

# **Estabilizadores de Sarta de Perforación**

Manuel Romualdo Millán Rodríguez

Asesor

Mario Julián Díaz Reyes

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Escuela de Ciencias Básicas Tecnología e Ingeniería ECBTI

Tecnología en Logística Industrial

2024

## Resumen

La perforación de pozos petroleros es un proceso fundamental para establecer la conexión entre la superficie y los yacimientos de petróleo. Este proceso utiliza una sarta de perforación compuesta por tubos interconectados que, mediante su peso y rotación, atraviesan las capas rocosas del subsuelo. Estos tubos, denominados tubería de perforación, deben ser altamente resistentes a la presión y tensión. La distancia entre la tubería y la broca determina la necesidad de mayor peso y rigidez. El enfoque de este proyecto está en la estabilización de una sarta de perforación de pozos verticales, que son los más comunes globalmente, considerando las variables de perforación según la dureza de la roca. La elección apropiada de la broca según la dureza de la roca asegura un desempeño óptimo, con tasas de perforación más rápidas y paredes de pozo uniformes. Los diversos diámetros de broca y pozo influyen en el diseño de la sarta de perforación, que incorpora herramientas auxiliares como estabilizadores, cuñas para tubería, collarines de seguridad, entre otros. No obstante, el uso indebido o excesivo de estas herramientas puede causar fallas que comprometan la integridad de la sarta de perforación y, en casos extremos, la pérdida del pozo perforado.

**Palabras clave:** API, Sarta de Perforación, NPT, Control de Vibraciones, Optimización de perforación.

## **Abstract**

Drilling oil wells is a fundamental process to establish the connection between the surface and oil reservoirs. This process utilizes a drill string composed of interconnected tubes that, through their weight and rotation, penetrate the rock layers of the subsurface. These tubes, known as drill pipe, must be highly resistant to pressure and tension. The distance between the pipe and the drill bit determines the need for greater weight and rigidity. The focus of this project is on stabilizing a drill string for vertical oil wells, which are the most common globally, considering drilling variables based on rock hardness. The appropriate choice of drill bit according to rock hardness ensures optimal performance, with faster drilling rates and uniform well walls. The different drill bit and well diameters influence the design of the drill string, which incorporates auxiliary tools such as stabilizers, pipe wedges, safety collars, among others. However, improper or excessive use of these tools can cause failures that compromise the integrity of the drill string and, in extreme cases, result in the loss of the drilled well.

***Keywords:*** API, Drill String, NPT, Vibration Control, Drilling Optimization.

## Tabla de contenido

Introducción.....	8
Planteamiento del problema .....	9
Pregunta de investigación .....	11
Justificación.....	12
Objetivos.....	15
Objetivo general .....	15
Objetivos específicos.....	15
Marco referencial .....	16
Estado del arte .....	16
Marco conceptual .....	20
Sarta de perforación.....	20
Barrena de conos de rodillo .....	20
Estabilizador de sarta.....	21
Tubería de transición .....	22
Tubería de perforación .....	23
Cross-over.....	24
Motores de fondo (Bottom Hole Motors - BHM) .....	24
MWD/LWD (Measurement While Drilling / Logging While Drilling) .....	24
Bent housing (Carcasa doblada).....	24
NTP (Non-Productive Time).....	24
NDT (Non-Destructive Testing) .....	26
BHA (Bottom Hole Assembly).....	27
Marco teórico .....	28

	5
Estrategia mantenimiento predictivo.....	28
Estrategia del TPM.....	29
Marco legal.....	31
Resolución N° 40687 del 2017 Criterios de exploración.....	31
Norma NORSOK D-010.....	31
Standard DS-1 Drill Stem Inspection.....	33
Norma ANSI/API SPECIFICATION 7-1.....	33
Norma ISO 10424-1:2004.....	34
Metodología de la investigación .....	35
Enfoque de investigación.....	35
Hipótesis .....	35
Métodos.....	36
Etapa 1-Acondicionar área para los estabilizadores .....	36
Etapa 2-Realizar inventarios de equipos, herramientas e insumos en el área de trabajo .....	36
Etapa 3- Investigar y evaluar las tecnologías y prácticas actuales de estabilización de la sarta de perforación .....	37
Instrumentos.....	38
Resultados.....	39
Marco normativo .....	39
Fichas de caracterización.....	40
Prueba de ultrasonido.....	51
Proceso de soldadura.....	53
Conclusión.....	57
Referencias Bibliográficas.....	59

**Lista de Tablas**

<b>Tabla 1</b> <i>Dimensiones de las cuchillas</i> .....	43
<b>Tabla 2</b> <i>Sistema de inventarios de los estabilizadores de sarta (Schlumberger limited)</i> .....	48

## Lista de Figuras

<b>Figura 1</b> <i>Ficha de inspección estabilizador de sarta 50497K</i> .....	41
<b>Figura 2</b> <i>Definición de medidas del estabilizador</i> .....	42
<b>Figura 3</b> <i>Almacenamiento de estabilizadores de sarta</i> .....	44
<b>Figura 4</b> <i>Proceso de rectificado de rosca en los exteriores (rosca externa)</i> .....	49
<b>Figura 5</b> <i>Proceso de acabado de rosca (rosca externa mecanizada)</i> .....	50
<b>Figura 6</b> <i>Rectificado de rosca (rosca interna mecanizada)</i> .....	50
<b>Figura 7</b> <i>Prueba de ultrasonido roscado de acoplamiento</i> .....	51
<b>Figura 8</b> <i>Prueba de inspección de superficies</i> .....	52
<b>Figura 9</b> <i>Detección de averías en los filos de las cuchillas</i> .....	53
<b>Figura 10</b> <i>Proceso de soldadura superficial y corrección de porosidades</i> .....	53
<b>Figura 11</b> <i>Proceso de reparación de cuchillas (Insertos trapezoidales)</i> .....	54
<b>Figura 12</b> <i>Desbaste y pulido de los ángulos de corte</i> .....	54
<b>Figura 13</b> <i>Inspección de porosidad de superficies</i> .....	55
<b>Figura 14</b> <i>Eliminación de grietas</i> .....	55
<b>Figura 15</b> <i>Pintado y Clasificación según diámetro de la sarta</i> .....	56
<b>Figura 16</b> <i>Almacenamiento de producto conforme</i> .....	56

## **Introducción**

La historia del uso de herramientas de perforación en la industria petrolera se remonta a los primeros días de la perforación de pozos petroleros. A medida que la demanda de petróleo y gas aumentó en el siglo XIX, surgió la necesidad de desarrollar métodos eficientes para llegar a las reservas subterráneas de hidrocarburos. Por lo cual, con el desarrollo tecnológico y la innovación de la ingeniería se diseñó la composición de una serie de tubos interconectados, esto revolucionó la forma en que se llevaban a cabo las operaciones de perforación. Esta innovación permitió a los operadores llegar a mayores profundidades y atravesar formaciones rocosas más duras, facilitando así la extracción de recursos petroleros de manera más eficiente y segura.

Sin embargo, la importancia del uso de herramientas de perforación desempeña un papel fundamental en el éxito de las operaciones de perforación de pozos petroleros. Las herramientas especializadas, como las brocas de diferentes tipos y tamaños según la dureza de la formación rocosa, los estabilizadores de sarta de perforación que ayudan a prevenir la desviación del pozo y controlan las vibraciones, y otros dispositivos como los collares de seguridad y las cuñas para tubería, contribuyen significativamente a la eficiencia y seguridad de las operaciones.

El uso adecuado de estas herramientas permite optimizar las tasas de perforación, reducir los tiempos de perforación y minimizar el riesgo de fallas que podrían resultar en la pérdida del pozo o en costosos retrasos en la producción.

## **Planteamiento del Problema**

Tenemos unos equipos llamados estabilizadores los cuales en el momento se tienen dos tipos: string stabilizer y near bit stabilizer, estos actualmente son requeridos para la mayoría de BHA utilizados en pozos petroleros para los cuales la empresa presta servicios; para estos equipos no se tiene control actualmente y la respuesta para los trabajos ha generado retrasos, incumplimientos y NPT en algunos casos, generando pérdidas económicas y credibilidad a la compañía.

Este problema se manifiesta en una serie de consecuencias negativas, como retrasos en las operaciones de perforación, incumplimientos de los plazos establecidos y NPT (Non-Productive Time) en algunos casos. Estos problemas operativos no solo afectan la eficiencia y productividad de la empresa, sino que también generan pérdidas económicas directas debido a los costos adicionales asociados con los retrasos y los trabajos no productivos.

La perforación de un pozo requiere la utilización de varios elementos, entre los cuales se destaca la sarta de perforación como un componente vital para alcanzar la profundidad deseada del pozo, sostener la broca y facilitar el flujo del lodo de perforación (Espinosa & Barreiro, 2013).

Según Amado et al. (2015) esta herramienta conocida también como columna de perforación, desempeña un papel crucial al transmitir las fuerzas de empuje y rotación desde la superficie hasta la broca, que es responsable de la perforación del pozo. Este ensamblaje comprende la tubería poco pesada, también llamada tubería de trabajo, que inicia con el top drive kelly en la parte superior y se conecta al ensamblaje de fondo (BHA) en la parte inferior. Este BHA forma parte de la sarta más pesada, permitiendo la transmisión del movimiento

rotatorio y el peso necesario a la broca. Además, facilita el flujo del lodo de perforación desde la superficie hasta la broca, lo que es esencial para el éxito de las operaciones de perforación. Por tanto, es necesario implementar medidas de estabilización para optimizar el rendimiento de la sarta de perforación y minimizar los riesgos asociados con la inestabilidad durante las actividades de perforación.

Sin embargo, Pallares (2021) hace énfasis en que “la inestabilidad del pozo durante operaciones de exploración y perforación generan costos significativos para la industria, estimados en más de 100 millones de dólares mensuales a nivel global y posiblemente hasta mil millones de dólares anuales”. Grandes empresas operadoras y proveedoras de servicios han dedicado recursos y tecnología para mitigar este problema, ya que se ha convertido en un indicador clave de calidad en la perforación de pozos de petróleo, conocido como Non-Productive Time (NPT).

### **Pregunta de Investigación**

Teniendo en cuenta el contexto de la problemática es imprescindible generar la siguiente interrogante: ¿Cómo pueden las empresas petroleras reducir de manera efectiva los costos asociados con la inestabilidad del pozo durante las operaciones de exploración y perforación, especialmente en términos de Non-Productive Time (NPT), para mejorar la rentabilidad y eficiencia en la industria de la perforación de pozos petroleros?

## **Justificación**

Schulmberger limited por ser una compañía multinacional y la numero uno en prestación de servicios petroleros en el país, perder credibilidad y clientes insatisfechos altera la calidad del servicio, generando afectaciones económicas que se pueden manejar con un plan organizacional llevado a la realidad, controlando las variables en cuanto a existencias, tiempos de reparación y entrega según respuesta de nuestro proveedor de reparación. Adicional se cuenta con un sistema interno con detalles de información como: código, descripción de la herramienta, fechas de creación y puesta en servicio, despacho con locaciones e información visible para el personal involucrado en el servicio de las herramientas.

Se fundamenta el siguiente trabajo investigativo como la necesidad crítica de abordar los problemas derivados de la inestabilidad de la sarta de perforación en la ingeniería de perforación de pozos petroleros. La inestabilidad de la sarta de perforación ha sido identificada como uno de los principales desafíos operativos y financieros en la industria petrolera, con costos estimados de más de 100 millones de dólares mensuales a nivel global. Esta inestabilidad se traduce en problemas como vibraciones excesivas, desviaciones no deseadas del pozo, atascos y dificultades en la circulación del lodo de perforación, lo que compromete la eficiencia, seguridad y rentabilidad de las operaciones.

Al estabilizar adecuadamente la sarta de perforación, se espera reducir significativamente los riesgos asociados con estos problemas. La estabilización contribuirá a mitigar las vibraciones excesivas, minimizar las desviaciones no deseadas del pozo, prevenir atascos y facilitar una circulación efectiva del lodo de perforación. Esto se traducirá en una mejora general en la calidad de las operaciones de perforación, reduciendo el tiempo de inactividad no productivo (NPT) y los costos operativos asociados.

Además, la estabilización de la sarta de perforación es un aspecto crucial en la ingeniería de perforación de pozos petroleros, ya que afecta directamente la capacidad de alcanzar las profundidades deseadas de manera eficiente y segura. Al mejorar la estabilidad de la sarta de perforación, se optimiza el rendimiento de las brocas, se reduce la probabilidad de fallas operativas y se mejora la integridad del pozo, lo que a su vez contribuye a una mayor productividad y rentabilidad en la industria de la perforación de pozos petroleros.

En resumen, este proyecto justifica su importancia al abordar un problema crítico en la ingeniería de perforación, como es la estabilización de la sarta de perforación, y al proponer soluciones que tienen el potencial de mejorar significativamente la eficiencia, seguridad y rentabilidad de las operaciones petroleras.

Por otro lado, la estabilización efectiva de la sarta de perforación no solo impacta en la eficiencia operativa y económica de las empresas petroleras, sino que también tiene repercusiones ambientales y de seguridad laboral. La reducción de vibraciones y desviaciones en el pozo no solo optimiza el proceso de perforación, sino que también minimiza el riesgo de accidentes y daños a la infraestructura. Esto contribuye a un entorno de trabajo más seguro y sostenible, al tiempo que reduce el impacto ambiental al evitar posibles derrames de lodo de perforación o fugas de hidrocarburos.

De tal manera que, la mejora en la estabilidad de la sarta de perforación se alinea con las tendencias y estándares actuales de la industria petrolera, donde la eficiencia operativa y el cumplimiento de normativas ambientales y de seguridad son aspectos cada vez más críticos.

Entonces, este proyecto no solo busca resolver un problema técnico específico, sino que también se posiciona como una iniciativa que promueve las mejores prácticas y el desarrollo

sostenible en la ingeniería de perforación de pozos petroleros, asegurando así un futuro más seguro, eficiente y responsable en la industria.

## **Objetivos**

### **Objetivo General**

Tener un manejo y control total sobre estas herramientas para responder a tiempo y según requerimientos al cliente, de tal manera, Desarrollar e implementar estrategias efectivas de estabilización de la sarta de perforación en la industria petrolera, con el fin de mejorar la eficiencia operativa, reducir los costos asociados con el Non-Productive Time (NPT) y aumentar la seguridad en las operaciones de perforación de pozos petroleros.

### **Objetivos Específicos**

Acondicionar área para los estabilizadores.

Realizar inventario incluyendo equipos que tenemos en campo y en locaciones de proveedores de reparación.

Clasificar de forma adecuada según tipos, tamaños, conexiones y condiciones generales.

Mantener actualizado el sistema interno con la información necesaria para el personal involucrado en el servicio y entrega de estabilizadores.

Investigar y evaluar las tecnologías y prácticas actuales de estabilización de la sarta de perforación utilizadas en la industria petrolera, identificando sus ventajas, limitaciones y áreas de mejora.

## **Marco referencial**

En el marco de referencia se recopilan antecedentes relacionados con el tema de investigación (teorías, metodologías, información, investigaciones previas, etc.), con el objetivo de reconocer y presentar los conceptos que respaldan el avance y desarrollo del proyecto.

### **Estado del Arte**

Para llevar a cabo la investigación sobre la estabilización de la sarta de perforación, es necesario examinar el contexto relacionado con este tema y revisar los estudios previos para identificar avances, posibles lagunas de información y orientaciones para el diseño de propuestas. Esto permitirá a la investigación argumentar de manera efectiva desde una perspectiva integral. Se analizan investigaciones a nivel internacional y nacional que aborden factores, elementos y procesos relevantes para el desarrollo de esta investigación específica.

Teniendo en cuenta a nivel internacional el trabajo de grado de Rivera (2013) el cuál se titula “Diseño de sarta de perforación” enfatiza en que el proceso de diseño de la sarta de perforación implica la recopilación exhaustiva de datos, como la profundidad total del pozo, el diseño específico del pozo, la densidad de los fluidos de perforación, la presión de la barrena, los márgenes de seguridad, la disponibilidad de equipos y herramientas, información geológica y la correlación con pozos cercanos. Cuanta más información se tenga disponible, mejor podrá adaptarse el diseño de la sarta de perforación para cumplir con los requisitos y demandas de la operación de perforación.

La investigación sobre la estabilización de la sarta de perforación resulta crucial al requerir una exhaustiva recopilación de datos, que incluyen la profundidad del pozo, características del diseño, densidad de los fluidos utilizados, presión de la barrena, factores de seguridad, disponibilidad de herramientas y tubulares, datos geológicos y la relación con pozos

adyacentes. Cuanta más información se obtenga, más efectiva será la estrategia de estabilización implementada, lo que contribuirá a reducir riesgos operativos y a mejorar la eficiencia y seguridad en las operaciones de perforación. Esta aproximación integral asegura que la sarta de perforación esté óptimamente diseñada para cumplir con los requerimientos y exigencias específicos de cada operación de perforación.

A nivel nacional, un informe de investigación del ingeniero Ramos (2011) señala la importancia de las herramientas de perforado, este informe se titula como “Estado del arte de brocas de perforación” y comprende qué para realizar una óptimo diseño y selección de una broca es importante tener en cuenta factores como peso sobre la broca, el tipo de litología y abrasividad, temperatura de la formación, densidad del lodo, tasa de perforación, deformación y esfuerzos de la broca, etc.

La mayoría de las investigaciones realizan ciertas asunciones que omiten uno u otro factor lo cual puede en algunos casos no reflejar el fenómeno físico que ocurre en el fondo del pozo y al final la broca seleccionada para perforar cierta formación puede no ser la más adecuada para ello, incurriendo en gastos adicionales por el cambio de una broca desgastada aunado a los gastos asociados a taladro y a los tiempos no productivos entre otros.

Entre los avances más importantes en el diseño y desempeño de brocas se encuentran los estudios realizados en el fenómeno de la vibración de las brocas PDC, el cual tiene un fuerte impacto en la vida útil de la broca, donde la identificación de este fenómeno ha permitido realizar diseños de brocas más resistentes bajo este efecto vibratorio durante la perforación aumentando la vida útil de la broca durante la perforación.

Sin embargo, el análisis se enfoca en la selección y diseño de brocas para operaciones de perforación, considerando factores como peso sobre la broca, tipo de litología, temperatura de la formación, densidad del lodo, entre otros. Esta relación puede ser aplicada de manera análoga a la selección y diseño de la sarta de perforación. Al igual que con las brocas, la selección de estabilizadores para la sarta de perforación requiere tener en cuenta varios factores críticos, como el peso aplicado sobre los estabilizadores, la dureza y abrasividad de la formación geológica, la temperatura en la zona de perforación, la densidad del lodo de perforación y otros parámetros operativos.

Además, al igual que los avances en el diseño de brocas han permitido mejorar su resistencia frente a fenómenos como la vibración, los avances en la tecnología y diseño de estabilizadores para la sarta de perforación también se enfocan en optimizar su resistencia y desempeño en condiciones operativas específicas. Ambos casos destacan la importancia de una selección adecuada de herramientas y equipos de perforación para garantizar la eficiencia, seguridad y rentabilidad en las operaciones de perforación de pozos petroleros.

Por último, el trabajo de Montoya (2023) titulado “Caracterización de pozos vecinos para la perforación de pozos y/o desarrollos al cretácicos. Impacto de los EOAs en el reservorio” se centra en el estudio de las operaciones de perforación de pozos petroleros, esto se enfrentan a desafíos relacionados con la inestabilidad geomecánica causada por la debilidad de la roca en la cara del pozo. Estos problemas son el resultado de una combinación de factores tanto controlables como no controlables. Los factores controlables incluyen prácticas de perforación inapropiadas, como la falta de control de presiones, la construcción de ángulos excesivamente altos o direcciones incorrectas, y cambios bruscos en las presiones al insertar o retirar tuberías.

Además, se observan altas vibraciones en la sarta de perforación, erosión debido al flujo intenso de lodo de perforación, y aumento de la temperatura del lodo. Por otro lado, los factores no controlables pueden ser la presencia de formaciones rocosas con altos esfuerzos tectónicos naturales o inducidos, baja resistencia de la roca a los esfuerzos cambiantes, fracturas y fallas en la formación, y formaciones móviles o no consolidadas. Estos problemas de inestabilidad generan interrupciones costosas en el proceso de perforación y, en casos extremos, pueden llevar a la pérdida total del pozo.

Es esencial prestar atención detallada a diversos aspectos durante las operaciones, como los programas de fluidos, la instalación de revestimientos, los procedimientos operativos y los cambios de personal. La comunicación constante y efectiva entre el equipo de perforación y la operadora en el sitio de trabajo es crucial para coordinar las actividades de manera eficiente y evitar confusiones.

## Marco Conceptual

### Sarta de Perforación

La sarta de perforación es un conjunto de tuberías y herramientas utilizadas en la industria petrolera para perforar pozos. Está compuesta por varios elementos, como tuberías de revestimiento, tubos de perforación, brocas, estabilizadores, collares de perforación, entre otros.

En términos técnicos, la sarta de perforación debe diseñarse considerando la profundidad del pozo, la geología y características de la formación rocosa, el tipo de fluidos de perforación utilizados, la temperatura y presión en el pozo, la velocidad de perforación deseada, y otros factores operativos y ambientales (Ojeda, 2021). Esto implica la selección cuidadosa de materiales, el diseño de conexiones seguras entre los componentes, y la implementación de estrategias para controlar la estabilidad y el rendimiento de la sarta durante la perforación.

### Barrena de Conos de Rodillo

Las barrenas de conos de rodillo, también conocidas como Rock bits en inglés, son herramientas esenciales utilizadas en la industria de perforación para la extracción de rocas duras en pozos petroleros, geotérmicos y de exploración. Estas barrenas están diseñadas con una serie de conos cilíndricos montados en ejes giratorios que contienen dientes o insertos de carburo de tungsteno. Estos dientes son responsables de triturar y fracturar la formación rocosa mientras la broca gira y desciende en el pozo.

Según Serrato & Suarez, (2017) las barrenas de conos de rodillo se clasifican en varios tipos según su diseño y función, como las barrenas tricónicas y las barrenas de conos de rodillo de fresa. Cada tipo de broca está diseñado para trabajar en diferentes condiciones geológicas y ofrecer un rendimiento óptimo en términos de velocidad de penetración, resistencia al desgaste, y capacidad de perforación en diferentes tipos de rocas, desde blandas hasta muy duras. La selección adecuada de la broca de conos de rodillo es crucial para garantizar una perforación

eficiente y segura en proyectos de exploración y producción de hidrocarburos.

### **Estabilizador de Sarta**

Un estabilizador de sarta es un componente esencial en la industria de perforación de pozos petroleros que se utiliza para mejorar la estabilidad y controlar la dirección de la sarta de perforación durante las operaciones de perforación. Este dispositivo está diseñado para soportar cargas mecánicas, reducir las vibraciones, evitar desviaciones no deseadas del pozo y mejorar la eficiencia de la perforación.

Las propiedades físicas de un estabilizador de sarta incluyen su resistencia estructural para soportar las fuerzas y presiones generadas durante la perforación, así como su capacidad para resistir la abrasión y el desgaste en entornos de alta presión y temperatura. Además, estos estabilizadores deben tener una geometría adecuada para ajustarse a la tubería de perforación y permitir un flujo eficiente del lodo de perforación.

### **Tubería de Transición**

La tubería de transición, también conocida como "hevi-wate", es un componente clave en una sarta de perforación utilizada en la industria petrolera. Esta tubería está diseñada para proporcionar un equilibrio adecuado entre resistencia y peso en aplicaciones de perforación. Las propiedades físicas y técnicas de la tubería de transición son fundamentales para su funcionamiento efectivo en el proceso de perforación de pozos petroleros.

En términos físicos, la tubería de transición está construida con materiales de alta resistencia, como aceros especiales o aleaciones, para soportar las cargas mecánicas y las condiciones extremas presentes durante la perforación. Estos materiales tienen propiedades mecánicas superiores, como alta resistencia a la tracción, resistencia al impacto y capacidad para soportar esfuerzos cíclicos repetidos sin deformaciones permanentes.

Según las especificaciones API para la tubería de perforación y componentes relacionados, el material comúnmente utilizado para la tubería de transición (hevi-wate) es una aleación de acero de alta densidad. Este tipo de aleación se designa de acuerdo con las especificaciones API como el grado "Heavy Weight Drill Pipe" (HWDP) de acuerdo con la API Spec 7-1 Material: 4145H / 4145H mod o No magnético, estándar: API 7-1, NS-1.

## **Tubería de perforación**

La tubería de perforación, también conocida como "drill pipe" en inglés, es un componente esencial utilizado en la industria de perforación de pozos petroleros. Se trata de una tubería larga y cilíndrica fabricada principalmente con acero de alta resistencia y diseñada para transmitir la rotación y la energía de perforación desde la superficie hasta la broca de perforación en el fondo del pozo.

Las propiedades físicas de la tubería de perforación incluyen su resistencia estructural para soportar las cargas mecánicas generadas durante la perforación, así como su capacidad para soportar la tensión, compresión y torsión en condiciones de alta presión y temperatura. La tubería de perforación debe tener una geometría uniforme y precisa para facilitar su conexión con otros componentes de la sarta de perforación y permitir un flujo eficiente del lodo de perforación.

Desde un punto de vista técnico, la tubería de perforación se caracteriza por su tamaño, que varía según el diámetro y el espesor de la pared, y su capacidad para resistir la corrosión y el desgaste en entornos agresivos. Las conexiones entre las secciones de la tubería deben ser robustas y herméticas para garantizar la integridad estructural y evitar fugas de fluidos durante la operación de perforación.

Las herramientas especiales utilizadas en la industria de perforación de pozos petroleros son dispositivos diseñados para realizar funciones específicas durante el proceso de perforación.

Estas herramientas incluyen:

### **Cross-over**

Se refiere a una pieza de conexión utilizada para unir dos herramientas o componentes de la sarta de perforación que tienen roscas o conexiones diferentes. Su función principal es permitir la compatibilidad y la continuidad en la operación al unir elementos de diferentes tamaños o tipos de conexiones.

### **Motores de fondo (Bottom Hole Motors - BHM)**

Son dispositivos mecánicos instalados en la sarta de perforación que convierten la energía mecánica proveniente de la rotación de la tubería en energía de rotación en la broca de perforación en el fondo del pozo. Estos motores permiten la dirección y control del trayecto de la perforación, facilitando la perforación direccional y horizontal de pozos.

### **MWD/LWD (Measurement While Drilling / Logging While Drilling)**

Son sistemas de medición y registro que se encuentran integrados en la sarta de perforación y proporcionan datos en tiempo real sobre parámetros como la dirección del pozo, la temperatura, la presión, la densidad del lodo y las propiedades de las formaciones geológicas atravesadas. Estos sistemas permiten la toma de decisiones en tiempo real durante la perforación para optimizar el rendimiento y la seguridad.

### **Bent housing (Carcasa doblada)**

Es una herramienta especializada que se utiliza para generar desviaciones en la dirección de perforación, permitiendo la creación de pozos direccionalmente controlados. Consiste en una carcasa con un ángulo predefinido que se coloca en la sarta de perforación para orientar la broca en una dirección específica.

### **NTP (Non-Productive Time)**

La calidad NPT (Non-Productive Time) se refiere a la medición de las horas o el tiempo en que un equipo o una operación en la industria de perforación de pozos petroleros no está generando producción o no está contribuyendo directamente al progreso del proyecto de perforación. Este tiempo no productivo puede deberse a una variedad de factores, como problemas mecánicos en el equipo, retrasos en la logística, condiciones climáticas adversas, falta de personal calificado, entre otros.

Las normas que se rigen para medir y gestionar la calidad NPT varían según la empresa y la industria específica, pero generalmente se basan en prácticas y estándares aceptados internacionalmente, como las normas de la American Petroleum Institute (API) y las recomendaciones de organizaciones como la International Association of Drilling Contractors (IADC).

Algunas de las normas y prácticas comunes relacionadas con la calidad NPT incluyen:

**API RP 59:** Esta norma proporciona pautas para la gestión de la calidad NPT en la industria de perforación de pozos petroleros, incluyendo la clasificación de diferentes tipos de NPT y la identificación de las causas principales de tiempo no productivo.

**IADC Manual de Prácticas Recomendadas:** La IADC proporciona orientación sobre cómo medir, analizar y gestionar la calidad NPT de manera efectiva, incluyendo la implementación de sistemas de seguimiento y reporte.

**KPIs (Key Performance Indicators):** Las empresas suelen establecer indicadores clave de rendimiento relacionados con la calidad NPT, como el porcentaje de tiempo no productivo sobre el tiempo total de operación, para monitorear y mejorar el desempeño en la gestión del tiempo y los recursos durante las operaciones de perforación.

### **NDT (Non-Destructive Testing)**

La metodología NDT (Non-Destructive Testing) se refiere a un conjunto de técnicas utilizadas para evaluar la integridad, la calidad y las características de materiales, componentes o estructuras sin causar daño o alteraciones permanentes en ellos. Estas técnicas se emplean para detectar defectos internos, discontinuidades, grietas, corrosión u otras anomalías que puedan afectar la funcionalidad o la seguridad de los elementos inspeccionados.

Con el fin de categorizar la variedad de normas que se rigen por la metodología NDT los autores Rzekpa & Ziaja (2024) determinan que las normas varían dependiendo del tipo de técnica de inspección utilizada. Algunas de las normas más comunes y reconocidas a nivel internacional son:

ISO 9712: Esta norma establece los requisitos generales para la certificación de personal en técnicas de ensayos no destructivos, como radiografía, ultrasonido, partículas magnéticas, líquidos penetrantes, entre otros. Define los niveles de competencia y los procedimientos para la calificación y certificación del personal NDT.

ASTM E709: Norma de la ASTM (American Society for Testing and Materials) que proporciona lineamientos para la evaluación de la calidad de imágenes radiográficas industriales, incluyendo criterios de aceptación y rechazo basados en la detección de discontinuidades y la claridad de las imágenes.

ASNT SNT-TC-1A: Estándar desarrollado por la American Society for Nondestructive Testing (ASNT) que establece los requisitos para la calificación y certificación del personal NDT en diversas técnicas, como ultrasonido, radiografía, partículas magnéticas, entre otras. Define los procedimientos para la formación, evaluación y certificación del personal NDT.

ISO 17635: Norma europea que aborda los requisitos generales para la realización de ensayos no destructivos por técnicas de radiografía industrial, incluyendo la calificación del personal, la evaluación de equipos y la interpretación de resultados.

Estas normas y estándares proporcionan directrices claras y procedimientos establecidos para garantizar la calidad, la confiabilidad y la validez de las inspecciones NDT en diversos sectores industriales, como la construcción, la ingeniería mecánica, la industria aeroespacial, entre otros.

## **BHA (Bottom Hole Assembly)**

El BHA, que significa "Bottom Hole Assembly" en inglés, se refiere al conjunto de herramientas y equipos que se utilizan en la parte inferior de la sarta de perforación durante las operaciones de perforación de pozos petroleros. Este conjunto de herramientas está diseñado para llevar a cabo funciones específicas y optimizar el rendimiento de la perforación.

Por otra parte, los autores Bustamante & Morales (2019) indica que el BHA típicamente incluye componentes como la broca de perforación, el motor de fondo (Bottom Hole Motor - BHM), estabilizadores, collares de perforación, herramientas de medición en tiempo real (MWD/LWD), entre otros. La broca de perforación es el componente principal del BHA y se utiliza para cortar la formación rocosa en el fondo del pozo. El motor de fondo convierte la energía rotacional de la sarta de perforación en energía rotacional en la broca para controlar la dirección de la perforación. Los estabilizadores ayudan a mantener la trayectoria del pozo y reducir la vibración durante la perforación.

Los collares de perforación agregan peso y rigidez a la sarta de perforación para mejorar la penetración y estabilidad. Las herramientas de medición en tiempo real proporcionan datos cruciales sobre la dirección, la temperatura, la presión y otras variables del pozo durante la operación.

Las condiciones físicas a las que se enfrenta el BHA son extremadamente demandantes, ya que deben operar en entornos de alta presión, temperatura y abrasión. Además, deben ser capaces de soportar las fuerzas de torsión, compresión y tensión generadas durante la perforación. Esto requiere materiales de alta resistencia y diseños robustos para garantizar la integridad y el rendimiento del conjunto de herramientas.

## **Marco teórico**

### **Estrategia mantenimiento predictivo**

El mantenimiento predictivo es una estrategia de mantenimiento utilizada en diversas industrias, incluida la industria petrolera, que se centra en prevenir fallas y maximizar la disponibilidad operativa de equipos y maquinaria mediante el monitoreo continuo de su estado y el análisis de datos para identificar posibles problemas antes de que ocurran (Sánchez, 2017). Esta metodología se basa en la idea de que las fallas en los equipos a menudo muestran signos precursores o patrones de comportamiento anormal que pueden detectarse y corregirse antes de que afecten negativamente la operación.

Por otra parte, Ubaque & Aguirre (2019) describe que una de las principales características del mantenimiento predictivo es la utilización de tecnologías avanzadas de monitoreo y análisis de datos, como sensores, sistemas de telemetría, análisis de vibraciones, termografía, análisis de aceite, entre otros. Estas herramientas permiten recopilar información en tiempo real sobre el estado operativo de los equipos, incluidas variables como temperatura, vibración, presión, consumo de energía, entre otros parámetros relevantes.

El proceso de mantenimiento predictivo implica la recopilación continua de datos a lo largo del tiempo, la identificación de patrones normales de funcionamiento y el establecimiento de alarmas o límites de tolerancia para detectar desviaciones significativas. Mediante el análisis de tendencias y la comparación con datos históricos, se pueden anticipar posibles problemas mecánicos, eléctricos o estructurales en los equipos, lo que permite programar intervenciones demantenimiento preventivo o correctivo de manera proactiva y planificada.

Villada et al, (2002) profundiza en que el mantenimiento predictivo se distingue de otras estrategias de mantenimiento, como el mantenimiento preventivo (basado en intervalos

de tiempo fijos) y el mantenimiento reactivo (realizado después de que ocurre una falla), al proporcionar una mayor precisión en la detección de anomalías y una reducción significativa en los costos asociados con el mantenimiento no planificado y las paradas no programadas. Además, al prevenir fallas y maximizar la vida útil de los equipos, el mantenimiento predictivo contribuye a mejorar la eficiencia operativa, la seguridad y la rentabilidad de las operaciones en la industria petrolera y otras industrias similares.

### **Estrategia del TPM**

Según López (2009) el Total Productive Maintenance (TPM) es una estrategia de gestión centrada en maximizar la eficiencia de los equipos, minimizar las pérdidas y mejorar la calidad de los productos o servicios. En el contexto de la industria petrolera y la perforación de pozos, el TPM se aplica para optimizar la calidad y prolongar la vida útil de las herramientas utilizadas en las operaciones de perforación.

Una de las principales áreas de enfoque del TPM en la industria de perforación es la gestión de la calidad de las herramientas. Esto implica implementar prácticas y procedimientos que aseguren la fabricación y mantenimiento de herramientas con los más altos estándares de calidad. Esto incluye el uso de materiales de alta calidad, procesos de fabricación precisos, inspecciones regulares y pruebas de calidad para garantizar que las herramientas cumplan con las especificaciones técnicas y funcionen de manera óptima durante su vida útil.

Otro aspecto clave que el autor Pérez (2021) complementa es que del TPM en relación con las herramientas es la gestión de la vida útil, esto se refiere a las acciones y actividades destinadas a maximizar la durabilidad y rendimiento de las herramientas a lo largo del tiempo.

Esto puede incluir programas de mantenimiento preventivo, inspecciones periódicas, monitoreo de condiciones operativas, entrenamiento del personal en el manejo adecuado de las herramientas y la implementación de prácticas de operación segura que minimicen el desgaste

y daño de las herramientas.

Además, el TPM busca fomentar una cultura de cuidado y responsabilidad en el manejo de las herramientas entre el personal. Esto implica promover la conciencia sobre la importancia de mantener las herramientas en óptimas condiciones, fomentar la participación activa del equipo en actividades de mantenimiento y mejora continua, y proporcionar capacitación y recursos para que el personal pueda desempeñarse de manera efectiva en la gestión de las herramientas y equipos.

## **Marco Legal**

### **Resolución N° 40687 del 2017 Criterios de Exploración**

Según el Artículo 22. Inspección a los equipos de perforación: Consta que la autoridad de fiscalización, directamente o a través de terceros especializados, podrá conducir inspecciones programadas a los equipos y unidades de perforación e intervención de pozos con el fin de determinar que las operaciones sean adelantadas de conformidad con la presente resolución y las demás leyes, reglamentaciones y estándares aplicables... Las inspecciones podrán ser conducidas para determinar si los equipos destinados para el control de pozo, incendios, derrames de hidrocarburos o sustancias peligrosas u otros accidentes mayores se encuentran instalados y operando adecuadamente de conformidad con el propósito de su diseño y con los requisitos de la presente resolución.

### **Norma NORSOK D-010**

La definición de integridad del pozo según Norsok D-010 implica la implementación de medidas técnicas, operativas y organizativas destinadas a mitigar el riesgo de fugas incontroladas de fluidos de formación durante todo el ciclo de vida de un pozo. Este estándar, de naturaleza funcional, establece los criterios mínimos para los equipos y soluciones a emplear en un pozo, permitiendo a las empresas operadoras seleccionar las alternativas que cumplan con dichos requisitos. En consecuencia, la responsabilidad de cumplir con la norma recae completamente en las empresas operadoras.

De acuerdo con esta descripción, el personal encargado de planificar la perforación y la finalización de los pozos debe identificar y adoptar las soluciones que garanticen diseños seguros a lo largo de todo el ciclo de vida del pozo, en consonancia con los estándares mínimos estipulados por la normativa Norsok D-010.

## **Standard DS-1 Drill Stem Inspection**

Las normas DS-1, también conocida como "Drilling Subs Standards," es un conjunto de normas técnicas y de calidad establecidas por la organización DS-1, una iniciativa de la International Association of Drilling Contractors (IADC) y la American Petroleum Institute (API). Estas normas están diseñadas para garantizar la integridad, seguridad y rendimiento de los equipos utilizados en la industria de perforación de pozos petroleros.

Las normas DS-1 abarcan una amplia gama de equipos y componentes utilizados en la perforación de pozos, incluyendo tuberías de perforación, conexiones, herramientas especiales, subs y otras herramientas de fondo de pozo. Estas normas establecen requisitos detallados para la fabricación, inspección, prueba y certificación de los equipos, asegurando que cumplan con estándares de calidad y desempeño aceptables para su uso en operaciones de perforación, entre las normas que se rigen bajo la calidad DS-1 se encuentran:

DS-1® Volume 1 - Rotary Drill Stem Elements: Se centra en los elementos esenciales de la sarta de perforación, como la tubería, las conexiones, los accesorios y otros componentes relacionados. Establece requisitos para la fabricación, inspección y prueba de estos elementos para garantizar su integridad y resistencia bajo condiciones operativas exigentes.

DS-1® Volume 2 - Drill Stem Design and Operation: Se enfoca en el diseño y la operación de la sarta de perforación, incluyendo aspectos como la selección de materiales, el diseño de conexiones, los procedimientos de inspección y mantenimiento, y las prácticas seguras de operación. Proporciona directrices para optimizar el rendimiento y la seguridad durante las operaciones de perforación.

DS-1® Volume 3 - Drill String Performance: Se dedica a evaluar el rendimiento y la integridad de la sarta de perforación en condiciones reales de operación. Establece criterios para

la evaluación de la fatiga, la resistencia a la corrosión, la capacidad de carga y otros aspectos relacionados con el desempeño de la sarta durante su vida útil.

### **Norma ANSI/API SPECIFICATION 7-1**

Este estándar abarca las especificaciones de fabricación de la tubería de perforación de peso pesado que se utiliza más comúnmente en los ensamblajes de fondo de pozo. Este producto no debe confundirse con la tubería de perforación de pared gruesa (o peso pesado) fabricada para cumplir con la Especificación API 5D. Se debe tener en cuenta que los materiales especificados aquí generalmente no se consideran adecuados para servicio ácido u otras condiciones de perforación altamente corrosivas, y se aconseja al usuario tener esto en cuenta al iniciar acuerdos de compra para la tubería de perforación de peso pesado si se anticipan tales condiciones de perforación.

Los estabilizadores pueden estar hechos de acero estándar o acero inoxidable no magnético. Se debe usar acero estándar a menos que se especifique material no magnético. Los estabilizadores de cuerpo integral o el núcleo de estabilizadores de cuchillas soldadas hechos de acero estándar deben ser templados y revenidos en toda su longitud. El diseño de la unión del tubo al ensamblaje de la herramienta debe ser tal que la soldadura no esté ubicada en el radio entre la extensión del tubo y el cono de la junta de herramienta. El diseño de la soldadura debe asegurar que la resistencia de la soldadura (área transversal de la soldadura multiplicada por la resistencia mínima a la tracción de la soldadura) supere la resistencia de la sección del tubo (área transversal mínima del tubo multiplicada por la resistencia mínima a la tracción del tubo).

## **Norma ISO 10424-1:2004**

La función de esta parte de la norma ISO 10424 es definir el diseño y las propiedades mecánicas del material necesario para los elementos de la sarta de perforación rotatoria.

También define las pruebas requeridas para verificar el cumplimiento de estos requisitos. Dado que los elementos de la sarta de perforación rotatoria son muy móviles y se desplazan de una plataforma a otra, el control del diseño es un elemento importante necesario para garantizar la intercambiabilidad y el rendimiento del producto fabricado por diferentes fuentes.

Una parte importante de esta parte de la norma ISO 10424 se basa en la Especificación API Spec 7, edición 40, noviembre de 2001. Sin embargo, API Spec 7 no define los requisitos de pruebas no destructivas de los materiales utilizados para fabricar los componentes de la sarta de perforación cubiertos por esta parte de la norma ISO 10424. Esta parte de la norma ISO 10424 aborda estos requisitos.

Los usuarios de esta parte de la norma ISO 10424 deben ser conscientes de que pueden ser necesarios requisitos adicionales o diferentes para aplicaciones individuales. Esta parte de la norma ISO 10424 no tiene la intención de impedir que un proveedor ofrezca, o que el comprador acepte, equipos o soluciones de ingeniería alternativos para la aplicación individual. Esto puede ser especialmente aplicable cuando existe tecnología innovadora o en desarrollo. Cuando se ofrece una alternativa, el proveedor debe identificar cualquier variación con respecto a esta parte de la norma ISO 10424 y proporcionar detalles al respecto.

## **Metodología de la Investigación**

### **Enfoque de Investigación**

Partiendo desde el enfoque de investigación aplicada, se busca abordar problemas específicos y aplicar los conocimientos científicos para desarrollar soluciones prácticas y aplicables en el contexto real. Este enfoque implica la utilización de métodos y técnicas que permitan analizar, comprender y resolver situaciones concretas, aportando así al desarrollo de la investigación y al mejoramiento de la calidad de los resultados. La investigación aplicada se centra en generar resultados tangibles y útiles para la toma de decisiones, la implementación de políticas, la mejora de procesos o la creación de productos innovadores, con el objetivo final de generar un impacto positivo en la práctica y en el ámbito en el que se desarrolla el estudio.

Además, el enfoque aplicado de investigación suele enfocarse en la búsqueda de soluciones innovadoras y creativas para desafíos y problemáticas específicas. Esto implica la utilización de metodologías flexibles y adaptativas que permitan abordar la complejidad de los problemas reales, integrando diferentes perspectivas y enfoques para obtener resultados robustos y significativos. Así, la investigación aplicada no solo busca generar conocimiento académico, sino también impactar de manera positiva en la práctica, contribuyendo al desarrollo sostenible y a la experiencia profesional (Tomaselli, 1996).

### **Hipótesis**

Al implementar un programa de mantenimiento predictivo que incluya inspecciones regulares, monitoreo continuo de las condiciones de funcionamiento y análisis de datos para identificar posibles fallos, se espera prolongar la vida útil del estabilizador, prevenir averías críticas y mejorar la seguridad en las operaciones de perforación.

## **Métodos**

Teniendo como punto de partida los objetivos del proyecto de investigación, se define una metodología por etapas, que consta de un diagnóstico oportuno de la herramienta de perforación, un registro o trazabilidad del proceso de mantenimiento, seguimiento del funcionamiento de la herramienta y la documentación en correlación a los datos obtenidos; lo cual se integran las etapas de acuerdo a los objetivos específicos planteados en el proyecto investigativo:

### ***Etapa 1-Acondicionar área para los estabilizadores***

El acondicionamiento del área para los estabilizadores en la empresa Schlumberger Limited es un proceso crucial dentro de las operaciones de perforación petrolera. Consiste en preparar y adaptar físicamente el entorno donde se ubicarán y utilizarán los estabilizadores, que son componentes esenciales de la sarta de perforación. Esta preparación incluye la creación de un espacio adecuado y seguro para almacenar, inspeccionar, mantener y manipular los estabilizadores, garantizando su funcionamiento óptimo y prolongando su vida útil.

En primer lugar, se realiza una evaluación del área designada para los estabilizadores, considerando aspectos como el espacio disponible, la accesibilidad para equipos y personal, la seguridad de la zona y la infraestructura necesaria. Posteriormente, se lleva a cabo la limpieza y organización del área, asegurando que esté libre de obstrucciones, residuos o elementos que puedan interferir con las operaciones o representar riesgos para la seguridad. Una vez acondicionada el área, se procede a instalar equipos de manipulación y almacenamiento específicos para los estabilizadores.

### ***Etapa 2-Realizar inventarios de equipos, herramientas e insumos en el área de trabajo***

En primer lugar, se identifican y enumeran todos los equipos, herramientas e insumos relacionados con los estabilizadores, incluyendo los propios estabilizadores, sistemas de manipulación y almacenamiento, herramientas de inspección y mantenimiento, materiales de

seguridad, entre otros. Cada elemento es registrado con su nombre, descripción, número de serie (si aplica), estado de funcionamiento, fecha de adquisición y ubicación dentro del área.

Una vez recopilada esta información, se procede a realizar un inventario físico, que consiste en verificar la existencia y condición de cada elemento en la realidad. Se utiliza tecnología de seguimiento y etiquetado para facilitar este proceso y asegurar la precisión de los datos recabados.

### ***Etapas 3- Investigar y evaluar las tecnologías y prácticas actuales de estabilización de la sarta de perforación***

Una de las tecnologías empleadas en el mantenimiento predictivo es el monitoreo continuo de variables clave, como la temperatura, presión, vibraciones y desgaste de los componentes. Esto se realiza a través de equipos de detección de fallas y sistemas de monitoreo integrados en los estabilizadores y la sarta de perforación. La ventaja de esta tecnología radica en la detección temprana de anomalías y la posibilidad de tomar medidas preventivas antes de que ocurran fallas mayores.

Por otra parte, se toman en cuenta los análisis de datos históricos y patrones de desempeño de los estabilizadores. Esto permite identificar tendencias, establecer intervalos de mantenimiento preventivo y tomar decisiones informadas sobre reparaciones o reemplazos de componentes.

Además, al finalizar se utilizan técnicas de inspección no destructiva (NDT) para evaluar la integridad estructural de los estabilizadores y detectar posibles defectos o daños. Estas técnicas incluyen pruebas de ultrasonido, radiografías, inspección visual avanzada, entre otras.

### ***Instrumentos***

Se tomaron datos históricos de mantenimientos correctivos y preventivos: Estos registros proporcionan información detallada sobre las intervenciones pasadas en los estabilizadores. Se analizan las acciones realizadas, los motivos de los mantenimientos, las piezas reemplazadas, los tiempos de inactividad y los costos asociados. Certificados de pruebas de ultrasonido; Las pruebas de ultrasonido son fundamentales para evaluar la integridad estructural de los estabilizadores. Certificados de material; Los estabilizadores están fabricados con materiales específicos que deben cumplir con ciertas normativas y estándares de calidad. Reportes de inspección; Los reportes de inspección contienen los resultados de las evaluaciones visuales y técnicas realizadas en los estabilizadores durante las inspecciones periódicas.

Estos reportes incluyen detalles sobre el estado superficial de las piezas, la presencia de desgastes, daños o deformaciones, la funcionalidad de los sistemas de conexión y otros aspectos relevantes para la seguridad y el rendimiento de los equipos. El análisis de estos reportes permite identificar áreas de riesgo, evaluar la necesidad de intervenciones y planificar estrategias de mantenimiento predictivo.

## **Resultados**

Conducto regular para el análisis de la información partiendo desde el inventario, análisis de fallas, diagnóstico y mantenimiento predictivo del estabilizador de sarta de perforación.

### **Objetivo**

Garantizar una gestión integral del estabilizador de sarta de perforación, optimizando su rendimiento, prolongando su vida útil y reduciendo los tiempos de inactividad por mantenimientos correctivos no planificados. Además, permite tomar decisiones informadas basadas en datos y evidencias, lo que contribuye a mejorar la eficiencia y la seguridad en las operaciones de perforación.

### **Marco Normativo**

Integrar estos requerimientos normativos en el proyecto asegura el cumplimiento de estándares de calidad, seguridad y medio ambiente, así como la aplicación de mejores prácticas en los procesos de mejora continua, contribuyendo a la eficiencia operativa y a la mitigación de riesgos en las actividades petroleras.

API son ampliamente reconocidas en la industria petrolera y abarcan aspectos como el diseño, fabricación, inspección y mantenimiento de equipos de perforación. En el caso específico de la estabilización de sarta de perforación, las normas API RP 7G y API RP 7-2 establecen requisitos y prácticas recomendadas para el diseño y uso de estabilizadores.

ISO 9001:2015: Norma Internacional de la ISO para sistemas de gestión de calidad.

ISO 14001:2015: Norma Internacional de la ISO para sistemas de gestión ambiental.

ISO 45001:2018: Norma Internacional de la ISO para sistemas de gestión de seguridad y salud en el trabajo.

DS-1: Especificaciones técnicas del International Association of Drilling Contractors (IADC) para equipos y materiales utilizados en operaciones de perforación.

A nivel nacional, las regulaciones colombianas específicas para la industria petrolera, como las establecidas por la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) y otras entidades regulatorias, son de suma importancia. Estas normativas abarcan aspectos como licencias de operación, estándares de seguridad, protección ambiental y procedimientos de inspección y mantenimiento.

### **Fichas de Caracterización**

En las técnicas de creación de fichas de caracterización para los procesos de estabilización de sartas de perforación, se lleva a cabo un análisis exhaustivo que abarca tanto diagnósticos antecedentes como mantenimientos programados. Este proceso implica recopilar información detallada sobre el historial de cada estabilizador, incluyendo datos de inspecciones anteriores, análisis de fallas y reparaciones realizadas. Además, se identifican los diagnósticos previos relacionados con el desempeño de los estabilizadores, tales como niveles de desgaste, deformaciones estructurales, problemas de corrosión u otros deterioros que puedan afectar su funcionalidad.

Figura 1

Ficha de inspección estabilizador de sarta 50497K.

DRILCO		DRILCO Inspection Report (NDT)												
CUSTOMER:	SLB	LOCATION:	BASE VILLAVICENCIO	WORK ORDER:	1143887	DATE:	2-ene-24							
TOOL DESCRIPTION	NEAR BIT STABILIZER 3 1/4"	REPORT N°	IV-0041-24	SERIAL NUMBER:	50497K									
INSPECTION PERFORMED (ASNT TC-1A) INSPECTION CRITERION: DS1 Vol. 3 5 EDIC														
VISUAL	X	DIMENSIONAL	X	MAGNETIC PARTICLE	X	LIQUID PENETRAT	--							
ID	LENGTH		FISHING NECK			TONG SPACE			BODY CONDITION					
	TOTAL	EFFECTIVE	LENGTH	OD	ID	LENGTH	OD	ID						
2 7/8"	111 11/16"	--	50 1/2"	6 13/16"	2 7/8"	42 5/8"	6 13/16"	3 1/2"	OK					
CONNECTION TYPE:	PIN	PIN												
CONN LENGTH:	--	--												
BEVEL DIAMETER:	--	--												
CYL DIAMETER:	--	--												
PIN RG LENGTH:	--	--												
PIN RG DIAM:	--	--	<table border="1"> <tr> <td>OD ALETAS:</td> <td>8 1/4"</td> </tr> <tr> <td>ANCHO ALETAS:</td> <td>2"</td> </tr> <tr> <td>LONG CONTACTO ALETAS:</td> <td>15 1/2"</td> </tr> </table>						OD ALETAS:	8 1/4"	ANCHO ALETAS:	2"	LONG CONTACTO ALETAS:	15 1/2"
OD ALETAS:	8 1/4"													
ANCHO ALETAS:	2"													
LONG CONTACTO ALETAS:	15 1/2"													
CONNECTION TYPE:	BOX	BOX	<table border="1"> <tr> <td>NC50</td> <td>4 1/2 REG</td> </tr> </table>						NC50	4 1/2 REG				
NC50	4 1/2 REG													
CONN LENGTH:	4"	4 3/4"												
BEVEL DIAMETER:	6 11/32"	5 11/32"												
C. BORE LENGTH:	21/32"	21/32"												
C. BORE DIAM:	5 5/16"	4 11/16"												
B. BACK DIAM:	4 5/8"	--												
B. BACK LENGTH:	3 1/32"	--												
REMARKS:	SE REALIZO FULL MPI TAPER A= 26,10° TAPER B= 23,70° HARD FACING: MATERIAL H300 CON 3 HILERAS DE INSERTOS TRAPEZOIDALES EN CADA ALETA OPERATIVO,													
				RECESS FLOAT VALVE:	ID=	3 1/2"	LONG=	12 7/8"	TYPE=	4 R				
FINAL CONDITION														
OPERATIVE	X	REPAIRABLE	--	OUT OF SERVICE:	--									
MPI:	OK	INTENSITY LIGHT UV:	1.286 uW/cm2	BLACK LIGHT:	V39001	RADIOMETER:	C31002							
CONCENTRATION ARTICLE:	0,3 ml/100 ml	FIELD INDICATOR:	C16001	THREADS PROFILE GAUGE:	N56001	AC YOKE:	V38003							
INSPECTION W/E.M.I:	----	CATEGORY:	CAT 3-5	DRIFT TEST:	--	COILD F/ MPI:	C37008							
MEASUREMENT TOOL:	RING GAUGE: 3 1/4"	SERIAL:	N57099	PH WATER:	9,2 PH METER:	C90004								
INSPECTION CRITERION:	DS1 VOL 3 5 EDIC			INSPECTOR LEVEL II:	JULIAN CEDIEL									

WIS-PR-QU-029-F004 Rev A

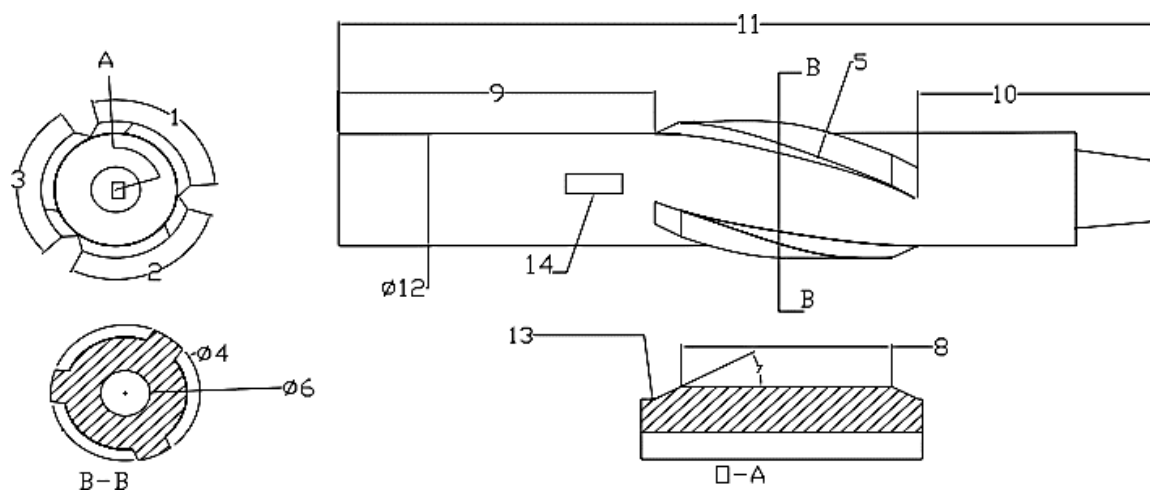
Pag 1 of 1

Fuente. DRILCO NDT Inspection.

se establecen los mantenimientos programados necesarios para garantizar la integridad y eficiencia de los estabilizadores, definiendo los intervalos de inspección, limpieza, lubricación y cualquier otra actividad preventiva o correctiva requerida para optimizar su rendimiento y prolongar su vida útil de manera segura y confiable.

## Figura 2

Definición de medidas del estabilizador.



Fuente. ANSI/API SPECIFICATION 7-1/ISO 10424-1

1 + 2 + 3 Ángulo de envoltura

4 Diámetro de la hoja

5 Ancho de la hoja

6 Diámetro interno

7 Ángulo de conicidad de la hoja

8 Longitud de la corona

9 Longitud del cuello superior

10 Longitud del cuello inferior

11 Longitud total

12 Diámetro del cuello

13 Radio, mínimo de 25 mm (1 pulgada),  
en 2 lugares

14 Receso de marcado

**Tabla 1***Dimensiones de las cuchillas*

Arriba y abajo del pozo	30 ± grados integrales					
ángulos cónicos de la hoja	30-45 grados soldados					
Diámetro de la hoja +0/-0,8	130	191	245	318	397	
	a 187	a 244	a 311	a 394	a 508	>508
Número de cuchillas, integrales	3	3	3	3	3	3
Número de cuchillas soldadas	3	3	3 o 4	3 o 4	3 o 4	4
Ancho de hoja (integral) ± 6	51	64	76	89	102	102
Ancho de hoja (soldada) ± 6	38	51	51	64	76	76
Longitud mínima de la corona						
(ver nota)	305	406	457	457	508	508

NOTA La corona puede ahusarse a opción del cliente para formar una “geometría de sandía” como en la Figura 1. La longitud de la corona incluye la longitud de este cono poco profundo, todas las dimensiones están en milímetros.

El requisito del ángulo cónico se aplica sólo para los primeros 25 mm radialmente desde la superficie de la hoja. Si la altura de la hoja excede los 25 mm, el ángulo cónico para el resto de la altura puede ser de hasta 45 grados a discreción del fabricante.

*Fuente.* ANSI/API SPECIFICATION 7-1/ISO 10424-1

Según los estándares (API, 2011) en un estabilizador de hoja integral, las muestras para pruebas de tracción e impacto se obtendrán de una prolongación de cualquiera de los cuellos, ubicando el centro de la muestra a una distancia mínima de 100 mm (4 pulgadas) desde un extremo libre y al menos a 25 mm (1 pulgada) debajo de la superficie terminada del cuello. Esta prolongación debe tener el mismo diámetro que el cuello en el momento del tratamiento térmico. Además, la zona uniforme se extenderá al menos 400 mm (16 pulgadas) desde cada extremo del estabilizador acabado o hasta una distancia de 25 mm (1 pulgada) de las hojas del estabilizador, lo que sea menor. La confirmación de la extensión del área con propiedades controladas se realizará mediante pruebas de dureza Brinell, con una dureza mínima de 285 HBW.

### Figura 3

#### *Almacenamiento de estabilizadores de sarta*



*Fuente. Autoría propia*

Los estabilizadores de sarta son almacenados y clasificados de acuerdo con su peso y diámetro, considerando también su longitud. Esta práctica de inventariado se realiza para asegurar una gestión eficiente de los equipos, permitiendo su fácil ubicación y selección durante las operaciones de perforación.

El peso y diámetro de los estabilizadores determinan su capacidad para proporcionar estabilidad a la sarta de perforación, siendo esenciales para mantener el control direccional y mejorar la eficiencia de las actividades de perforación.

**Tabla 2**

*Sistema de inventarios de los estabilizadores de sarta (Schlumberger limited).*

ITEM	FECHA	FILECODEQ-TRAC	DESCRIPCION	SERIAL	OD	CONEXIONES	Q-TRAC			PAPERLESS	UBICACIÓN	COMENTARIOS
							REPORTE	ESTADO	CERTIFICACION			
90	11/01/2023	STA-IB-SOL-0837	STRINGSTABILIZER	50485K	83/8"	NC50PIN* BOX	26-DICIEMBRE-22	ONLOCATION	NOADJUNTO	***	CAMPO	ONLOCATION
91	11/01/2023	STA-IB-SOL-0837	STRINGSTABILIZER	50488K	83/8"	NC50PIN* BOX	27-DICIEMBRE-22	ONLOCATION	OK	***	CAMPO	ONLOCATION
97	11/01/2023	STA-IB-SOL-0825	STRINGSTABILIZER	43391KAA	81/4"	NC50PIN* BOX	1-ene-23	RONG	NOADJUNTO	***	CAMPO	ENVIADOAPOZOPIACABUEY
98	11/01/2023	EQ-STA-IB-SOL-0837	STRINGSTABILIZER	57925-25	81/4"	NC50PIN* BOX	15-AGO-22	RITE	OK	STA-IB-SOL-0837*	CAMPO	ENVIADOAKOALA
101	11/01/2023	EQ-STA-IB-SOL-0837	STRINGSTABILIZER	72356H	81/4"	NC50PIN* BOX		ONLOCATION			WIS	ENVIADOABASEWSVILLAVICENCIO
21	1/05/2023	STA-IB-SOL-1050	NEARBITSTABILIZER	72339H	101/4"	65/8" REGBOX* BOX	23-AGOSTO-22	RONG	NOADJUNTO	***	BASECOTA	CEROHORASOPERATIVO
24	1/05/2023	STA-NB-IBSOL-0837	NEARBITSTABILIZER	43396KA	83/8"	NC50PIN* BOX	30-sep-22	RONG	NOADJUNTO	19-MARZO-22	BASECOTA	CEROHORASOPERATIVO
25	1/05/2023	STA-NB-IBSOL-0837	NEARBITSTABILIZER	57925-30	83/8"	NC50PIN* BOX	01-junio-22	RONG	NOADJUNTO	01-junio-22	BASECOTA	CEROHORASOPERATIVO
31	1/05/2023	STA-IB-SOL-2575	STRINGSTABILIZER	57077-6	251/2"	75/8 REGPIN* BOX	REPORTEINSPWIS12-DIC-19	RONG	NOADJUNTO	6/01/2022	WIS	ENVIADOABASEWSVILLAVICENCIO
46	1/11/2023	STA-IB-SOL-1737	STRINGSTABILIZER	50505K	173/8"	75/8" REGPIN* BOX	REPORTEINSPWIS01-SEPT-21	RONG	OK	4-feb-22	WIS	ENVIADOABASEWSVILLAVICENCIO
57	1/11/2023	STA-NB-IBSOL-1750	STRINGSTABILIZER	50541K	145/8"	75/8" REGPIN* BOX	23-10-22	RONG	NOTIENE	23-10-22	WIS	ENVIADOABASEWSVILLAVICENCIO
67	1/11/2023	STA-IB-SOL-1212	STRINGSTABILIZER	50491K	113/4"	65/8" REGPIN* BOX	B.V 08-MARZO-22	RONG	OK	16-sep-22	WIS	INSPECCION Y REPARACION, CONIN BOX CORTADAPARA INVESTIGACION
	1/11/2023	STA-IB-SOL-1212	STRINGSTABILIZER	50439K	121/8"	65/8" REGPIN* BOX		RONG			WIS	ENVIADOABASEWSVILLAVICENCIO
71	1/11/2023	STA-IB-SOL-1212	STRINGSTABILIZER	85393E	121/8"	65/8" REGPIN* BOX	10-sep-22	RONG			WIS	ENVIADOABASEWSVILLAVICENCIO
49	2/11/2023	STA-IB-SOL-1725	STRINGSTABILIZER	50526K	171/4"	75/8 REGBOX* BOX	10-DICIEMBRE-2022	RITE	NOTIENE	13-mar-22	CAMPO	ENVIADOAPOZOZORSAL
	2/11/2023	STA-IB-SOL-12	STRINGSTABILIZER	50490K	12"	65/8" REGPIN* BOX	17-nov-22	RONG	NOADJUNTO	17-nov-22		ENBASECEROHORAS
	15-02-23	STA-IB-SOL-12	STRINGSTABILIZER	57925-18	12"	65/8" REGPIN* BOX	17-nov-22	RITE	NOADJUNTO	17-nov-22	ONLOCATION	ENVIADOAGUACO
80	15-02-23	STA-IB-SOL-1150	STRINGSTABILIZER	05275G	111/2"	65/8" REGPIN* BOX	11-OCTUBRE-22	RITE	NOADJUNTO	**	OPENYARD	ENBASECEROHORAS
95	15-02-23	STA-IB-SOL-0825	STRINGSTABILIZER	85385EAA	81/4"	NC50PIN* BOX	28-sep-22	RITE	NOADJUNTO	***	CAMPO	ENVIADOAKOALA
102	15-02-23	EQ-STA-IB-SOL-0837	STRINGSTABILIZER	50489K	81/4"	NC50PIN* BOX	13-OCTUBRE-22	RONG	NOADJUNTO	13-OCTUBRE-22	WIS	ENVIADOABASEWSVILLAVICENCIO
	15-02-24	STA-IB-SOL-1037	STRINGSTABILIZER	57925-23	101/2"	65/8" REGPIN* BOX						ENBASECEROHORAS
92	17-01-23	STA-IB-SOL-0825	STRINGSTABILIZER	85387E	81/4"	NC50PIN* BOX	9/10/2022	RONG	NOADJUNTO	5/08/2022	INSPECCION	ENVIADOACAMPOTIGUI
	17-01-24	STA-IB-SOL-0825	STRINGSTABILIZER	50499K	81/4"	NC50PIN* BOX						ENPOZOJACANA

*Fuente. Autoría propia*

**Figura 4**

*Proceso de rectificado de rosca en los exteriores (rosca externa)*



*Fuente.* Autoría propia

El proceso de rectificado de rosca para el estabilizador de sarta es una etapa crucial en la fabricación de este componente. Consiste en mecanizar con precisión las roscas en el extremo del estabilizador, siguiendo las especificaciones y tolerancias definidas en los estándares de la industria. Este proceso se realiza utilizando maquinaria especializada, como tornos CNC y herramientas de rectificado, que garantizan la precisión y la calidad de las roscas. El objetivo principal del rectificado de rosca es crear un acoplamiento seguro y firme entre el estabilizador y otras herramientas de la sarta de perforación, asegurando así un funcionamiento óptimo durante las operaciones de perforación.

**Figura 5**

*Proceso de acabado de rosca (rosca externa mecanizada)*



*Fuente. Autoría propia*

**Figura 6**

*Rectificado de rosca (rosca interna mecanizada)*



*Fuente. Autoría propia*

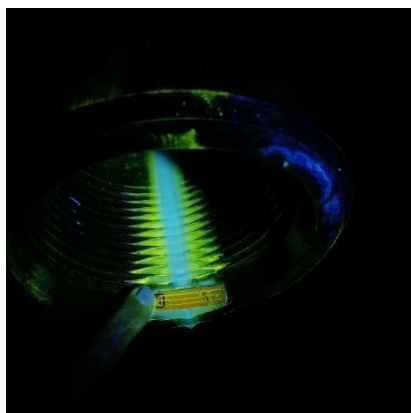
El objetivo principal es lograr una conexión sólida y segura que permita la transmisión eficiente de fuerzas y movimientos durante las operaciones de perforación, garantizando así la integridad y estabilidad del sistema de perforación en su conjunto.

### **Prueba de Ultrasonido**

Un estudio de los autores Jiménez & Bejarano (2017) indican que la prueba de ultrasonido se lleva a cabo con el propósito de evaluar la porosidad y detectar posibles fallas en el material del estabilizador de sarta. Esta técnica de inspección no destructiva utiliza ondas ultrasónicas para penetrar el material y detectar irregularidades internas como poros, grietas, inclusiones o discontinuidades. Al aplicar el ultrasonido, se emiten pulsos de alta frecuencia que viajan a través del material y son reflejados por las imperfecciones detectadas, generando así una imagen que permite identificar la presencia de posibles defectos. Esta prueba es fundamental para garantizar la integridad estructural del estabilizador y su capacidad para soportar las condiciones operativas durante la perforación de pozos petroleros.

### **Figura 7**

*Prueba de ultrasonido roscado de acoplamiento*



*Fuente. Autoría propia*

El proceso de inspección de partículas magnéticas fluorescentes es una técnica utilizada para detectar discontinuidades superficiales y subsuperficiales en materiales ferromagnéticos, como el acero utilizado en los estabilizadores de sarta de perforación. En este proceso, se aplica un polvo de partículas magnéticas sobre la superficie del componente a inspeccionar. Luego, se magnetiza el material mediante el uso de corriente eléctrica o imanes, lo que hace que las partículas magnéticas se acumulen en áreas donde haya discontinuidades, como grietas, inclusiones o falta de fusión (Buitrago, 2009).

### **Figura 8**

*Prueba de inspección de superficies*



*Fuente. Autoría propia*

Una vez aplicado el campo magnético, se inspecciona la superficie con una lámpara ultravioleta o una luz negra, la cual hace que las partículas magnéticas fluorescentes emitan luz visible, resaltando las áreas donde se encuentren defectos. Esta técnica es altamente efectiva para detectar discontinuidades superficiales y subsuperficiales que podrían comprometer la integridad estructural del estabilizador de sarta de perforación. La inspección de partículas magnéticas

fluorescentes es una parte crucial del proceso de control de calidad y aseguramiento de la integridad de estos componentes utilizados en la industria petrolera.

### **Figura 9**

*Detección de averías en los filos de las cuchillas.*



*Fuente. Autoría propia*

### **Proceso de Soldadura**

### **Figura 10**

*Proceso de soldadura superficial y corrección de porosidades.*



*Fuente. Autoría propia*

La soldadura con carburo de tungsteno H-200 y H-300 se utiliza ampliamente para la reparación de las capas superficiales del estabilizador de sarta de perforación debido a sus propiedades físicas y químicas excepcionales. Estas soldaduras están compuestas principalmente de carburo de tungsteno, un material extremadamente duro y resistente al desgaste, que se mezcla con un aglutinante metálico como el cobalto para formar una aleación.

### **Figura 11**

*Proceso de reparación de cuchillas (Insertos trapezoidales).*



*Fuente. Autoría propia.*

### **Figura 12**

*Desbaste y pulido de los ángulos de corte.*



*Fuente. Autoría propia.*

**Figura 13**

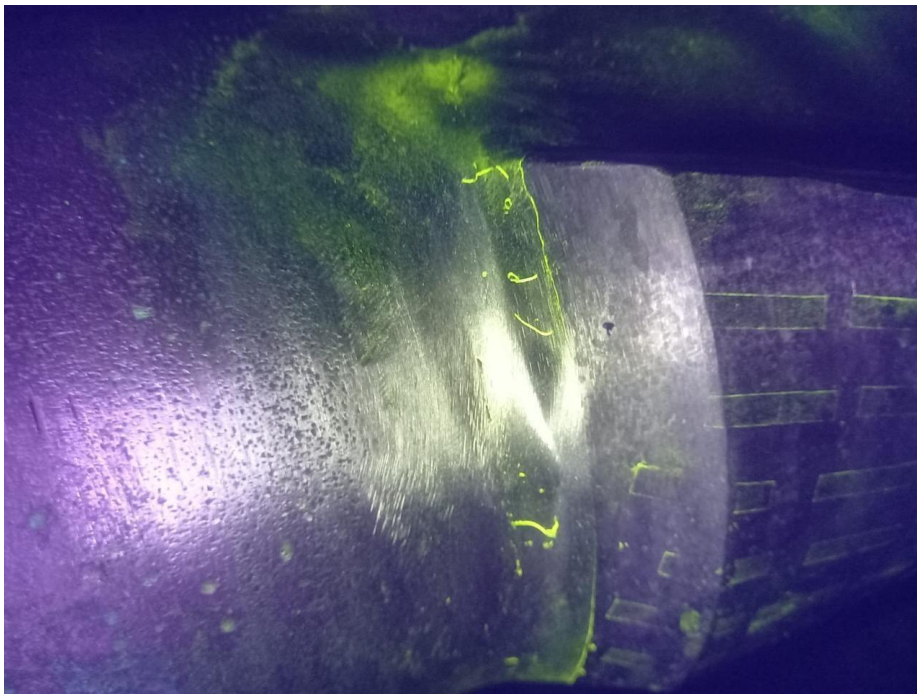
*Inspección de porosidad de superficies.*



*Fuente. Autoría propia.*

**Figura 14**

*Eliminación de grietas.*



*Fuente. Autoría propia*

**Figura 15**

*Pintado y Clasificación según diámetro de la sarta.*



*Fuente. Autoría propia.*

**Figura 16**

*Almacenamiento de producto conforme.*



*Fuente. Autoría propia.*

## Conclusión

La inspección de superficies permitió identificar y evaluar cualquier daño o desgaste presente en el estabilizador de sarta de perforación, lo que facilitó la posterior reparación de las grietas de manera oportuna y efectiva. Esto es esencial para prevenir posibles fallos durante las operaciones de perforación, garantizando la seguridad y la continuidad de la actividad petrolera. Asimismo, la rectificación de las roscas aseguró un ajuste adecuado y seguro del estabilizador en el conjunto de la sarta, minimizando la posibilidad de fugas o inestabilidades que puedan comprometer la operación del pozo.

Al cumplir con los estándares de calidad establecidos para el mantenimiento del estabilizador de sarta de perforación, se ha garantizado no solo su funcionamiento óptimo, sino también la prolongación de su vida útil y la reducción de costos asociados a reparaciones y reemplazos frecuentes. Esto se traduce en una mayor eficiencia operativa, una menor incidencia de paradas no programadas y, en última instancia, en un proceso de perforación más seguro y rentable para la empresa.

Este componente es de vital importancia en la operación de la sarta de perforación, ya que contribuye significativamente a la estabilidad y precisión del proceso de perforación en los pozos petroleros. Su correcto mantenimiento y cumplimiento de los estándares de calidad son fundamentales para asegurar la integridad estructural y la eficiencia operativa de todo el sistema de perforación.

El enfoque de mantenimiento predictivo adoptado en este proyecto ha demostrado ser altamente efectivo para prevenir fallas y maximizar la disponibilidad operativa del estabilizador de sarta de perforación. Al utilizar técnicas avanzadas de inspección y monitoreo, se pudo identificar y abordar proactivamente cualquier deterioro o anomalía en el componente, evitando así interrupciones no planificadas en las operaciones de perforación. Esta estrategia de

mantenimiento predictivo no solo ha optimizado la confiabilidad del equipo, sino que también ha contribuido significativamente a la reducción de costos asociados con reparaciones imprevistas y tiempos de inactividad no programados.

El mantenimiento correctivo desempeñó un papel crucial en la restauración y mejora de las condiciones operativas del estabilizador de sarta de perforación. Mediante la aplicación de técnicas de reparación especializadas y la sustitución de componentes dañados, se logró restablecer la funcionalidad y la integridad estructural del equipo.

Además, la inspección por ultrasonido proporciona resultados detallados y precisos sobre el estado de las superficies internas del estabilizador, lo cual es crucial para evaluar su condición y determinar la necesidad de intervenciones de mantenimiento. Esta técnica brinda información cuantitativa sobre el tamaño, ubicación y tipo de defectos encontrados, lo que facilita la toma de decisiones informadas respecto a las acciones a seguir, ya sea reparaciones, sustituciones o ajustes, contribuyendo así a prolongar la vida útil del equipo y a garantizar su desempeño óptimo en operaciones futuras.

### Referencias Bibliográficas

Amado, S., Monterosa, S., & Sánchez, C. (2015). *Sarta de perforación*. Bogotá D.C: Fundación Universidad de América.

API, (03 de Abril de 2011). *Specification for Rotary Drill Stem Elements*. Covers Addendum: [https://www.api.org/~media/files/certification/monogram-apiqr/0\\_api-monogram-apiqr/advisories-updates/addenda-errata/api\\_7-1\\_1st-edition\\_addendum-3\\_april-2011.pdf](https://www.api.org/~media/files/certification/monogram-apiqr/0_api-monogram-apiqr/advisories-updates/addenda-errata/api_7-1_1st-edition_addendum-3_april-2011.pdf), AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE

Buitrago, H. (2009). *Modelo de aplicación de las técnicas aprendidas en el curso de supervisión de obras de ingeniería e integridad de activos, dictado por la compañía tecnicontrol s.a.* Bogotá D.C: Universidad Libre de Colombia.

Bustamante, M, & Morales Vanegas, A. (2019). *Propuesta de un diseño de bottom hole assembly (BHA) y evaluación de broca, para mejorar el desempeño de las herramientas de arreglo de fondo en un campo de ecopetrol, aplicable a futuras campañas de perforación.* Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

Espinosa, J., & Barreiro, A. (2013). *Parámetros de diseño para sartas de perforación según la norma api rp7g 1998 y validación con el diseño utilizado en la perforación del pozo yean I del campo vega.* Neiva: Universidad SURCOLOMBIA.

ITEH STANDARDS. (01 de Septiembre de 2004). *INTERNATIONAL STANDARD 10424-1*. INTERNATIONAL STANDARD 10424-1: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/33266/4c1614430fd94a998aab79dc61989d3c/ISO-10424-1-2004.pdf>

- Jiménez, D., & Bejarano, D. (2017). *Inspección de uniones soldadas mediante ensayo no destructivo de ultrasonido con el equipo veo 16-64 sonatest*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pererira.
- López, E. (2009). *El mantenimiento productivo total TPM y la importancia del recurso humano para su exitosa implementación*. Bogotá D.C: Universidad pontificia Javeriana.
- Ministerio de Minas y Energías. (2017). *Resolución 40687*. Resolución 40687 Criterios técnicos para proyectos de de perforación exploratoria de hidrocarburos:  
[https://www.minenergia.gov.co/documents/2636/37521-res\\_40687\\_180717.pdf](https://www.minenergia.gov.co/documents/2636/37521-res_40687_180717.pdf)
- NTU - Trondheim NORSK Olje&Gass. (2019). *Well Integrity*. Oil Production.net:  
<https://oilproduction.net/perforacion/item/3694-well-integrity>
- Ojeda, D. (2021). *Generación de un modelo predictivo para eventos de pega de tubería en pozos de petróleo*. Bogotá D.C: Universidad de los Andes.
- Pallares, H. (2021). *Estrategia de Ingeniería para Mejorar la Eficiencia de Perforación de Pozos Petroleros Mediante un Modelado Estadístico de Predicción de Atrapamientos de Sartas de Perforación*. Artículos del Congreso Internacional de Investigación Academia Journals Hidalgo 2021 (p. 1417-1418). Hidalgo: © Academia Journals 2021.
- Pérez, F. (2021). *Conceptos generales en la gestión del mantenimiento industrial*. Bucaramanga: Universidad Santo Tomás.
- Pettit, G., & Wadsworth, T. (2020). *Standard DS-1 Drill Stem Inspection* (Fifth edition ed.). Houston, USA: Bureau Veritas.

- Ramos, J. (02 de Diciembre de 2011). Estado del arte de brocas de perforación. *Universidad de América*, págs. 99-113.
- Rivera, P. (2013). *Diseño de Sarta de perforación*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Rzepka, A., & Ziaja, D. (01 de Abril de 2024). *NDT NET*. in Nondestructive Testing and Evaluation: Academic Insights (2022/23):  
[https://www.ndt.net/article/rejndt/2\\_1/papers/Using\\_the\\_DIC\\_Technique\\_in\\_Damage\\_Detection\\_for\\_a\\_Cantilevered\\_Composite\\_Beam.pdf](https://www.ndt.net/article/rejndt/2_1/papers/Using_the_DIC_Technique_in_Damage_Detection_for_a_Cantilevered_Composite_Beam.pdf)
- Sánchez, A. (2017). *Técnicas de mantenimiento predictivo. Metodología de aplicación en las organizaciones*. Bogotá D.C: Universidad Católica de Colombia.
- Serrano, J., & Suarez, J. (2017). *Evaluación técnico-financiera de la implementación de brocas policristalinas de calibres extendidos con motores de fondo y herramientas rotatorias en la sección 12 1/4" del campo castilla*. Bogotá D.C.: Fundación Universidad de América.
- Tomaselli, L. (1996). *Investigación Aplicada*. Quito: Abya-Yala.
- Ubaque, Y., & Zabala, E. (2019). *Estructuración del programa de mantenimiento predictivo por condición para los equipos del área de producción en la empresa Kellogg de Colombia SA*. Bogotá D.C: Universidad distrital Francisco José de Caldas.
- Villada, F., Moreno, G., & Valencia, J. (2002). El mantenimiento predictivo y su efecto en la optimización de costos de mantenimiento. *Revista Facultad de Ingeniería*, 95-99.