

PERFORACIÓN CON CASING (CWD) EN CAMPOS MADUROS: LECCIONES, INNOVACIÓN Y EL SALTO DIGITAL TRAS 600 POZOS EN EL GOLFO SAN JORGE

Alejandro Lafont, Pan American Energy, alafontfederico@pan-energy.com

Erasmus Salazar Bracho, Pan American Energy, esalazarbracho@pan-energy.com

Javier Abner Pino, Pan American Energy, jpino@pan-energy.com

Sergio Sanjurjo, Pan American Energy, ssanjurjo@pan-energy.com

Guillermo Tapia, Tenaris, gtapia@tenaris.com

Gastón D'Urso, gadurso@tenaris.com

Constantino Espinosa, cespinosa@tenaris.com

1. Sinopsis

En la última década, la perforación con Casing (CwD) se consolidó como una metodología clave en la Cuenca del Golfo San Jorge, especialmente para secciones de Producción. Con casi 600 pozos perforados mediante esta técnica, Pan American Energy (PAE) ha atravesado una curva de aprendizaje robusta, enfrentando desafíos operativos, técnicos y económicos que impulsaron el desarrollo de soluciones innovadoras y la adopción de herramientas digitales.

La experiencia acumulada permitió identificar y resolver múltiples problemáticas operativas:

Fallas de tubulares por fatiga y abocardamientos de conexiones, mitigadas con controles de torque y el desarrollo de nuevas conexiones.

Eventos operativos y desviaciones de la verticalidad, abordados mediante redefinición de parámetros, rediseño de BHA y mejoras en centralizadores.

Optimización de la ROP, impulsada por la implementación de sensores de vibración de alta frecuencia y el uso de redes neuronales para análisis predictivo y ajuste dinámico de parámetros.

Más allá de las mejoras operativas, la perforación con Casing (CwD) se ha consolidado como una tecnología clave para asegurar la continuidad operativa de PAE en campos maduros, gracias a sus beneficios económicos y su capacidad para reducir tiempos de perforación y riesgos de HSE frente a la metodología convencional. Esta eficiencia, reflejada en menores tiempos y costos por pozo con una mayor previsibilidad en la ejecución, permite mantener la viabilidad de los proyectos, incluso en un contexto desafiante.

El siguiente paso es acelerar la digitalización del proceso, integrando modelos predictivos basados en datos reales de campo, optimización automatizada de parámetros operativos, y un monitoreo continuo de la dinámica de la sarta. Esta transformación digital busca ampliar el alcance de CwD, incluyendo un proyecto de perforación de CwD direccional y el desarrollo de metodologías de perfilaje adaptadas a esta técnica, superando así los límites técnicos actuales.

Este trabajo presenta un balance completo: desde las lecciones aprendidas y soluciones desarrolladas, hasta los próximos desafíos y la visión de futuro para seguir mejorando la eficiencia, el alcance y la sostenibilidad de la perforación con casing en campos maduros de la Cuenca del Golfo San Jorge.

2. Introducción

La perforación con casing (Casing While Drilling, CwD) se ha consolidado en la última década como una de las metodologías más eficientes para atravesar zonas problemáticas en campos maduros a nivel mundial. Su adopción creciente responde a su capacidad de reducir tiempos no productivos (NPT), minimizar riesgos operativos y mejorar la calidad de construcción del pozo. En la Cuenca del Golfo San Jorge (GSJ), esta técnica ha sido clave en la estrategia de desarrollo de Pan American Energy (PAE), especialmente para la perforación de secciones de producción en contextos de alta complejidad geológica.

La metodología CwD permite abordar simultáneamente tres problemáticas críticas: pérdidas severas de circulación, zonas sobre presurizadas por desarrollo de recuperación secundaria, y la necesidad de minimizar los costos para hacer rentable el desarrollo. Estas condiciones suelen converger en campos maduros, donde la integridad de la construcción del pozo es clave para viabilizar nuevos desarrollos.

Desde su primera experiencia piloto en 2008 y su implementación formal en 2015, la aplicación de CwD por parte de PAE ha evolucionado significativamente. A lo largo de más de 600 pozos ejecutados con esta metodología, se ha transitado una curva de aprendizaje profunda que incluyó el abordaje sistemático de problemáticas como fatiga de materiales, desvíos de trayectoria, pérdidas severas de circulación y variabilidad operacional. Estas dificultades impulsaron el desarrollo de soluciones innovadoras basadas en rediseños mecánicos, mejoras en la estabilización de la sarta y la integración progresiva de tecnologías digitales.

Uno de los hitos más relevantes fue la introducción del tramo extrapesado Casing Collar, concebido y desarrollado por el equipo de ingeniería de PAE, que permitió incrementar el peso sobre trépano (WOB) sin comprometer la integridad del casing. Esta mejora incrementó la rigidez axial de la sarta, redujo las vibraciones y habilitó una operación más estable y eficiente. Este avance fue complementado con la adopción de sensores de superficie de alta frecuencia provistos por Tenaris, que permitieron profundizar el análisis dinámico de la sarta y ajustar parámetros de perforación en tiempo real con mayor precisión.

La colaboración con Tenaris ha sido sostenida en el tiempo, aportando valor como proveedor tecnológico en materia de soluciones tubulares, sistemas de sensado de alta resolución y soporte analítico avanzado. A través del procesamiento de datos mediante redes neuronales, se obtuvieron recomendaciones operativas que complementaron la ingeniería de campo desarrollada por PAE. Este trabajo conjunto ha sido clave para potenciar el rendimiento de la técnica, manteniendo siempre el liderazgo técnico y operativo en manos de PAE, que ha coordinado el diseño, validación y ejecución de cada etapa del proceso, integrando experiencia de campo, modelado avanzado y disciplina operativa.

El presente trabajo expone una síntesis de la experiencia acumulada en la aplicación de CwD en campos maduros, destacando los principales desafíos técnicos enfrentados, las soluciones desarrolladas, la incorporación de herramientas digitales y las oportunidades que se abren hacia el futuro. Asimismo, se exploran los avances en CwD direccional y la digitalización integral del proceso como próximos pasos para ampliar el alcance y la eficiencia de esta metodología en contextos operativos cada vez más exigentes.

3. Desarrollo

3.1. Contexto y evolución de CwD en la Cuenca del Golfo San Jorge

La tecnología de perforación con casing (Casing While Drilling, CwD) fue evaluada por primera vez en Cerro Dragón, Cuenca del Golfo San Jorge, en el año 2008 mediante un proyecto piloto que incluyó cinco pozos con tramos de aislación perforados directamente con cañería de 5 ½". El objetivo fue explorar una alternativa viable para atravesar zonas someras depletadas que

presentaban severas pérdidas de circulación y elevados tiempos no productivos. Si bien los resultados técnicos de esa primera experiencia fueron satisfactorios —logrando perforar hasta 1.858 metros en una sola carrera con control aceptable de la verticalidad y sin fallas estructurales críticas— los altos costos asociados a materiales y servicios limitaron su viabilidad económica, postergando su aplicación a gran escala.

Con el correr de los años, y en respuesta al desafío persistente de perforar pozos “infill” en formaciones cada vez más depletadas, Pan American Energy (PAE) relanzó la iniciativa en 2015 bajo una estrategia técnica y económica rediseñada. Se estructuró un protocolo de implementación en etapas progresivas, partiendo de pozos someros con bajas admisiones hasta llegar a secciones profundas y dirigidas. El objetivo fue validar la tecnología en condiciones reales de campo, priorizando la simplificación de componentes, el fortalecimiento del control operativo y la maximización de la eficiencia en cada etapa.

Esta transformación también implicó un cambio profundo en los equipos de subsuelo, particularmente en el Departamento de Desarrollo de Reservas (DDR), que debió adaptar sus metodologías para diseñar pozos con menor información geológica directa. Frente a la imposibilidad de realizar registros convencionales con herramientas de pozo abierto, se impulsaron metodologías alternativas de completación a partir de perfiles obtenidos a pozo entubado, estableciendo nuevos estándares interpretativos que permitieran mantener la eficiencia en el diseño de terminaciones y asegurar la productividad.

Desde entonces, la aplicación de CwD ha experimentado una expansión sostenida en GSJ, consolidándose como una metodología eficiente, segura y económicamente viable para perforar las secciones de producción de pozos en campos maduros. A marzo de 2025, se acumulan cerca de 600 pozos perforados con CwD, lo que convierte a PAE en una de las operadoras con mayor experiencia a nivel regional en esta técnica.

Esta evolución no estuvo exenta de desafíos. El proceso exigió enfrentar complejidades técnicas crecientes asociadas a la integridad del casing bajo condiciones de carga compresiva, al control de trayectoria en zonas con intercalaciones tobáceas o fallas estructurales, y a la optimización de parámetros frente a formaciones de baja resistencia mecánica. Sin embargo, cada obstáculo se transformó en una oportunidad de mejora, y dio lugar al desarrollo de soluciones innovadoras que hoy permiten proyectar nuevas aplicaciones de CwD incluso en contextos más complejos como pozos direccionales.

3.2. Problemáticas técnicas y operativas enfrentadas

La implementación progresiva de la metodología CwD en la Cuenca del Golfo San Jorge permitió identificar un conjunto recurrente de problemáticas técnicas que debieron ser abordadas para garantizar la continuidad operativa y alcanzar niveles sostenidos de eficiencia.

Pérdidas de circulación severas

Una de las principales motivaciones iniciales para incorporar la perforación con casing fue precisamente la necesidad de atravesar zonas someras depletadas con pérdidas severas de circulación. Estas formaciones, de alta permeabilidad y baja presión de poro, generaban admisiones de lodo que no solo incrementaban los costos por productos de perforación, sino que también comprometían la estabilidad del pozo, la calidad de la cementación y la integridad de la aislación. En algunos casos, las pérdidas eran totales sumadas a altas presiones producto de los proyectos de recuperación secundaria, impidiendo la continuidad de la operación bajo esquemas convencionales.

Fallas por fatiga y deformación en conexiones

Durante las etapas iniciales del proyecto, se registraron fallas por fatiga en la zona de compresión de la sarta, particularmente en los primeros 500 metros desde el zapato de la guía. Las conexiones tradicionales BTC, utilizadas en cañería de 5 ½", presentaban un margen reducido entre el torque de apriete y el torque de fluencia, lo que favorecía el abocardamiento del pin y la pérdida de sección efectiva. Estas fallas se asociaban a cargas cíclicas provocadas por vibraciones axiales y radiales, exacerbadas por el contacto continuo entre el casing y la pared del pozo.

Desviaciones de la verticalidad

El control de trayectoria emergió como un desafío central, especialmente en pozos con mayor complejidad estructural o en presencia de intercalaciones tobáceas con contrastes marcados en resistencia mecánica. En ausencia de medición continua de rumbo e inclinación, las desviaciones acumuladas dificultaban el cumplimiento de objetivos geológicos, forzando en algunos casos la suspensión anticipada del pozo o la modificación de la estrategia operativa. La respuesta inicial fue correctiva, pero con el tiempo se evolucionó hacia esquemas preventivos basados en la caracterización de zonas críticas y en la restricción de parámetros operativos como WOB o RPM.

Cementaciones de baja calidad

La interacción entre las pérdidas severas y la necesidad de cementar directamente sobre formaciones de baja presión comprometía la integridad del anillo de cemento. En varios casos se observó bajo retorno, canalización o microanillos, que redujeron la aislación hidráulica efectiva. La combinación de alta tortuosidad, pobre limpieza anular y tiempos de exposición extendidos agravaba este problema, particularmente cuando se intentaba cementar a través de trépano convencional abandonado en fondo.

A diferencia del método convencional, la técnica CwD permitió ejecutar la cementación inmediatamente después de alcanzar profundidad final, minimizando la exposición del pozo a zonas de pérdida. Esta reducción en el tiempo de espera disminuyó significativamente los efectos de invasión de lodo y mejoró la calidad del cemento en el anillo anular. El uso de centralizadores de alta calidad, junto con perfiles de bombeo diseñados en función de simulaciones específicas, favoreció la obtención de cementaciones más homogéneas, con retornos constantes y altos índices de aislamiento hidráulico comprobados mediante registros de integridad posteriores.

Variabilidad operacional

Aun cuando se lograban pozos técnicamente exitosos, los tiempos de ejecución eran altamente variables, lo que dificultaba la planificación de recursos y la utilización eficiente de los equipos. Las causas incluían desde la curva de aprendizaje hasta la respuesta a eventos no planificados (como admisiones abruptas), y ajustes reiterados de parámetros en ausencia de herramientas diagnósticas confiables en tiempo real.

3.3. Estrategias de mejora y soluciones aplicadas

El abordaje sistemático de las problemáticas técnicas identificadas impulsó un proceso continuo de mejora que combinó rediseño mecánico, disciplina operativa, validación en campo y adopción progresiva de nuevas tecnologías. A continuación, se resumen las principales soluciones implementadas:

Rediseño del BHA y adopción de Casing Collars

Para superar los límites de peso sobre trépano (WOB) y la fatiga en conexiones e incrementar la ROP, se desarrolló, en colaboración con Tenaris, un nuevo BHA con un diseño robusto que incorpora Casing Collars, una cañería extrapesada de 6 ¼" × 40,5 lb/ft con conexión integral TSH-CCJ que actúa funcionalmente como un drill collar dentro de la sarta de CwD. Este tramo

extrapesado (≈ 150 m) incrementa el momento de inercia y la rigidez axial de la sarta, elevando el umbral de pandeo helicoidal y mejorando la transmisión de peso al trépano sin comprometer la integridad del casing. Los ensayos de fatiga en banco y las tres pruebas piloto de 2020 confirmaron la ausencia de fallas. Luego de las primeras pruebas, un aprendizaje continuo y ajustes en los parámetros de perforación permitieron consolidar el diseño, resultando en una mayor capacidad de carga, reducción de eventos de fatiga y un control más efectivo de la trayectoria, con disminución del torque operativo en superficie y un incremento significativo en la performance de CwD.

Para asegurar compatibilidad de diámetros de herramientas durante la perforación, terminación y producción del pozo como así también para evitar inconvenientes durante la perforación, se seleccionó una cañería del mismo diámetro interno que la cañería de 5-1/2" utilizada actualmente. Según aplicaciones y experiencia, los mejores resultados se obtienen al utilizar cañería de similar diámetro externo que la cupla de la cañería siguiente. Esto, además permite mantener el mismo diámetro de perforación.

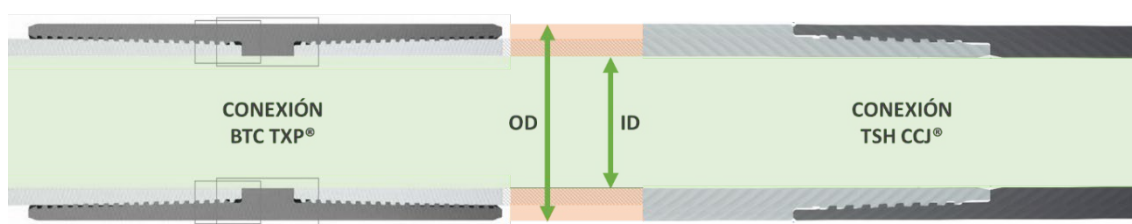


Imagen 1 - Comparativa entre ID y OD de conexiones de CWD y Casing Collar

Esta comparativa entre el diámetro interno (ID) y externo (OD) de las conexiones tradicionales y las utilizadas en el diseño con Casing Collar permite visualizar de manera clara la compatibilidad hidráulica y mecánica de la nueva solución. El mayor ID de los Casing Collars asegura una menor pérdida de energía hidráulica y permite el pasaje de las herramientas de completación, mientras que el OD optimizado permite mantener la continuidad en el diámetro de perforación, reduciendo el riesgo de escalones anulares y mejorando la eficiencia de la mecánica de la conexión.

A continuación, se observa una comparación entre la conexión TXP® BTC y la TenarisHydril CCJ® utilizada en los Casing Collars. El diseño integral sin cupla (flush) permite evitar concentraciones de esfuerzo y puntos débiles que son comunes en conexiones tradicionales. Además, su geometría simplificada mejora la resistencia a la fatiga y reduce los tiempos de armado en campo.



Imagen 2 - Esquema comparativo entre conexión TXP BTC y TSH CCJ

Optimización de la centralización y estabilización

Se introdujeron centralizadores hidroformados de alta resistencia con recubrimiento de metal duro, distribuidos estratégicamente para mantener la verticalidad y mitigar desviaciones, especialmente en zonas tobáceas. La configuración del BHA fue ajustada para lograr un balance entre rigidez estructural y capacidad de autocorrección, buscando evitar tanto el pandeo como el comportamiento pendular excesivo.

Los centralizadores fueron posicionados estratégicamente en el tramo inferior de la sarta para maximizar la estabilidad direccional. Su diseño y ubicación fueron validados mediante simulaciones estructurales que aseguraron su efectividad sin comprometer la rigidez global del BHA.

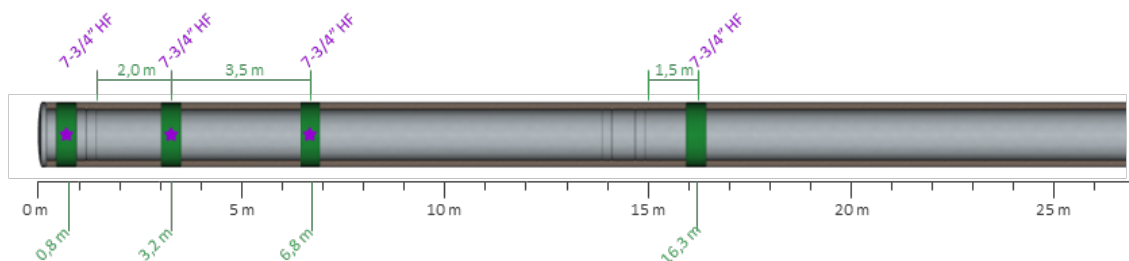


Imagen 3 - Ubicación de centralizadores en BHA Casing Collar

Paralelamente, se diseñó un dispositivo de asiento para lograr el registro de inclinación continuo, que se pesca con slickline una vez finalizado el pozo antes de cementar. Esta medición continua, sumada a un análisis de datos con algoritmos desarrollados internamente, transformó la estrategia de control de correctiva a preventiva, permitiendo fijar perfiles de parámetros seguros por tramo y reducir desviaciones fuera de rango a menos del 3 % de los pozos perforados desde 2018.

La sensibilidad de la tasa de construcción de ángulo (Build Rate) ante variaciones en WOB y RPM se representa en la imagen. Esta información fue clave para definir ventanas seguras de operación que eviten desviaciones indeseadas, especialmente en zonas tobáceas.

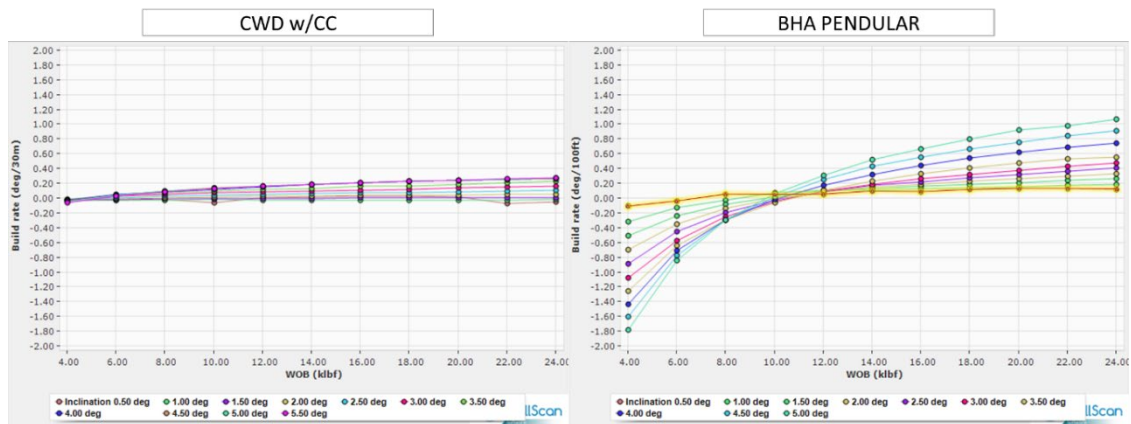


Imagen 4 - Build Rate Sensibility

Optimización de parámetros operativos con prevención de problemáticas

A partir del análisis estadístico de más de 200 pozos con algoritmos desarrollados internamente, se definieron ventanas operativas seguras para WOB, RPM y torque, adaptadas a cada zona geológica. El peso sobre el trépano se mantuvo dentro de márgenes definidos para evitar pandeo y garantizar la estabilidad direccional.

En la siguiente imagen se aprecia un incremento sostenido en la performance global, medido en términos de ROP y tiempos de pozo, al utilizar el nuevo BHA. Este salto de performance es atribuible a una mejor transmisión de peso, menor torsión y una mayor rigidez axial.

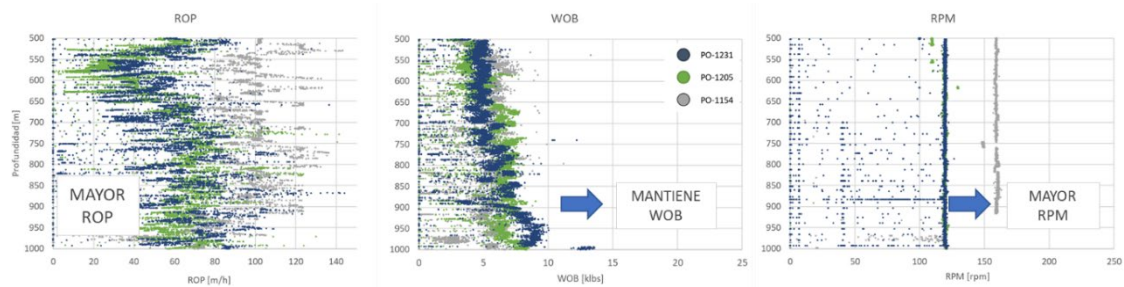


Imagen 5 - Incremento de Performance con BHA Casing Collar vs CWD

La evolución del torque y la respuesta del sistema son monitoreadas durante la ejecución para detectar en tiempo real desviaciones respecto al comportamiento esperado.

A continuación, se ilustran los resultados de las simulaciones de esfuerzos de fatiga bajo condiciones típicas de carga en operaciones CwD. Los puntos críticos se identificaron y mitigaron mediante el rediseño del BHA, lo que derivó en una significativa reducción de fallas estructurales desde 2020.

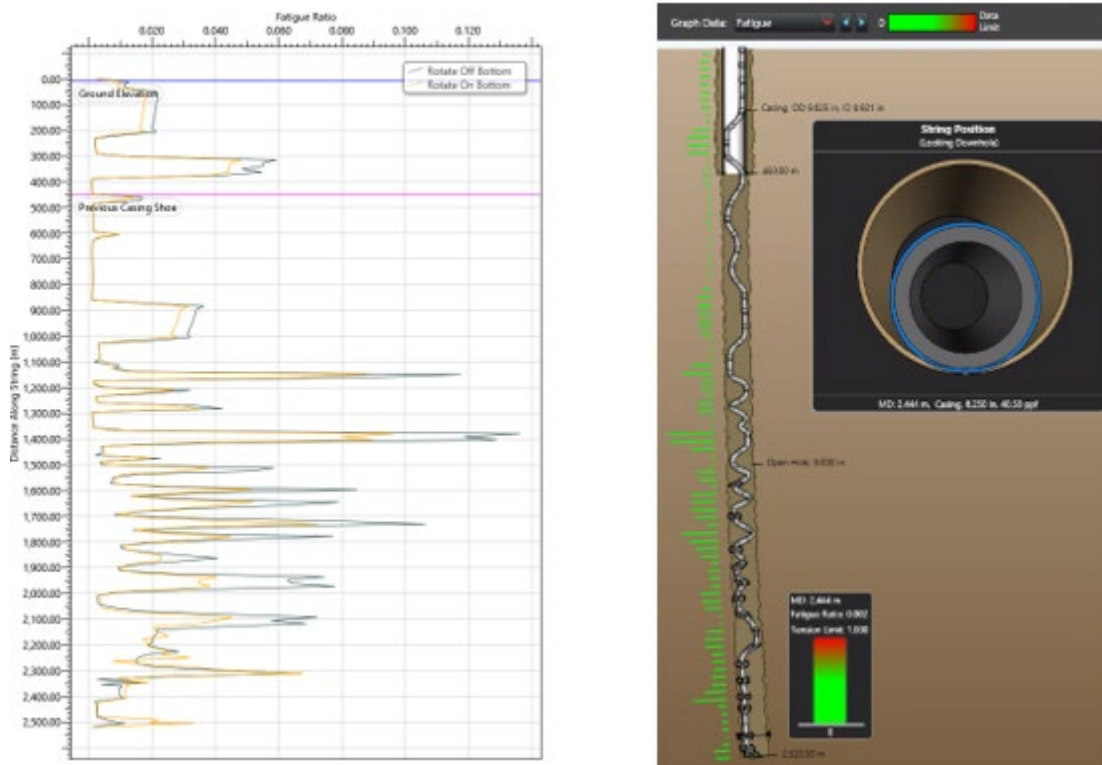


Imagen 6 - Simulación de esfuerzos de Fatiga en operaciones con CWD

Registros de vibraciones y analítica avanzada

Tenaris aportó un sistema de medición de alta frecuencia en superficie que permitió caracterizar eventos de pérdida de performance y optimizar las condiciones de perforación. Sobre esa base, desarrolló modelos de redes neuronales que predicen umbrales de vibración y recomiendan ajustes dinámicos de RPM/WOB. Actualmente, el uso de esta analítica de datos permite operar con valores de torque cercanos al máximo admitido por la conexión, superando el anterior límite de seguridad por debajo del torque mínimo de apriete, lo que habilita mejoras significativas de performance, particularmente en pozos profundos.

Optimización del fluido de perforación

La elección del fluido de perforación jugó un rol clave en el equilibrio entre eficiencia operativa y control de costos. Se adoptó una formulación base agua con aditivos específicos para estabilización de formaciones, control de pérdida y baja reactividad química, lo que permitió mantener una adecuada limpieza de pozo aun en presencia de espacios anulares reducidos. Esta configuración fue optimizada para trabajar con menores caudales sin sacrificar ROP ni comprometer la remoción de detritos, reduciendo a su vez el volumen total de fluido requerido por pozo. Esta estrategia no solo mejoró la eficiencia hidráulica, sino que permitió operar con un menor costo por metro perforado, contribuyendo significativamente a la sostenibilidad del programa.

Estandarización operativa

Las lecciones aprendidas de las pruebas con Casing Collar permitieron reducir el armado del BHA de 7 h a 3,5 h (-64 %) y estabilizar el tiempo de entubación por conexión por debajo de 5 min. Se desarrollaron instructivos operativos específicos para CWD, incluyendo secuencias operativas, criterios de intervención y recomendaciones por tipo de pozo. Estos documentos fueron

acompañados por programas de capacitación a cuadrillas y supervisores, lo que permitió reducir la dispersión operativa y mejorar la consistencia en la ejecución.

La curva de aprendizaje permitió reducir los tiempos de conexión significativamente. Esta eficiencia operativa es el resultado de una sistematización del armado y una capacitación efectiva a los equipos de torre.

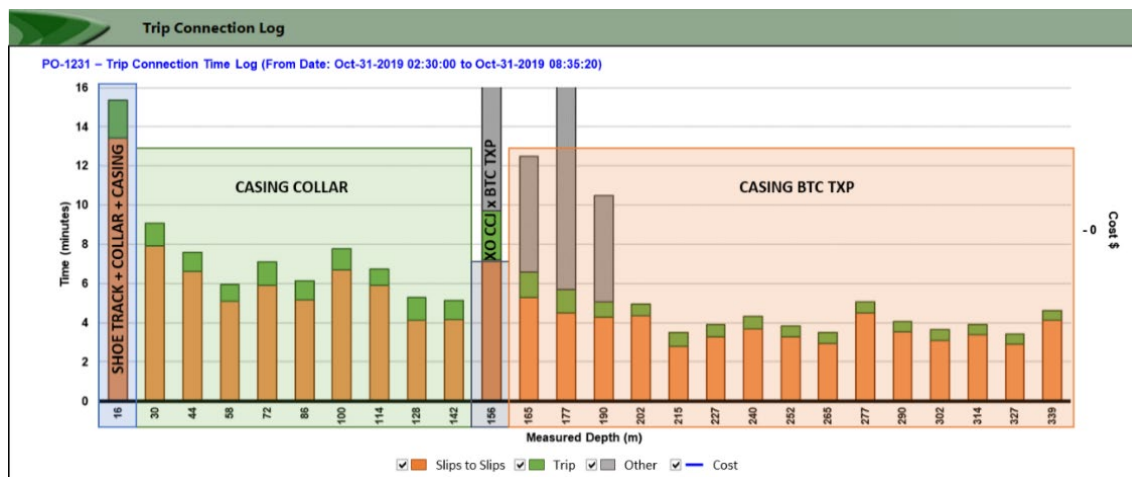


Imagen 7 - Tiempos de conexión

Integración logística y abastecimiento eficiente

Una de las claves para sostener la continuidad operacional del programa CwD fue la integración logística entre PAE y Tenaris, estructurada bajo un esquema Just In Column. Este modelo, combinado con un sistema de integración de datos entre la demanda proyectada y la distribución efectiva de tubulares, permitió asegurar un abastecimiento mensual constante sin interrupciones, con alta eficiencia en la entrega y sin generación de cuellos logísticos.

Asimismo, el uso del sistema Pipe Tracer de Tenaris permitió contar en pozo con un tally digital completo previo a la operación, ya que los casing se reciben premedidos con información completa de cada tubular. Esto no solo mejora el control de calidad y la trazabilidad durante la operación, sino que facilita el recupero eficiente de sobrantes de casing, minimizando el desperdicio y la contaminación ambiental a través de la reutilización efectiva de materiales no utilizados.

Resultados globales

- **Tiempo de fase aislación:** En 2025 hemos alcanzado consistentemente el P20 histórico ($\approx 28\%$ de reducción).
- **ROP general:** 33,2 m/h con WOB incrementado y torque estable.
- **Variabilidad operacional:** dispersión de días/pozo reducida en 38 %, mejorando la previsibilidad del plan con una desviación estándar en 2025 menor a 1,5 días por pozo.
- **Integridad del casing:** cero fallas por fatiga en > 200 pozos desde la adopción del nuevo BHA.
- **Logística operativa:** abastecimiento sostenido sin interrupciones y reducción de sobrantes con trazabilidad total.

3.4. Incorporación de tecnologías digitales y sensores

La evolución del CwD en la Cuenca del Golfo San Jorge no solo ha sido técnica y operativa, sino también digital. A partir de 2021, se inició un proceso de incorporación progresiva de herramientas de sensado y analítica avanzada, que permitieron mejorar la comprensión dinámica

del comportamiento de la sarta, optimizar parámetros de perforación en tiempo real y prevenir eventos operacionales críticos.

Sensor de vibración y torque de alta frecuencia provisto por Tenaris

En el marco del acompañamiento tecnológico de Tenaris, se incorporó un dispositivo de medición en superficie que se instala solidariamente entre la sarta de casing y el top drive. Este sensor, diseñado específicamente para operaciones de CwD, permite registrar en alta frecuencia vibraciones en los tres ejes, rotación, torque aplicado y aceleraciones, con una granularidad suficiente para analizar fenómenos transitorios que antes quedaban invisibles en las tendencias convencionales.

Los datos recolectados fueron procesados por Tenaris a través de modelos de redes neuronales, entrenados con una base de datos regional. A partir de este análisis, se emitieron recomendaciones operativas que habilitaron la expansión controlada de la ventana de parámetros. Por ejemplo, se logró incrementar la ventana de RPM hasta valores cercanos a 150 sin inducir vibraciones excesivas, y se aumentó el torque operativo aplicado durante la perforación manteniéndose dentro de márgenes seguros. Esto permitió avanzar con mayor eficiencia en zonas compactas, mejorando la ROP sin comprometer la integridad de la sarta ni del trépano.

Este sistema de monitoreo capaz de relevar y transmitir en tiempo real las vibraciones que recibe el casing durante la perforación (Sistema de Monitoreo en Alta Frecuencia con Analítica Predictiva), se compone por los siguientes elementos:

- **Torque-Tension Sub:** Es un sensor instalado debajo del Top Drive que recolecta mediciones precisas y de alta frecuencia de torque, tensión y aceleraciones en tres ejes. Los datos se transmiten de forma inalámbrica a una computadora local.
- **Modelo de IA en sitio:** Una computadora de alta capacidad ejecuta un modelo de aprendizaje automático que procesa datos en tiempo real provenientes del sensor y de los sistemas del equipo, con el objetivo de detectar condiciones de perforación potencialmente dañinas.
- **Internet Satelital:** La transmisión de datos se realiza a través de conexión satelital hacia una base de datos en la nube.
- **Base de Datos en la Nube:** Plataforma desarrollada internamente basada en la nube, que almacena los datos para su análisis en tiempo real y evaluación histórica.
- **Interfaz de Monitoreo en Tiempo Real:** Herramienta propia que permite la visualización continua de los datos transmitidos en tiempo real.

La principal salida del sistema es un algoritmo de clasificación de patrones que evalúa, segundo a segundo, las condiciones de vibración durante la perforación. Cada condición es clasificada, y los eventos considerados dañinos (marcados en rojo) son contabilizados. El umbral de eventos acumulados permitidos se define a partir de la experiencia operacional en otros pozos. La siguiente imagen es una captura de pantalla de nuestra herramienta de monitoreo en la nube donde se visualiza la clasificación de eventos vibratorios en tiempo real. El código de colores permite a los ingenieros tomar decisiones inmediatas para preservar la integridad de la sarta.



Imagen 8 - Captura Sistema de Monitoreo de Alta Frecuencia

Hasta la fecha, el Sistema de Monitoreo en Alta Frecuencia con Analítica Predictiva fue utilizado en 25 operaciones con la operadora en la cuenca del Golfo San Jorge, aportando valor durante la perforación CwD a través de tres pilares.

- **Análisis de vibraciones**, en todas las operaciones se monitorizaron las vibraciones evidenciando niveles bajos.
- **Torque operativo preciso**, durante la implementación inicial de la metodología de perforación con casing, la operadora experimentó fallas por fatiga y eventos de abocardado ocasionados por torques que excedieron los límites admisibles de las conexiones, tanto durante las agregadas como en la etapa de perforación. Como medida preventiva, se definió aplicar un factor de seguridad para evitar superar dichos umbrales. Sin embargo, mediante el sistema de monitoreo implementado, se ha observado de forma consistente que los parámetros operativos anteriormente utilizados mantienen el torque aplicado significativamente por debajo del límite operativo de la conexión en gran parte de la operación. Con la disponibilidad de la herramienta de monitoreo, fue posible aplicar el factor de seguridad de forma mucho más precisa, optimizando el aprovechamiento del torque operativo admisible sin comprometer la integridad de la conexión.
- **Confiablez**, el sistema realiza las mediciones de torque mediante una celda de carga, lo que garantiza una medición directa y precisa. En contraste, los sistemas de adquisición de datos de alta frecuencia disponibles actualmente obtienen esta información a través de registros indirectos, lo que compromete la exactitud y confiabilidad de los datos obtenidos.

Basándose en los tres pilares fundamentales, fue posible adoptar una estrategia operativa más agresiva con los parámetros de perforación, orientada a maximizar el Rate of Penetration (ROP). Esto puede lograrse sin comprometer la integridad de las conexiones, gracias al registro preciso y continuo de los torques durante la operación. La herramienta permitió operar con un mayor grado de confianza, ajustando los límites operativos con exactitud y reduciendo márgenes de incertidumbre asociados a métodos de adquisición indirecta.

Desarrollo interno de herramientas analíticas y modelado avanzado

En paralelo, el equipo de ingeniería de PAE viene desarrollando internamente una serie de herramientas de análisis de datos aplicadas al proceso de perforación. Estas iniciativas, lideradas por la célula de Data Science en perforación, incluyen:

- Algoritmos propios en Python que permiten analizar grandes volúmenes de datos operativos y construir modelos de optimización multivariable para determinar la mejor combinación de parámetros (WOB, RPM, caudal, torque) en cada intervalo litológico. Esto ha contribuido a estandarizar prácticas de alto rendimiento entre distintos equipos y pozos.
- Simulaciones de dinámica de BHA con software especializado para evaluar el comportamiento estructural de la sarta, incluyendo modelos de vibración, pandeo y contacto lateral. Estas simulaciones permiten definir la ubicación óptima de estabilizadores para garantizar el mantenimiento de la verticalidad, mejorar la capacidad de corrección de trayectoria y maximizar la transferencia de energía al trépano.
- Monitoreo en tiempo real y detección de eventos operativos mediante herramientas de análisis de tendencias paramétricas. El sistema detecta desviaciones sutiles en el comportamiento esperado del pozo, alertando ante la posibilidad de empaquetamientos, aprisionamientos o cambios en la eficiencia hidráulica, permitiendo tomar decisiones proactivas desde sala de control.

Articulación entre proveedor y operador

La integración de herramientas digitales de proveedores como Tenaris y el desarrollo interno de modelos analíticos representa una evolución en la forma de gestionar la perforación con CwD. Mientras el sensor de superficie aportó información de alta frecuencia clave para expandir las fronteras operativas con seguridad, los modelos desarrollados internamente permitieron adaptar las recomendaciones de los sistemas de Tenaris al contexto geomecánico y operacional de la Cuenca del Golfo San Jorge, logrando una sinergia efectiva que se tradujo en mejoras concretas en la previsibilidad, la eficiencia operativa y el control de las operaciones..

La convergencia entre la experiencia operativa de PAE y las herramientas tecnológicas provistas por Tenaris permitió integrar modelos predictivos con conocimiento de campo, habilitando decisiones informadas en tiempo real.

4. Conclusiones

La aplicación sistemática de mejoras técnicas, el rediseño del BHA con Casing Collars, la adopción de sensores de alta frecuencia y el uso de herramientas analíticas avanzadas han permitido consolidar la perforación con Casing (CwD) como una metodología madura, confiable y de alto rendimiento para campos con alta complejidad geológica y operativa, como los del Golfo San Jorge.

Mejora en tiempos de ejecución

A partir de la implementación del nuevo BHA y el ajuste fino de parámetros operativos, se logró una reducción sostenida en los tiempos de perforación de la fase aislación. En particular, en 2025 se alcanzaron valores cercanos al percentil 10 (P10) histórico de la distribución, con tramos completos perforados en tan solo 4,41 días y ROP general de 33,2 m/h. Esto representa una mejora de hasta un 28 % respecto a los valores promedio previos a la optimización.

A continuación, se compara la evolución de los tiempos promedio de perforación por cada 1000 m entre métodos convencionales y CwD. Se observa una clara tendencia decreciente en los tiempos con CwD, consolidando su ventaja operativa.

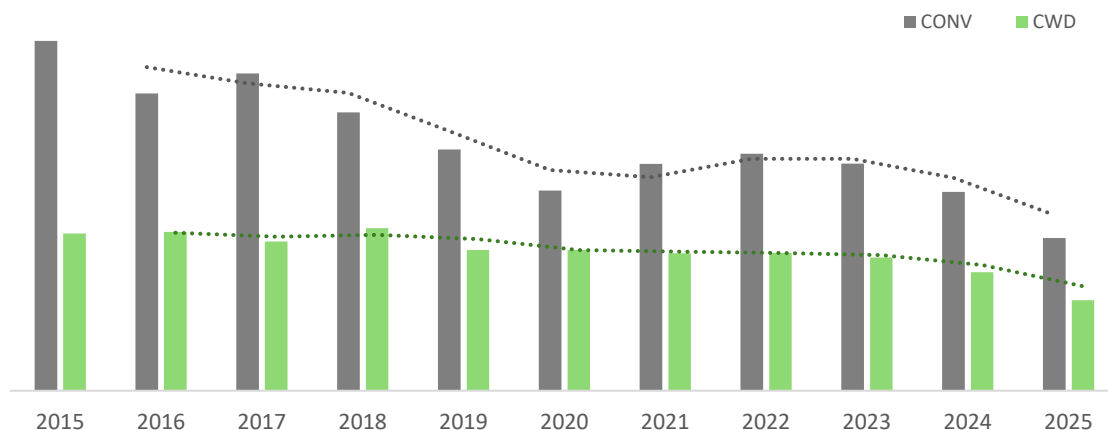


Imagen 9 - Tiempos Promedio de perforación cada 1000 m - CONV vs CWD

La siguiente imagen evidencia la concentración de la distribución de días de perforación en torno a valores medios más bajos, lo cual refleja la homogeneidad operativa alcanzada con el tiempo.

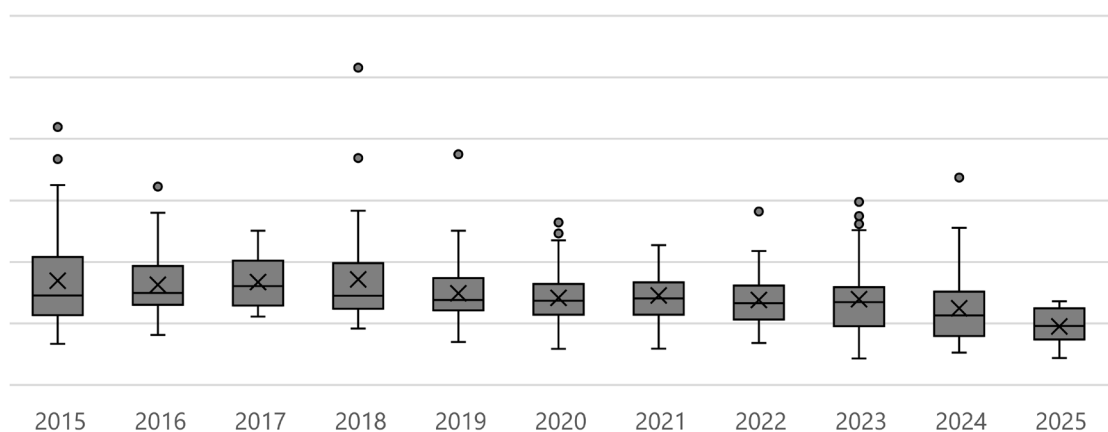


Imagen 10 - Distribución de días de perforación con CWD

Esta distribución, mostrada en la imagen siguiente, permite identificar el incremento de performance claro y una gran consistencia alcanzada en 2025 gracias a todos los desarrollos mencionados.

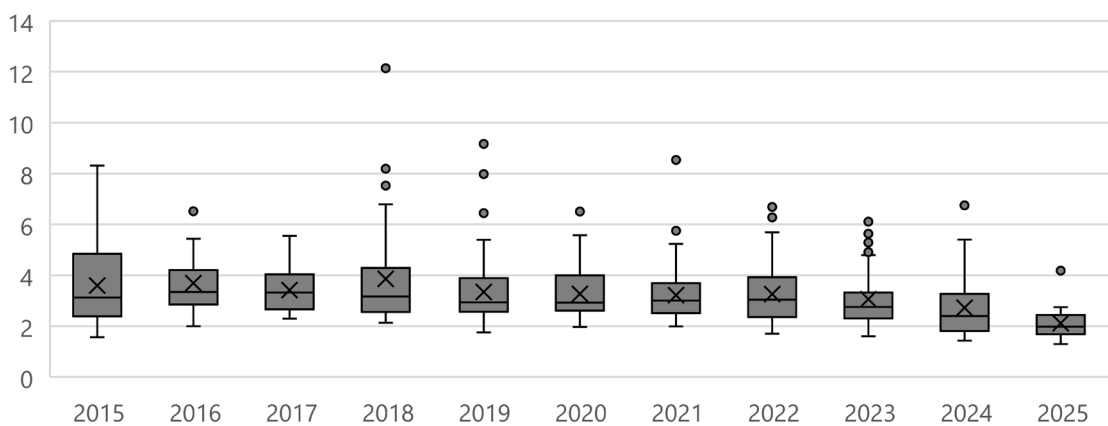


Imagen 11 - Distribución de días de perforación cada 1000 m con CWD

Aumento de ROP y eficiencia hidráulica

La posibilidad de operar con mayores WOB y torque, gracias al incremento de rigidez de la sarta y al control dinámico de vibraciones, permitió mejorar la velocidad de penetración en formaciones de alta resistencia mecánica.

El gráfico muestra la evolución de la velocidad de perforación general lograda con parámetros optimizados. Se evidencia una mejora sustancial respecto a los registros anteriores, sin comprometer la estabilidad.

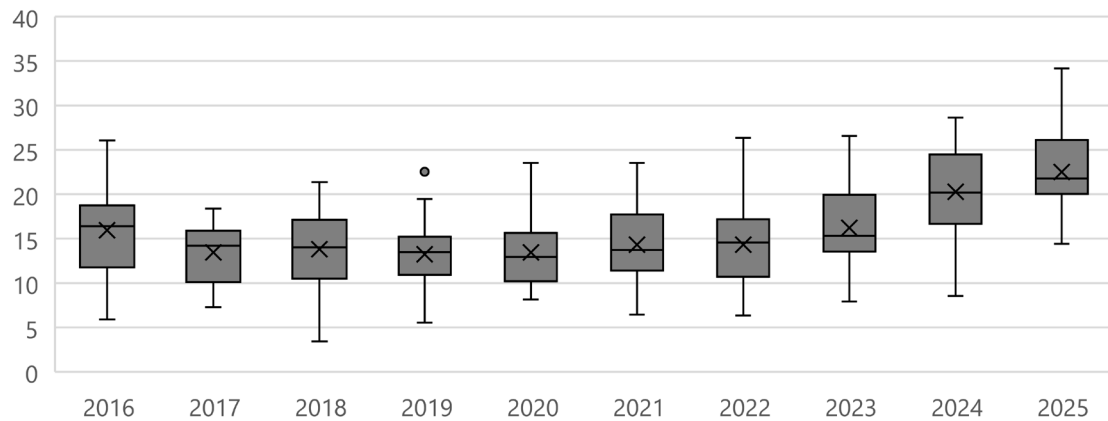


Imagen 12 - Distribución de Velocidad de Perforación en m/h en CWD

La reducción del espacio anular, característica del sistema CwD, también contribuyó a mejorar la limpieza del pozo con menores caudales, reduciendo a su vez la pérdida de fluido y consecuentemente el costo de perforación.

Reducción de eventos de desviación y mejora de la trayectoria

Desde la adopción del protocolo de medición de inclinación y la redistribución estratégica de estabilizadores, la tasa de pozos con desviaciones fuera de rango de 60 m se ha mantenido en menos del 7 % con un incremento significativo de la ROP. La trayectoria de los pozos mantuvo su verticalidad incluso en zonas complejas o con el incremento de performance generado, sin requerir medidas drásticas como la desentubación de un pozo, mejorando el cumplimiento de los objetivos geológicos y la calidad de la aislación.

Más del 93 % de los pozos perforados mantuvieron una desviación dentro de parámetros aceptables, lo que evidencia el éxito del control direccional preventivo.

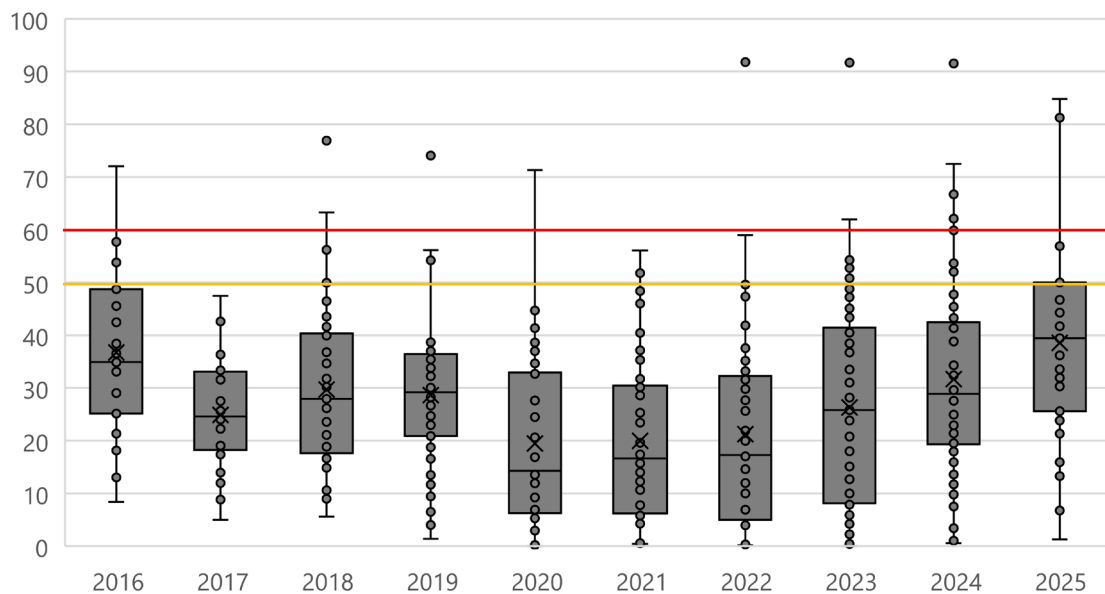


Imagen 13 - Distribución de Desviaciones de la Verticalidad en metros en TVD

Calidad de cementación

Además, la perforación con casing demostró mejoras en la calidad de cementación respecto a metodologías convencionales, gracias a un menor tiempo de exposición del pozo a los fluidos de perforación, una reología que favorece la jerarquía reológica entre cemento y fluido para la remoción del lodo y revoque, mejor control de pérdidas y una geometría anular más favorable, reduciendo riesgos de canalización y mejorando la integridad del cemento de la aislación.

A continuación, se puede ver un gráfico comparativo donde se evidencia la mejora en la calidad del CBL en pozos con perforación con Casing vs aquellos perforados convencionalmente con perfil Open Hole. Se destaca una mejora significativa en los índices de aislamiento hidráulico efectivo en los pozos perforados con casing.

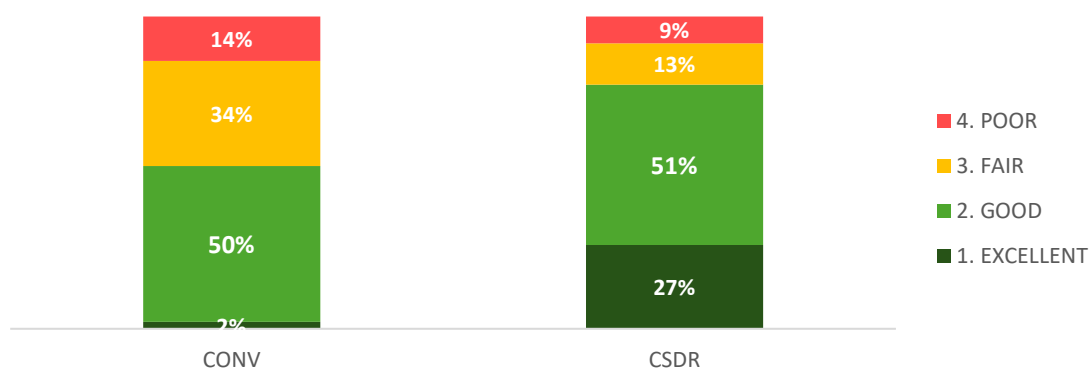


Imagen 14 - Comparativa de Calidad de CBL entre metodología CONV vs CWD

Disminución de la variabilidad operacional

Uno de los impactos más significativos fue la reducción de la dispersión en los tiempos de perforación. Mientras que en los primeros años del proyecto la variabilidad entre pozos similares

era elevada, los últimos dos años muestran una ejecución mucho más homogénea y previsible. Esto permitió optimizar la planificación de recursos y aumentar la utilización efectiva de los equipos.

La imagen permite analizar la variabilidad operativa en un yacimiento específico. La reducción en la dispersión muestra cómo la estandarización y digitalización de procesos impacta directamente en la eficiencia.

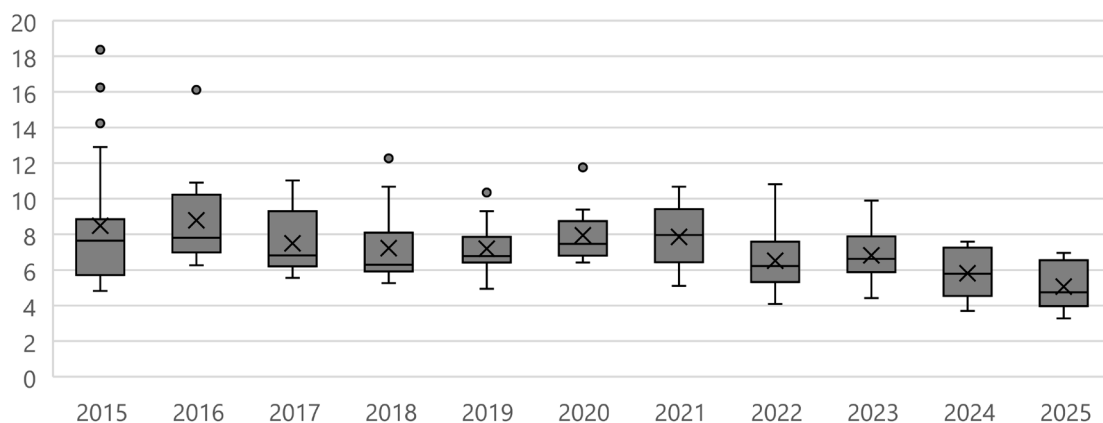


Imagen 15 - Distribución de tiempos perforando con CWD en yacimiento Z

Integridad mecánica y cero fallas estructurales

Desde la implementación del tramo de Casing Collar, no se han registrado fallas estructurales ni deformaciones severas por fatiga en más de 200 pozos ejecutados. Este resultado valida no solo el diseño mecánico de la solución, sino también la calidad del control operativo y la disciplina en la ejecución.

Eficiencia logística y sustentabilidad

La integración logística con Tenaris bajo un modelo de abastecimiento continuo y trazabilidad digital (Pipe Tracer) permitió reducir los sobrantes de casing, optimizar la reutilización de materiales y mejorar la trazabilidad técnica y ambiental de cada sarta. Esta sinergia logística ha sido clave para mantener la continuidad del programa sin interrupciones, incluso en contextos operativos exigentes.

El camino hacia una perforación inteligente se consolida a partir de la integración progresiva de sensores, analítica avanzada y modelado estructural, configurando un ecosistema donde el dato se convierte en el insumo clave para decisiones operativas y estratégicas.

Adaptación de estrategias de completación y rol del Departamento de Desarrollo de Reservas

Un aspecto fundamental para el éxito del programa CwD fue la activa participación del Departamento de Desarrollo de Reservas (DDR), que debió adaptar sus metodologías de trabajo ante las particularidades de los pozos perforados con casing. A diferencia de los esquemas tradicionales, donde la información de pozo abierto y los registros de perfilaje son clave para definir la completación, en los pozos CwD se incorporaron soluciones alternativas basadas en registros a pozo entubado. Esta limitación demandó el desarrollo de nuevas metodologías interpretativas, correlaciones geológicas más robustas y un mayor trabajo de integración entre ingeniería de perforación, geología y completación. Gracias a esta sinergia, fue posible mantener los niveles de productividad esperados e incluso optimizar la selección de zonas objetivo, garantizando la eficiencia del proceso sin comprometer la calidad del reservorio explotado.

Los análisis de productividad post-perforación han demostrado que las metodologías del DDR permitieron mantener niveles de producción comparables a los alcanzados mediante esquemas tradicionales, validando la efectividad del enfoque alternativo a pozo entubado.

5. Bibliografía

-SPE/IADC 52789 Casing Drilling - A Revolutionary Approach to Reducing Well Costs R.M. Copyright 1999, SPE/IADC Drilling Conference This paper was prepared for presentation at the 1999 SPE/IADC Drilling Conference held in Amsterdam, Holland, 9–11 March 1999.

-IADC/SPE 59179 Casing Drilling Application Design Considerations. Tommy M. Warren, SPE, Tesco Drilling Technology, Per Angman, SPE, Tesco Corp., Bruce Houtchens, SPE, Tesco - Drilling Technology. for presentation at the 2000 IADC/SPE Drilling Conference held in New Orleans, Louisiana, 23–25 February 2000.

-SPE/IADC 79862 Casing Drilling Activity Expands in South Texas. Kyle Fontenot, Joe Highnote, SPE, Conoco, Inc., Tommy Warren, SPE, Bruce Houtchens SPE, Tesco Corp. IADC/SPE Drilling Conference held in Amsterdam, The Netherlands, 19–21 February 2003.

-SPE 147102 Plastering Effect of Casing Drilling; a Qualitative Analysis of Pipe Size Contribution. Moji Karimi, SPE, Eric Moellendrigk, SPE, Calvin Holt, SPE, Tesco Corporation. SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in Denver, Colorado, 30 October–2 November 2011.

-Offshore Magazine Vol 72. Dick Ghiselin Special Correspondent. Casing drilling marks a century of progress 10/01/2012.

6. Autores

Alejandro Lafont, PAN AMERICAN ENERGY

Estudios: Ingeniero Industrial, 2013.

Experiencia Profesional:

- Pan American Energy desde 2015
- Líder Ingeniería de Perforación: 2023 - Actualidad
- Ingeniero Especialista Staff Perforación: 2021 - 2023
- Ingeniero Geográfico Perforación: 2019 - 2021
- Ingeniero de Perforación: 2017 - 2019
- Company Man: 2015 – 2017

Erasmus Salazar Bracho, PAN AMERICAN ENERGY

Estudios: Ingeniero en Petróleos, Ingeniero en Electronica,

Experiencia Profesional:

- Ingeniero de perforación 2006-2010 PDVSA
- Superintendente de operaciones de perforación 2010-2015 PDVSA
- Ingeniero Mayor de ingeniería de perforación 2015-2018 PDVSA
- Ingeniero de aplicación de trepanos 2018 Halliburton
- Pan American Energy desde 2021
- Ingeniero Especialista Perforación: 2023 - Actualidad

Guillermo Tapia, TENARIS

Estudios: Ingeniero Electromecánico, 2006.

Experiencia Profesional:

- Tenaris desde Nov, 2007
- Ingeniería de Laminación - 2007 a 2009.
- Especialista Factibilidad de Siderca - 2009 a 2018.
- Technical Sales Manager para Sur Argentina - 2019 a la fecha.