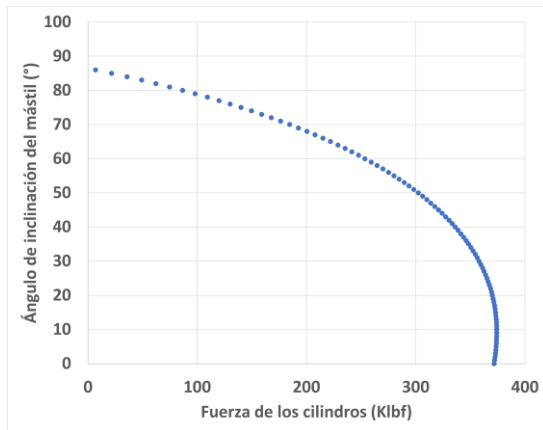


Fig. 9. Comportamiento de la sumatoria de la fuerza de los cilindros para cada ángulo de inclinación del mástil.
Fuente: Autores.

Finalmente, se obtuvieron los datos de la relación entre presión y fuerza para los cilindros hidráulicos acorde con las áreas efectivas de cada etapa del cilindro, tomadas de las tablas del fabricante [15]. Esta información permitió graficar la curva base del comportamiento de la presión frente al ángulo de inclinación del mástil como se observa en la Fig. 10. Esta grafica representa un cilindro hidráulico telescópico de tres etapas y su análisis es fundamental para comprender las transiciones de fuerza y presión durante el izaje del mástil, así como las influencias gravitacionales asociadas.

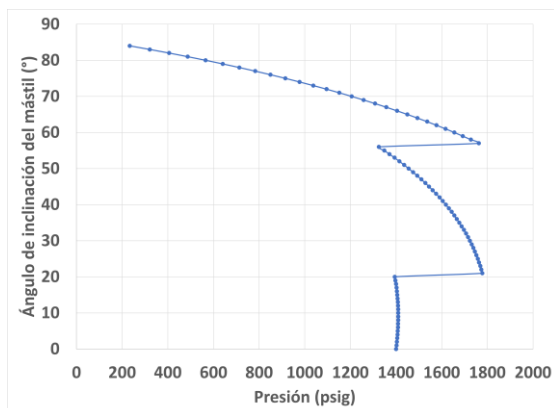


Fig. 10. Comportamiento de la presión en un cilindro hidráulico contra el ángulo de inclinación del mástil.
Fuente: Autores.

El desarrollo de esta curva constituye un avance significativo, ya que establece un marco de referencia para futuras investigaciones y estrategias

de optimización en procesos de izaje de mástiles. A continuación se analizan las tres regiones clave identificadas en la gráfica:

Primera Etapa (0° a ~20°): El cilindro opera con su etapa de mayor diámetro, generando la máxima fuerza con menor presión debido a la mayor área efectiva del pistón. La presión se mantiene relativamente constante, ya que la componente horizontal del peso del mástil es baja y los cilindros levantan el peso total del mástil. Esta fase destaca por su eficiencia en el consumo de energía y su comportamiento constante de la presión con respecto al ángulo de inclinación, el cual también es consecuencia de la geometría del sistema.

Segunda Etapa (~20° a ~56°): Al activarse la segunda etapa de menor diámetro, se requiere una mayor presión para compensar la carga. Esta transición introduce fluctuaciones en la presión debido a la redistribución del fluido y la resistencia interna en los sellos. Al inicio del recorrido, se registra un pico máximo de presión cercano a los 1800 psig. Además, en esta etapa, la curva de presión frente al ángulo de inclinación del mástil presenta un comportamiento no lineal.

Tercera Etapa (~57° a ~86°): En esta tercera etapa, la presión disminuye abruptamente debido al cambio en la componente gravitacional. De igual forma a la etapa anterior, se registra un pico de presión al inicio ligeramente inferior a los 1780 psig. A lo largo de esta etapa, la gráfica de presión —aunque no es perfectamente lineal— muestra un comportamiento más cercano a la linealidad en comparación con las etapas anteriores. Esto podría atribuirse a la menor variación del peso efectivo del mástil sobre los cilindros conforme se aproxima a la posición vertical [21]. También es importante recalcar que después de los 86 grados de inclinación la presión calculada teóricamente empieza a arrojar valores negativos, esto se presenta porque en este ángulo el centro de masa del mástil ya pasó por el punto de pivoteo del mástil y en este momento los cilindros dejan de aportar fuerza al sistema para pasar a sostener el mástil.

4.2 Gráfica de la presión medida en los cilindros DS y ODS en función del ángulo de inclinación del mástil

La grafica obtenida mediante el sistema de monitoreo validaron su capacidad para registrar en tiempo real la presión en los cilindros hidráulicos y la inclinación del mástil durante el proceso de izaje en el equipo *NOV Rapid Rig 13*. La Fig. 11 muestra los datos de campo recolectados, los cuales revelaron patrones de comportamiento clave en las presiones de los cilindros DS y ODS.

Específicamente, se identificaron picos de presión asociados a las transiciones entre las etapas del cilindro telescópico [6].

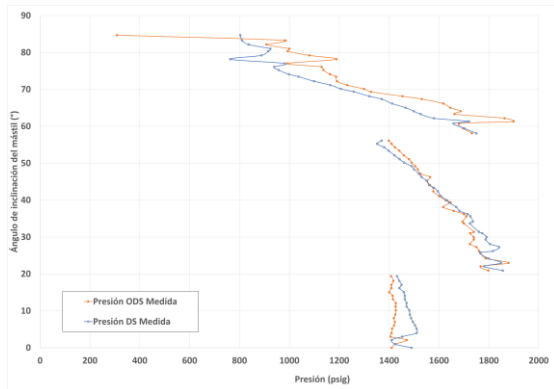


Fig. 11. Gráfica de presión medida en los cilindros DS y ODS en función del ángulo de inclinación del mástil, obtenida a partir de los valores medidos en tiempo real por el sistema de monitoreo.

Fuente: Autores.

Durante los primeros 20° de inclinación, las presiones en ambos cilindros mostraron estabilidad en rangos de 1400 a 1500 psig, lo que indica una adecuada compensación inicial de la carga.

En torno a los 20°, se presentó un primer pico de presión en ambos cilindros, alcanzando valores de hasta 1856 psig en el cilindro DS y 1767 psig en el cilindro ODS. Este incremento abrupto coincide con la transición de la primera a la segunda etapa del cilindro telescópico, momento en el que se requiere un aumento temporal de presión para superar la resistencia inicial del sistema y asegurar la extensión del siguiente segmento del cilindro.

Tras este pico, la presión en ambos cilindros mostró una estabilización y un descenso progresivo hasta los 56°, momento en el cual se presentó un segundo pico, correspondiente a la transición hacia la tercera etapa del cilindro. En esta fase, las presiones alcanzaron valores significativos antes de iniciar su descenso final.

Durante la última fase del izaje, después de los 60°, el cilindro ODS retuvo niveles de presión más elevados hasta los últimos grados de inclinación y redujo su presión a valores mínimos, alcanzando apenas 308 psig en los 84°. Esto sugiere una transferencia progresiva de carga hacia el cilindro DS en las etapas finales del izaje.

Este comportamiento de redistribución de carga es característico de sistemas hidráulicos bajo condiciones estructurales o de alineación no perfectamente simétricas. La caída de presión y los valores erráticos registrados por el sistema de monitoreo en ángulos superiores a 86° indican que

el peso del mástil comienza a ser soportado principalmente por la estructura fija del equipo, reduciendo progresivamente la carga ejercida sobre los cilindros.

A continuación, el resumen estadístico de las variables en las Tabla 1 y Tabla 2:

Tabla 1: Valores promedio del error de presión y la desviación estándar asociados a los cilindros hidráulicos DS y ODS.

DATO	VALOR
Promedio error DS	35,1 psig
Promedio error ODS	56,2 psig
Desviación estándar DS	109,5 psig
Desviación estándar ODS	139,7 psig

Fuente: Autores.

Tabla 2: Error promedio y la desviación estándar de la inclinación transversal del mástil calculados a partir de los datos registrados durante las maniobras de izaje.

DATO	VALOR
Promedio error	0,0838°
Desviación estándar	1,049°

Fuente: Autores.

4.3 Validación de Resultados

Los resultados de validación del sistema se presentan en la Tabla 3. Para este análisis comparativo se consideraron los datos teóricos obtenidos en la curva base (Fig. 10) y los datos registrados por el sistema de monitoreo en tiempo real (Fig. 11).

Tabla 3: Validación de resultados de la curva base y los datos registrados por el sistema de monitoreo en tiempo real

DATOS TEÓRICOS (CURVA BASE)	DATOS EN TIEMPO REAL (CURVAS DS Y ODS)
<i>Zona inicial del izaje (0° - 20°)</i>	
	Se mantiene en un rango similar, con fluctuaciones menores entre 1400 - 1500 psig en los cilindros DS y ODS, sin embargo, se aprecia que en esta fase el cilindro ODS tiene valores más altos de presión con respecto a su par DS.
La presión se mantiene en valores cercanos por encima de 1400 psig.	
En esta fase, el comportamiento de las curvas de datos teórica y de datos reales es similar, lo que sugiere que el sistema está operando dentro del margen esperado.	
<i>Primera transición de etapa del cilindro (~21°)</i>	
Presenta un incremento súbito en la presión hasta 1778 psig, lo que confirma que esta transición está asociada a la salida de la segunda etapa.	Registra un aumento abrupto en los cilindros DS y ODS, alcanzando valores de 1856 psig (DS) y 1798 psig (ODS).

En la primera transición, el comportamiento de las curvas de datos teórica y de datos reales es similar, lo que sugiere que el sistema está operando dentro del margen esperado.	
<i>Estabilidad intermedia (22° - 56°)</i>	
Se mantiene en valores cercanos a 1700 - 1300 psig, con una tendencia descendente progresiva.	En los cilindros DS y ODS se observa una estabilidad relativa, a pesar de presentar dispersión la curva descendiendo progresivamente con valores entre 1800 - 1400 psig.
En este rango, el comportamiento de las curvas de datos teórica y los datos reales es similar, indicando que el sistema hidráulico se comparto de manera correcta, no obstante, los datos reales presentan oscilaciones, lo que puede atribuirse a compensaciones del sistema hidráulico real para mantener la estabilidad o al desempeño del operador en el control de la válvula.	
<i>Segunda transición de etapa (~57°)</i>	
Se registra otro incremento brusco hasta 1763 psig, indicando la salida de la tercera etapa del cilindro telescópico.	Se observa un aumento de presión en los cilindros DS y ODS, aunque con valores de presión más dispersos.
Ambas curvas confirman la transición a la última etapa del cilindro, sin embargo, en los valores reales, la presión varía más de lo esperado, lo que sugiere que el sistema real no responde de manera uniforme como el modelo teórico.	
<i>Fase final del izaje (60° en adelante)</i>	
Desciende gradualmente hasta alcanzar valores negativos después de 86°, indicando que en esta fase el cilindro ya no debería estar contribuyendo a la carga.	En el cilindro DS, la presión disminuye progresivamente hasta 803 psig en 84°, lo que indica que aún mantiene cierto esfuerzo estructural. En el cilindro ODS, la presión cae más rápidamente hasta 308 psig en 84°, lo que sugiere que este cilindro deja de contribuir antes que el cilindro DS. Después de 85° el sistema muestra valores erráticos que oscilan hacia valores negativos de presión.
La presión en los datos reales no cae tan rápido como en los datos teóricos, lo que indica que en el sistema real hay factores adicionales manteniendo presión en el cilindro, posiblemente por resistencia estructural residual, fricción en el sistema de guías del mástil, posibles pérdidas de carga o efectos de regulación de presión en el sistema hidráulico. Sin embargo, para ángulos por encima de 85°, tanto los datos teóricos como en tiempo real muestran el final de la acción de los cilindros.	

Fuente: Autores.

A partir de los datos obtenidos durante el izaje del mástil y considerando las recomendaciones del fabricante, se han identificado situaciones críticas que pueden comprometer la seguridad y estabilidad del sistema hidráulico. Para cada una de estas condiciones, el sistema de monitoreo en su panel de visualización HMI, proporciona alarmas específicas que permiten la detección temprana y la toma de decisiones informadas:

- *Superación de las presiones máximas de trabajo:* el sistema activa una alarma por sobrepresión, advirtiendo sobre condiciones

que podrían comprometer la integridad de los cilindros hidráulicos [7].

- *Secuencia incorrecta de extensión de los cilindros:* se genera una alarma de incompatibilidad, que alerta sobre una discrepancia entre el ángulo de inclinación y la presión esperada en los cilindros DS y ODS, evitando posibles fallos estructurales [7].
- *Cilindro parcialmente extendido sin presión:* se activa una alarma por caída de presión, indicando una posible fuga o mal funcionamiento que podría afectar la estabilidad del izaje [7].
- *Desnivelación del mástil:* el sistema genera una alarma de desnivelación, permitiendo al operador corregir en tiempo real cualquier inclinación anómala que pueda comprometer la seguridad estructural.
- *Sobrepresión en uno de los cilindros:* se activa una alarma de presión desigual, detectando un desbalance de carga entre los cilindros DS y ODS, lo que puede indicar fallos en la distribución de peso o problemas en el sistema hidráulico [7].

La implementación de estas alarmas refuerza la utilidad del sistema de monitoreo como herramienta para la optimización de la toma de decisiones operativas y la prevención de riesgos.

Los resultados presentados en este artículo validan de manera concluyente la correlación entre la curva teórica de referencia y la curva obtenida en campo, demostrando que el sistema desarrollado captura con precisión las transiciones críticas entre las etapas del cilindro hidráulico telescópico. Esta funcionalidad proporciona información operacional que anteriormente no estaba disponible para los operadores del equipo NOV Rapid Rig 13.

5. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos durante la implementación del sistema de monitoreo en el NOV Rapid Rig 13 permiten reflexionar sobre varias implicaciones técnicas y científicas relevantes para la industria de hidrocarburos. Si bien la validación confirmó la funcionalidad y precisión del sistema, el análisis más amplio de los datos y del proceso experimental ofrece aportes valiosos para futuras aplicaciones y desarrollos similares.

En primer lugar, la maniobra de izaje permitió evidenciar cómo pequeños desequilibrios en la presión hidráulica generan inclinaciones transversales medibles en el mástil. La captura en

tiempo real de estas variaciones, que anteriormente dependían exclusivamente del juicio del operador y de señales visuales, constituye un avance significativo frente a los métodos tradicionales. Esta observación confirma lo reportado por [22] quienes subrayan que los sistemas sin retroalimentación sensorica están expuestos a desviaciones críticas difíciles de detectar a tiempo.

Por otro lado, los datos recogidos durante el izaje del mástil en tiempo real muestran un patrón de comportamiento hidráulico coherente con la curva teórica del sistema ideal, pero con desviaciones sistemáticas que revelan la influencia de factores no modelados (como juego mecánico, fricción no lineal o compresibilidad del fluido). Este hallazgo abre la posibilidad de emplear los datos capturados para construir modelos dinámicos más precisos que describan con mayor fidelidad el comportamiento del sistema bajo carga real, en línea con propuestas como las de [8] y [11], quienes abogan por el uso de observadores de perturbación y técnicas de predicción basadas en presión para anticipar fallas.

Otro aspecto relevante es la aplicabilidad de este sistema a otros equipos de perforación. Aunque el sistema fue diseñado específicamente para el NOV Rapid Rig 13, su arquitectura modular y su portabilidad lo hacen adaptable a otros entornos de izaje con sistemas hidráulicos similares. Esto se alinea con enfoques como el de [10], quienes resaltan la importancia de soluciones flexibles en contextos industriales variables. Sin embargo, su implementación generalizada requeriría ajustes según la geometría estructural, configuración del sistema de levante y normas de seguridad particulares de cada Rig.

Desde una perspectiva operativa, este sistema representa un paso intermedio entre el control manual tradicional y futuros esquemas de automatización. La información recopilada no solo mejora la toma de decisiones en el momento, sino que puede alimentar algoritmos de control automático o diagnóstico predictivo. En este sentido, el artículo se posiciona como una base tecnológica para explorar el desarrollo de sistemas de control sincronizado de cilindros, como los propuestos por [9], pero aplicados en condiciones reales y no simuladas.

Finalmente, debe mencionarse que el presente artículo se enfocó en un solo caso experimental, bajo condiciones específicas de operación y estructura. Si bien los resultados son prometedores, se requieren más pruebas en diferentes Rig y

condiciones para generalizar los hallazgos. Además, no se abordó la evaluación de estabilidad a largo plazo del sistema, lo cual representa una oportunidad para investigaciones futuras.

6. CONCLUSIONES

El análisis comparativo entre los datos teóricos de la curva base y los registros del sistema de monitoreo en tiempo real permitió identificar comportamientos críticos, particularmente los picos de presión durante las transiciones entre etapas del cilindro telescópico. Estos resultados validan tanto la correlación con la gráfica de presión estática teórica como la efectividad del sistema de monitoreo implementado.

Los resultados muestran un desbalance de presión entre cilindros, con mayor sobrepresión en el cilindro ODS, lo que sugiere una carga asimétrica durante el izaje. Las altas fluctuaciones registradas, especialmente en el cilindro ODS, podrían afectar la sincronía del levantamiento y aumentar el riesgo de inclinaciones no deseadas o esfuerzos irregulares en el mástil.

La inclinación transversal del mástil presentó una tendencia leve hacia el lado del cilindro DS, acompañada de una alta variabilidad entre etapas. En la fase final del izaje, se evidenció una inclinación sostenida hacia ese mismo lado, lo que podría reflejar desequilibrio hidráulico o diferencias de desempeño entre cilindros, aumentando el riesgo estructural en la etapa más crítica de la maniobra.

El diseño portátil y adaptable del sistema de monitoreo demuestra su viabilidad para ser implementado en otros equipos de perforación cuyo sistema de levante sea basado en cilindros hidráulicos multietapa, ofreciendo una herramienta versátil para el análisis y control de variables operativas.

Esta investigación representa un aporte original en la aplicación empírica de sistemas de monitoreo hidráulico en izaje de mástiles de perforación terrestre, un área poco documentada en la literatura científica actual.

Finalmente, este artículo establece una base sólida para el desarrollo futuro de sistemas automatizados de izaje del mástil y estrategias de mantenimiento predictivo, contribuyendo al fortalecimiento de la seguridad y eficiencia en operaciones críticas de la industria de hidrocarburos.

7. REFERENCIAS

- [1] API Recommended Practice 54, Occupational Safety and Health for Oil and Gas Well Drilling and Servicing Operations, 4th ed., 2019.
- [2] L. Gong, Y. Sun, Z. Huang, D. Ma, and D. Song, Theory and Technology of Drilling Engineering. Cham: Springer, 2023.
- [3] Independence. Equipo Investigador. Informe evento operacional Mástil Rig 50. Informe. Meta, Colombia, 2021.
- [4] Independence Drilling S.A.S., I-EN-EE-293 Izaje y Descenso de Torre Rapid Rig NOV, versión 3, 2021.
- [5] Independence Drilling S.A.S., DR-I-MN-EM-003 Desairar/Purgar Cilindros Hidráulicos de Izaje Primera Sección Mástil NOV Rapid Rig, versión 1, 2021.
- [6] W. Zhang, B. Wang, Z. Wu, F. Zhang, J. Zhang, S. Zhang, J. Zhang, J. Zhang, H. Sun, K. E. Waters, and H. Ma, "High-precision electro-hydraulic position servo system for machine tools utilizing mathematical model identification and control techniques," Precision Engineering, vol. 96, pp. 580–595, 2024.
- [7] D. Zhou, M. He, Y. Guo, L. Liu, and C. Ma, "A review of hydraulic cylinder faults, diagnostics, and prognostics," Alexandria Engineering Journal, vol. 77, pp. 1297–1318, 2024.
- [8] J. Zhao, Y. Wang, H. Ding, and H. Zhang, "Output feedback control of electro-hydraulic asymmetric cylinder system with disturbances rejection," Journal of the Franklin Institute, vol. 358, no. 17, pp. 9119–9140, 2021.
- [9] W. Zhu, Y. Ge, W. Deng, L. Li, X. Liu, J. Zhang, and J. Yao, "Neural Network-Based Dual-Cylinder Synchronous Control of a Multi-Link Erection Mechanism," Electronics, vol. 11, no. 16, Art. no. 2542, 2022.
- [10] J. Li, H. Yang, and H. Ji, "Characterization of two-cylinder parallel electro-hydraulic force/position synchronization based on RBF fuzzy neural network control," International Journal of Fuzzy Systems, 2024.
- [11] V. Zorin, N. Min, T. Thang, and Y. Val'ko, "Análisis de la precisión del modelo de diagnóstico de la hidráulica," Steel in Translation, vol. 53, no. 9, pp. 730–733, 2023.
- [12] C. Moreno, Memoria de cálculo NOV Rapid Rig 13. Independence Energy, Meta, Colombia, 2021.
- [13] B. Mishra and S. Maiti, "Fatigue analysis of offshore drilling derrick structures: a review and a new perspective," Engineering Structures, vol. 31, no. 10, pp. 2146–2156, 2009.
- [14] X. Yang and H. Li, Hydraulic Systems: Control, Diagnostics, and Fault Prognostics, ASME Journal of Dynamic Systems, 2023.
- [15] National Oilwell Varco, Rapid Drilling Rig Package Manual, Rig 13, 2010.
- [16] Organization for Economic Co-operation and Development, Frascati Manual 2015: Guidelines for Collecting and Reporting Data on Research and Experimental Development. OECD Publishing, 2015.
- [17] SICK AG, TMM88B-ALC090 Inclination Sensor – Technical Data Sheet. SICK AG, Waldkirch, Germany, 2023. [Online]. Available: <https://www.sick.com>. [Accessed: June. 30, 2025].
- [18] Trafag AG, Datasheet 8287.74.2530 – Pressure Transmitter. Trafag AG, Switzerland, 2023. [Online]. Available: <https://www.trafag.com>. [Accessed: June. 30, 2025].
- [19] Delta Electronics, PLC Programmable Logic Controllers. Delta Electronics, 2023. [Online]. Available: <https://www.deltaww.com>. [Accessed: June. 30, 2025].
- [20] Delta Americas, DOP-100 Series HMI Overview. Delta Electronics Americas, 2023. [Online]. Available: <https://www.delta-americas.com>. [Accessed: June. 30, 2025].
- [21] W. Hu and Y. Jiang, "Intelligent control and optimization of hydraulic systems using reinforcement learning," Neural Computing and Applications, 2025.
- [22] C. Zhang, Y. Fan, M. Liu, and Y. Zhu, "Analysis and prediction of accidents in the lifting cylinders of quick moving and making-up drilling rigs," Journal of Oil and Gas Technology, vol. 39, no. 2, pp. 83–88, 2017.