

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

Análisis para pruebas de nueva tecnología de cortadores en brocas PDC utilizadas en un campo colombiano del valle Magdalena medio.

Audrey Andrea Viera Payares

Kevin Andrés León Caffroni

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero de Petróleo

Director

Wilson Raul Carreño Velasco

Master en diseño, gestión y dirección de proyecto

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de ingeniería de petróleos

Bucaramanga

2021

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

Dedicatoria

A Dios que nunca me abandonó en todo este proceso, me dio fuerzas cuando las necesitaba y me demostró que con fe y amor todo es posible.

A mis padres, que, con lucha incansable, me dieron el mejor regalo de la vida: educación.

A mi hermano, que por medio de su inocencia de niño me mostró las cosas más importantes de la vida.

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

Agradecimientos

A la Universidad Industrial de Santander por ayudarme a crecer profesionalmente y brindarme un entorno óptimo para el desarrollo de un conocimiento integro y excepcional.

A la empresa Baker Hughes por abrirme sus puertas para desarrollar mi trabajo de grado en las mejores condiciones y con información confiable.

Al ingeniero Wilson Carreño, por aceptar dirigir este proyecto, por su dedicación y guía para hacer de este trabajo de grado lo que hoy día es.

A mi novio por ser mi apoyo incondicional en todo este proceso, por tener siempre una palabra de ánimo y por contribuir a que este sueño se haga realidad.

A los ingenieros de Baker, por siempre estar dispuestos a brindarme su colaboración con el análisis de información, y por sus valiosos aportes durante el desarrollo de este proyecto.

A mi mejor amiga que me demostró que la fuerza y la valentía vienen del corazón, que no hay límites cuando se quiere conseguir algo que en realidad se desea.

A Sarife Gómez, que mediante su guía espiritual y oraciones hizo posible este logro tan importante para mí.

A demás amigos y familiares que fueron un motor importante para culminar esta maravillosa etapa.

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

Agradecimientos

A mi familia por ser un apoyo y una motivación grande para mí, por ser los más grandes protagonistas de mi formación.

A la Universidad Industrial de Santander porque fue un espacio en donde crecí académicamente, profesionalmente y personalmente.

A la empresa Baker Hughes por permitirnos realizar este proyecto.

A mi pareja, por brindarme todo su apoyo durante el desarrollo de mi carrera universitaria y la realización de este proyecto.

Al ingeniero Wilson Carreño, por aceptar dirigir este proyecto, por su calidad humana y guiarnos en este proyecto.

A mis amigos y demás familiares que entre todos formaron un ambiente saludable en el cual me sentí muy cómodo durante mi proceso.

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

Tabla de contenido

INTRODUCCIÓN	12
1. GENERALIDADES DE BROCAS PDC	14
1.1. Diseño de brocas PDC	14
1.2. Partes.....	15
1.3. Cortadores.....	18
1.3.1. Tamaño del cortador	19
1.3.2. Tabla de diamante	21
1.3.3. Geometría de corte	21
1.3.4. Ángulo de ataque	22
1.3.5. Ángulo de orientación.....	23
1.3.6. Densidad del cortador	25
1.3.7. Resistencia del cortador.....	25
1.3.8. Exposición del cortador	25
1.4. Perfil de brocas PDC.....	26
1.4.1. Tipos de perfil	29
1.5. Clasificación IADC.....	31
1.6. Sistema dull grading para brocas PDC	34
1.6.1. Ejemplo dull grading para campo estudio.	40
2. GENERALIDADES CUENCA DEL VALLE MAGDALENA MEDIO	42
2.1. Localización.....	42

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

2.2. Geología.....	43
2.3. Estratigrafía y tectónica	44
2.4. Sistema petrolero	44
3. TECNOLOGÍA DE CORTADORES.....	45
3.1. Tecnología con cortadores Stabilis Dual Chamfer	46
4. CASO DE APLICACIÓN, ANÁLISIS Y RESULTADOS.	51
4.1. Comparación de desempeño por rangos de profundidad perforada.....	53
4.2. Comparación de desempeño por el total de la operación	58
4.3. Análisis dull grading	60
5. ANÁLISIS FINANCIERO	64
5.1. OPEX.....	65
5.2. Valor presente neto	67
5.3. TIR.....	67
6. CONCLUSIONES	71
7. RECOMENDACIONES.....	72
REFERENCIAS.....	73

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

Lista de Tablas

Tabla 1 Características de los cortadores por su tamaño y el tipo de formación.....	21
Tabla 2 Características de distintos back rake	23
Tabla 3 Tipos de perfil para brocas PDC.....	29
Tabla 4 Clasificación IADC para broca PDC (primer carácter)	31
Tabla 5 Clasificación IADC para broca PDC (Segundo y tercer carácter).....	32
Tabla 6 Clasificación IADC para broca PDC (cuarto carácter).....	33
Tabla 7 Tipos de desgastes en brocas PDC según la IADC.....	36
Tabla 8 Condiciones del gauge	38
Tabla 9 Razones para sacar la broca del yacimiento	39
Tabla 10 Generalidades del campo de estudio.....	51
Tabla 11 Factor de aumento de ROP en campo A.....	54
Tabla 12 Balance general del ROP	59
Tabla 13 Comparativa de costos Stabilis vs Convencional	66
Tabla 14 Costos totales Stabilis vs Convencional	66
Tabla 15 Tasa interna de retorno en 12 periodos de perforación.....	69

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

Lista de Figuras

Figura 1. Mecanismo de corte de una broca PDC.	15
Figura 2. Partes de una broca PDC.	16
Figura 3. Cortador PDC.	18
Figura 4. Ángulo de Bisel de un cortador PDC.	19
Figura 5. Tamaño de la broca vs tamaño del cortador.	20
Figura 6. Ángulo de ataque o “back rake” para dos tipos de formaciones.	22
Figura 7. Side rake.	24
Figura 8. Ángulo de orientación de un cortador.	24
Figura 9. Perfil de una broca PDC.	26
Figura 10. Cono de una broca PDC.	27
Figura 11. Radio y ubicación de la nariz en una broca PDC.	27
Figura 12. Hombro en una broca PDC.	28
Figura 13. Perfil de cono plano para una broca PDC.	30
Figura 14. Perfil de cono doble para una broca PDC.	30
Figura 15. Perfil de cono parabólico para una broca PDC.	31
Figura 16. Tipos de perfiles en brocas PDC.	33
Figura 17. Formato para reporte de dull grading en brocas PDC.	34
Figura 18. Escala para pérdida del cortador.	35
Figura 19. Tipos de desgastes más comunes en brocas PDC.	37
Figura 20. Localización de los desgastes.	37
Figura 21. Sistema dull grading para campo de estudio.	40
Figura 22. Ejemplo de una broca desgastada.	41

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

Figura 23. Ejemplo de broca desgastada.....	42
Figura 24. Localización de la cuenca del valle magdalena medio.....	43
Figura 25. Cortador convencional vs cortador Stabilis.....	47
Figura 26. Rendimiento global de la tecnología Stabilis.	48
Figura 27. Comparación relativa del desempeño de un cortador estándar vs Stabilis.....	49
Figura 28. Cara de la broca con cortador convencional vs cara de la broca Stabilis.....	50
Figura 29. Comparación de torque entre broca cortadores convencionales vs Stabilis.....	50
Figura 30. ROP vs distancia del campo A para pozos perforados con broca Stabilis.	52
Figura 31. Tiempo efectivo para pozos que utilizaron brocas con cortadores Stabilis.....	53
Figura 32. Aumento del ROP por cortador Stabilis.....	55
Figura 33. Comparación del aumento efectivo utilizando Stabilis.	56
Figura 34. ROP con cortador convencional vs ROP con cortador Stabilis.	57
Figura 35. Comparación de tiempos efectivos cortador convencional vs Stabilis.	58
Figura 36. Comparación de ROP del total de pies perforados.....	59
Figura 37. Dull de una broca con cortador convencional.	60
Figura 38. Dull de una broca con cortador Stabilis.	61
Figura 39. Estado de salida de la broca con cortador convencional.	62
Figura 41. Comportamiento del TIR a través de los pies perforados.	70

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

Resumen

Título: Análisis para pruebas de nueva tecnología de cortadores en brocas PDC utilizadas en un campo colombiano del valle Magdalena medio.*

Autor: Audrey Andrea Viera Payares, Kevin Andrés León Caffroni**

Palabras Clave: Brocas, PDC, Baker Hughes, Cortadores, Perforación.

Descripción:

El presente trabajo tiene como propósito principal analizar técnicamente una nueva tecnología de cortadores implementada en un campo del valle Magdalena medio al incluirlos en sus procesos de perforación, con el fin de mejorar desempeños, disminuir tiempos, aumentar ROP y su eficiencia. Es común ver en la industria del petróleo como día tras día se van realizando modificaciones a los distintos procesos para lograr mayores y mejores resultados haciendo que los procesos sean cada vez más eficientes y eficaces.

Al inicio del proyecto se realizó la revisión conceptual generalizada de brocas PDC, determinando sus características principales y su funcionamiento, haciendo énfasis en los cortadores que constituyen la parte más importante de la realización de este proyecto. Seguidamente se desarrollaron las generalidades geológicas de la cuenca del Magdalena Medio donde se encuentra ubicado el campo A, el lugar de aplicación y se explican las generalidades y ventajas de la nueva tecnología de cortadores que se aplicó en el campo en cuestión.

Posteriormente, se inició la parte experimental, en la que se dio la corrida de la broca con el diseño de los nuevos cortadores, se analizaron los resultados obtenidos del proceso, y se presentaron las posibles comparaciones de los parámetros mencionados anteriormente (eficiencia, ROP, profundidad perforada), para determinar cuál es el diseño óptimo complementando el ámbito técnico con el financiero para futuras perforaciones en dicho campo.

* Trabajo de Grado

** Facultad de ingeniería fisicoquímicas. Escuela de ingeniería de petróleos. Director: M.Sc. Wilson Carreño.

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

Abstract

Title: Analysis for tests of new cutter technology on PDC bits used in a Colombian field in the middle Magdalena valley *

Author: Audrey Andrea Viera Payares, Kevin Andrés León Caffroni**

Key Words: Bits, PDC, Baker Hughes, cutters, drilling.

Description:

The main purpose of this paper is to technically analyze a new cutter technology implemented in a field in the middle Magdalena Valley by including them in its drilling processes, in order to improve performance, decrease times, increase ROP and its efficiency. It is common to see in the oil industry how day after day modifications are made to the different processes to achieve greater and better results, making the processes increasingly efficient and effective.

At the beginning of the project, a generalized conceptual review of PDC bits was carried out, determining its main characteristics and its operation, emphasizing the cutters that constitute the most important part of the realization of this project. Then the geological generalities of the Magdalena Medio basin where field A is located, our place of application, were developed and explains the generalities and advantages of the new cutter technology that was applied in the field in question.

Subsequently, the experimental part began, in which the drill was run with the design of the new cutters, the results obtained from the process were analyzed, and possible comparisons of the parameters mentioned above (efficiency, ROP, drilled depth) to determine the optimal design for future drilling in that field complementing the technical ambit with the financial.

* Bachelor Thesis

** Physicochemical Engineering Department. Petroleum Engineering School. Director: M.Sc. Wilson Carreño.

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

Introducción

En el contexto petrolero las brocas de perforación son una herramienta muy importante, diseñadas para perforar de la manera más eficiente. La selección y las condiciones de operación de la broca constituyen uno de los pilares más importantes que debe asumir un ingeniero de perforación, para ello es de vital importancia que este conozca a fondo las generalidades y los avances tecnológicos que ha tenido la herramienta en los últimos años.

El sector del petróleo es una industria cambiante, que apunta a la innovación, cambio y desarrollo de nuevas tecnologías con mayores alcances y mejores resultados. El sector de las brocas no es la excepción, con el paso del tiempo se han creado mejoras para el desarrollo de nuevos proyectos, ya que en la industria van surgiendo nuevos escenarios y por ende nuevos retos.

Baker Hughes Company es una empresa diseñada para lograr continuidad comercial, cumplir y superar objetivos de desempeño. Es una compañía vanguardista en cuanto a procesos que a la industria del petróleo compete. Baker Hughes le apunta a un mercado que impulse productividad, reduzca costos y presente innovaciones altamente visibles para los clientes, por lo cual, procura realizar de una manera más eficiente, productiva y segura los procesos. El desarrollo de nuevas tecnologías ha sido el objeto de estudio de la compañía a lo largo de los años, buscando alternativas que aporten calidad y viabilidad a la industria, con base en esto nace una propuesta por desarrollar brocas con nuevas tecnologías en cortadores, brindando soluciones inmediatas a problemas de desgaste, erosión y pegas en distintos yacimientos.

El desarrollo de esta nueva configuración le permitirá al cliente reducir tiempos en la operación, reducir costos, y lo más importante mantener integridad del yacimiento. Los beneficios

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

a la compañía se verán relacionados en cuanto a la profundización de la ventaja competitiva que generan valor a largo plazo en las operaciones.

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

1. Generalidades de brocas PDC

Las brocas de diamantes policristalinos compactos (PDC) aparecieron en el mercado en los años 70. Su elemento cortante lo constituye un disco o capa de diamante policristalino sintético, adherido a un sustrato de carburo de tungsteno mediante un proceso de alta presión y temperatura (Ramos, 2011).

Las brocas PDC fueron diseñadas para obtener altas tasas de penetración en formaciones blandas, firmes y medianamente duras, no abrasivas. Estas brocas no pueden usarse en formaciones duras y abrasivas por el hecho de que los cortadores PDC experimentan un excesivo desgaste mecánico, incrementado térmicamente por el calor generado por la fricción entre el cortador y la formación (Ramos, 2011).

1.1. Diseño de brocas PDC

A continuación, se describen algunas características más representativas a la hora del diseño de las brocas PDC.

Perfil de la corona: además del perfil de cono doble usado en brocas de diamantes, también se puede usar conos simples con diferentes ahusamientos y perfiles.

Limpieza hidráulica: se recircula el fluido a través de los orificios de la broca y a través de canales en la matriz de carbono de tungsteno.

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

Mecanismo de corte: en este tipo de brocas, el mecanismo que predomina es el cizallamiento, el cual permite perforar sin producir impacto en la formación. Entre una de sus ventajas se encuentra el alto volumen de corte que se puede obtener en una perforación, aumentando las ROP (Christensen H. , 2008).

En la figura 1 se observa el tipo de corte que predomina en brocas PDC.

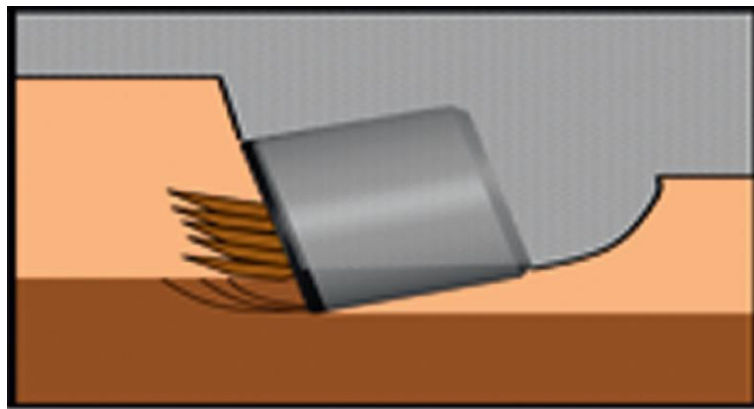


Figura 1. Mecanismo de corte de una broca PDC.

Nota. Adaptado de (Ramos, 2011).

1.2.Partes

A continuación, se muestra una imagen y se describen las principales partes de una broca PDC según (Christensen H. , 2008):

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

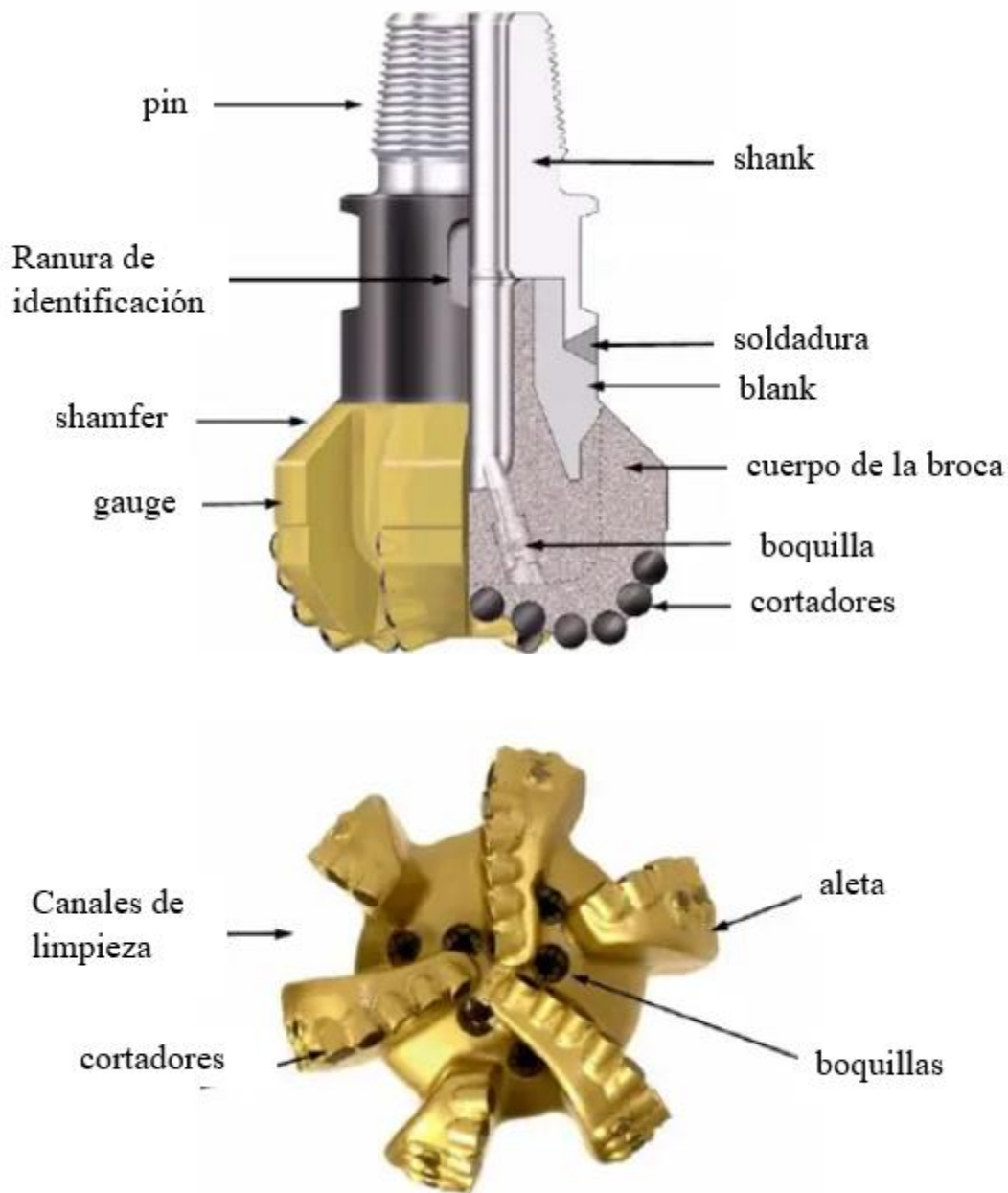


Figura 2. Partes de una broca PDC.

Nota. Adaptado de (Christensen H. , 2008). Modificado por el autor.

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

Shank (espiga): su función principal es unir la broca con la sarta de perforación. En el caso de las brocas de matriz, la espiga va soldada al “blank”, mientras que para las brocas de acero va soldada a la corona.

Blank: es una estructura de soporte para las brocas PDC. El material en que se encuentran diseñados es en acero por su ductilidad, ya que se debe someter a ciclos de alta temperatura.

Corona o cuerpo de la broca: puede ser de acero o de carbono de tungsteno, las partes principales en la corona son: aleta, cortadores, boquillas y los canales de limpieza.

Aletas: parte de la corona donde se encuentran instalados los cortadores, y suelen ser del mismo material que el cuerpo de la broca. Para determinar el número de aletas presentes en una broca PDC se debe tener en cuenta la litología del yacimiento y los metros que se van a perforar.

Boquillas: conductos para que el fluido pueda salir de la broca hacia el pozo. Son indispensables para refrigerar la broca y para limpiar el pozo, la cantidad de estos estará determinada por el tamaño de la broca y cantidad de aletas de la misma.

Canales de limpieza: son aquellos por los cuales se da la recirculación de fluido de perforación para barrer los ripios derivados de la perforación.

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

1.3. Cortadores

Los cortadores son piezas fundamentales en el proceso de diseño y armado de una broca PDC. Está constituido un 95% de diamantes sintéticos que se encuentran unidas a un sustrato de carbono en forma cilíndrica (Christensen H. , 2008) como se muestra en la figura 3.



Figura 3. Cortador PDC.

Nota. Adaptado de (Christensen H. , 2008). Modificado por el autor.

Además de lo anterior los cortadores poseen un bisel en el borde de la tabla de diamantes que permite mejorar la durabilidad y la resistencia de un cortador PDC, para lo cual se hizo necesario crear un bisel en la tabla de diamantes. El bisel es un ángulo pequeño ubicado en el borde de la tabla de diamantes, como se muestra en la figura 4.

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

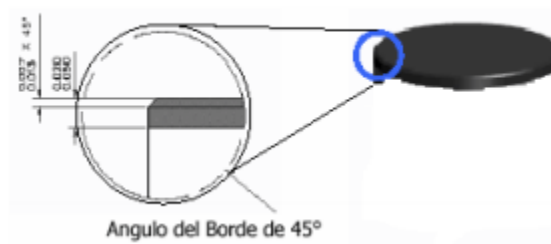


Figura 4. Ángulo de Bisel de un cortador PDC.

Nota. Adaptado de (Christensen H. , 2008).

Por otra parte, entre mayor sea el número de cortadores, menor será la tasa de penetración y mayor será la vida útil de la broca. Para definir el número de cortadores se debe tener en cuenta el número de aletas y el diámetro de estos, por lo que un número mayor de aletas debe tener mayor cantidad de cortadores (Christensen H. , 2008).

Adicionalmente a lo descrito anteriormente sobre los cortadores se pueden identificar las siguientes características relacionadas con el tamaño, la tabla de diamante, la geometría de corte, el “back rake”, “side rake”, densidad, resistencia y finalmente exposición.

1.3.1. Tamaño del cortador

El tamaño del cortador es directamente proporcional a la profundidad del corte, es decir, que entre más grande sean los cortadores la broca va a tener mayor profundidad de corte. Los cortadores varían entre 0.25in y 1in. No existe a ciencia cierta una fórmula o un método para escoger el tamaño de cortadores a utilizar, se basa principalmente en la dureza de la formación (Leon, 2012). Suele usarse un rango de preferencia como lo delimita la figura 5. Según

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

investigaciones, se considera que una broca que tiene cortadores más pequeños es mucho más eficiente en las corridas que una broca con cortadores grandes.

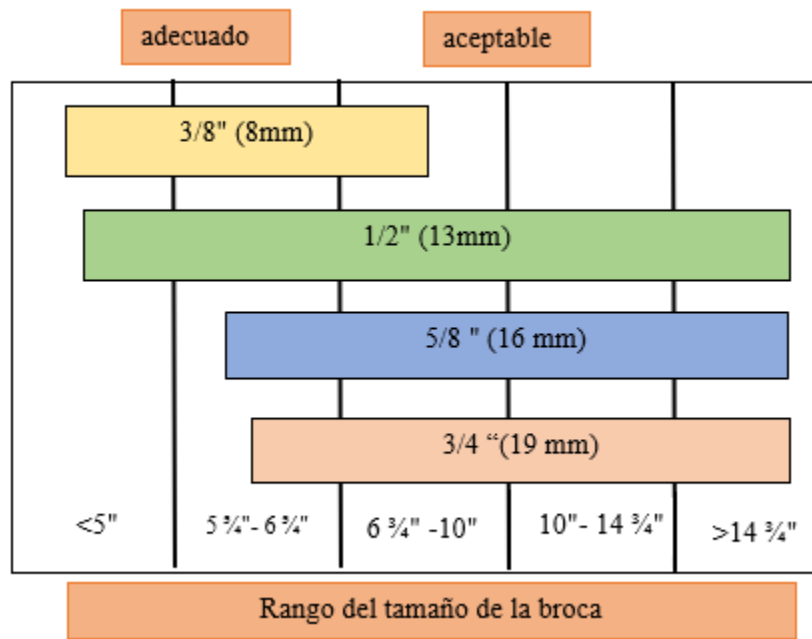


Figura 5. Tamaño de la broca vs tamaño del cortador.

Nota. Adaptado de (Christensen H. , 2008). Modificado por el autor.

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

A continuación, en la tabla 1 se describen las características de los cortadores de acuerdo con su tamaño y el tipo de formación:

Tabla 1

Características de los cortadores por su tamaño y el tipo de formación

Tipo de formación	Cantidad de aletas	Tamaño del cortador	Características
Duras	< a 4	8mm	Permiten diseños más flexibles de las brocas de diámetros reducidos.
Moderadas	5 a 7	13mm-16mm	Son aplicados a un rango grande de brocas.
Blandas	>7	19mm	Generan recortes más grandes y presentan mayor altura de diamante.

Nota. Información tomada de la empresa Baker Hughes.

1.3.2. Tabla de diamante

Esta representa la cara del cortador. Los diamantes sintéticos de los cortadores de la broca PDC representan buena resistencia a la abrasión, al desgaste y al impacto. El cortador posee un borde biselado que se encuentra situado determinados grados para mejorar la durabilidad (Leon, 2012).

1.3.3. Geometría de corte

La geometría de corte es un parámetro importante para mejorar la eficiencia de corte en las perforaciones. La amplitud de bisel empieza a jugar un papel importante, ya que entre mayor sea este, menor será la tasa de perforación (Leon, 2012).

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

1.3.4. Ángulo de ataque

También conocido como rastrillaje o back rake, se define como el ángulo en el que son colocados los cortadores en la broca al momento de perforar, influirá directamente en la manera en la que la roca será perforada y el tamaño del corte que se produce. Este ángulo se mide entre la cara del corte y una recta perpendicular a la formación que va a ser perforada. El ángulo de rastrillaje es inversamente proporcional al tamaño del corte y a las ROP generadas por la broca. El “back rake” indica la agresividad de la broca, su durabilidad y mantiene limpia la cara de la broca (Christensen H. , 2008).

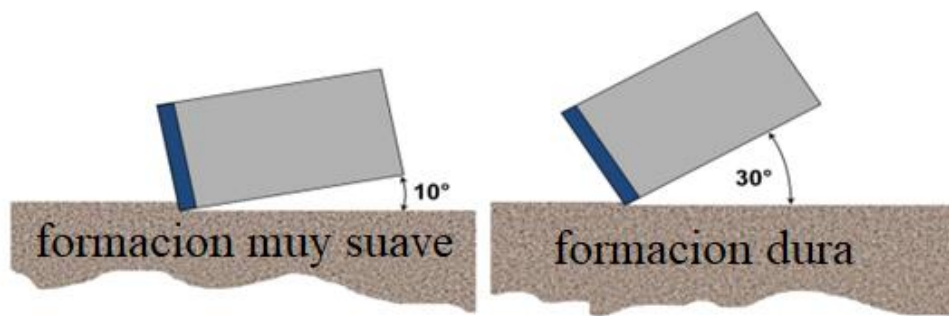


Figura 6. Ángulo de ataque o “back rake” para dos tipos de formaciones.

Nota. Adaptado de (Burgoyne, 1991). Modificado por autor.

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

Tabla 2*Características de distintos ángulos de ataque*

Back rake (ángulo de ataque)	Tipo de formación	Características
5 ó 10	Formaciones muy suaves	Generan mayor ROP y mayor tamaño de corte
15	Formaciones blandas	Mejora el corte y la durabilidad del cortador.
20	Todas las formaciones	Funciona mejor en formaciones que son abrasivas
30	Formaciones duras	Los cortadores se ubican en el calibre.

*Nota. Información tomada de la empresa Baker Hughes.***1.3.5. Ángulo de orientación**

También conocido como side rake. Es el ángulo de los cortadores con respecto a la dirección en la que se encuentra la aleta. Este ángulo muestra el paralelismo entre el cortador y la cara de la formación. El “side rake” ayuda a la formación con los recortes, ya que, este ángulo le imparte agresividad al cortador haciendo que los recortes se entierren en la formación y que no tengan contacto con la broca y nuevamente con el cortador (Christensen H. , 2008).

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

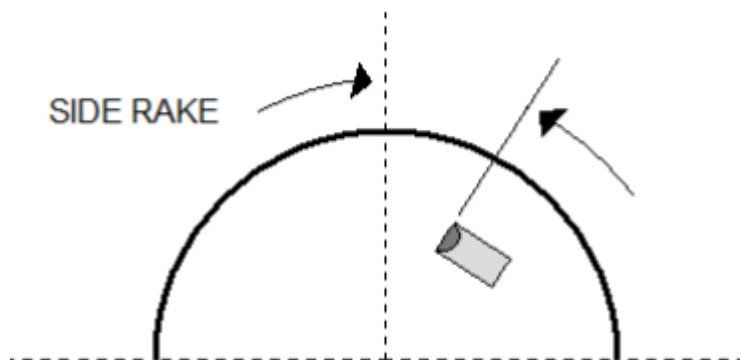


Figura 7. Ángulo de orientación.

Nota. Adaptado de (Burgoyne, 1991).

El ángulo de orientación va de 0° a 10° . Los ángulos mayores a 0° significan que el cortador tiene un borde de ataque y un borde posterior.

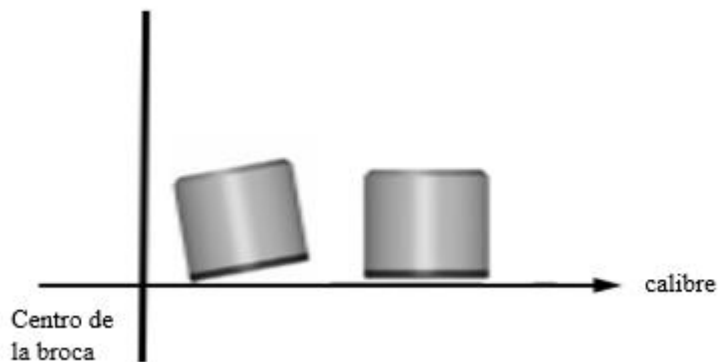


Figura 8. Ángulo de orientación de un cortador.

Nota. Adaptado (Christensen H. , 2008). Modificado por el autor.

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

1.3.6. Densidad del cortador

Hace referencia al número de cortadores por unidad de área en la cara de la broca. Esta densidad se encuentra estrechamente relacionada con el tamaño de los cortadores, ya que puede incrementar o disminuir para controlar la cantidad de carga por cortador. (Leon, M., 2012).

1.3.7. Resistencia del cortador.

La resistencia de los cortadores va ligada a dos factores: resistencia al impacto y resistencia a la abrasión.

La resistencia al impacto es aquella resistencia del cortador a quebrarse con facilidad, se ve afectada por la composición de la tabla de diamantes, espesor de la tabla, sustrato de carbono y el bisel del cortador.

La resistencia a la abrasión, es aquella resistencia del cortador a desgastarse con facilidad se ve afectada por la composición de la tabla de diamante, volumen y altura del desgaste.

1.3.8. Exposición del cortador

Hace referencia la cantidad de cortadores que sobresalen del cuerpo de la broca. Es de suma importancia verificar el nivel de la exposición, ya que esto repercute directamente en la reducción de la resistencia mecánica y la deficiencia en la limpieza en la cara del cortador. Las exposiciones altas generan más espacios entre la matriz de la broca y la cara de la formación, mientras más baja sea la exposición mayor será el soporte del cortador en la broca (Leon, 2012).

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

1.4. Perfil de brocas PDC

Hace referencia a la forma que tiene la broca con vista en la cara lateral. El perfil es parte importante en el diseño de una broca, ya que permite mayor estabilidad y uniformidad en el desgaste de la estructura de la broca. De acuerdo con el tipo de perfil establecido en el diseño inicial, se considera la cantidad de cortadores que poseerá la broca. Para una broca con perfil largo el número de cortadores será mayor que para una broca con un perfil corto, por ende, la primera ofrecerá mayor durabilidad y menor estabilidad que la segunda (Christensen H. , 2008). Las principales partes de un perfil son: cono, nariz y hombro, como se observa en la Figura 9.

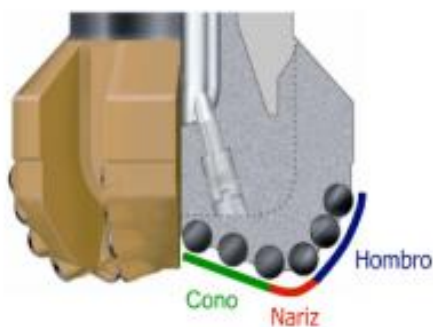


Figura 9. Perfil de una broca PDC.

Nota. Adaptado de (Christensen H. , 2008).

Cono: El cono es la parte donde se encuentran ubicados la mayor densidad de los cortadores, su función principal es darle la estabilidad necesaria a la broca para que esta no se desplace hacia los lados. El cono de la broca se encuentra ubicado entre el centro de la broca y el radio de la nariz, se mide en ángulos y por lo general está delimitado entre 20° y 25° (Monzón, 2010).

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

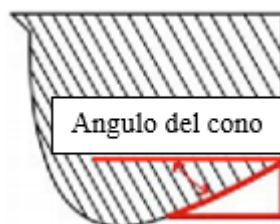


Figura 10. Cono de una broca PDC.

Nota. Adaptado de (Monzón, 2010). Modificado por el autor.

Nariz: Se encuentra ubicado entre el cono y el hombro. El radio de la nariz (figura 11) corresponde al arco formado entre el cono y el hombro de la broca. Es la parte donde se encuentran ubicados la mayor cantidad de cortadores, es decir, entre mayor sea el radio de la nariz, mayor será el número de cortadores (Monzón, 2010).

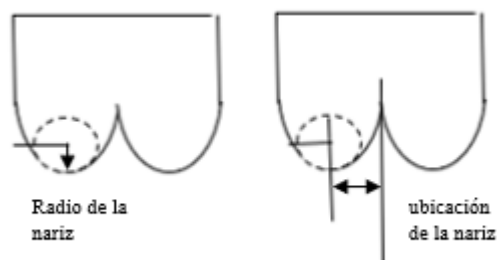


Figura 11. Radio y ubicación de la nariz en una broca PDC.

Nota. Adaptado de (Monzón, 2010). Modificado por el autor.

Hombro: Se encuentra ubicado entre el radio de la nariz y el calibre. El hombro muestra mayor número de cortadores en el radio exterior de una broca, ayudando a la disminución en el desgaste de esta (Monzón, 2010).

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

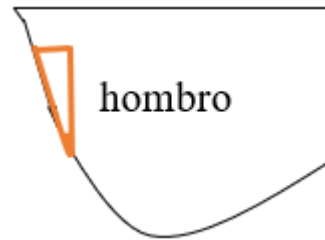


Figura 12. Hombro en una broca PDC.

Nota. Adaptado de (Monzón, 2010). Modificado por el autor.

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

1.4.1. Tipos de perfil

Existen tres tipos básicos de perfiles para brocas PDC: cono plano o cono profundo, cónico o cono doble y parabólico.

Tabla 3

Tipos de perfil para brocas PDC

Tipo de perfil	Características
Perfil de cono plano. (figura 13).	El perfil de cono plano distribuye equitativamente el WOB entre cada uno de los cortadores presentes en la broca. Las desventajas de este tipo de perfil son: Rotación limitada Desgaste desigual Altas temperaturas Limpieza ineficiente
Perfil de cono doble (figura 14).	Permite mayor estabilidad rotacional y direccional incrementa la distribución de los cortadores a través del O.D. Este tipo de perfil se caracterizan por poseer dos radios (radio de la nariz y radio del hombro). El perfil parabólico proporciona mejor estabilidad rotacional y direccional y mejor resistencia al desgaste.
Perfil parabólico (figura 15).	Presenta una subdivisión: perfiles largos, perfiles intermedios y perfiles cortos. Los perfiles largos permiten altas tasas de penetración en formaciones homogéneas, pero son susceptibles a desgastes y posibles daños. Los perfiles intermedios y cortos le proporcionan mejor estabilidad a la roca y más resistencia a desgastes y a daños mecánicos.

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

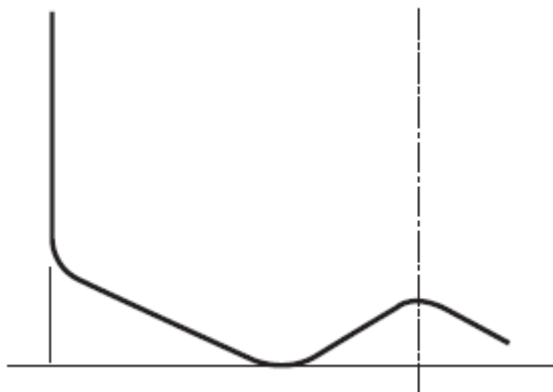


Figura 13. Perfil de cono plano para una broca PDC.

Nota. Adaptado de Institute of Petroleum Engineering, Heriot-Watt University.

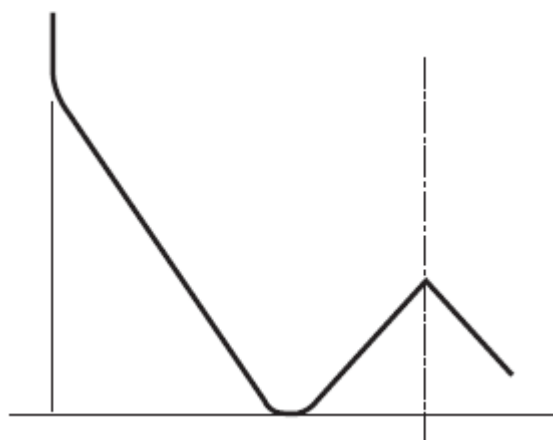


Figura 14. Perfil de cono doble para una broca PDC

Nota. Adaptado de Institute of Petroleum Engineering, Heriot-Watt University.

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

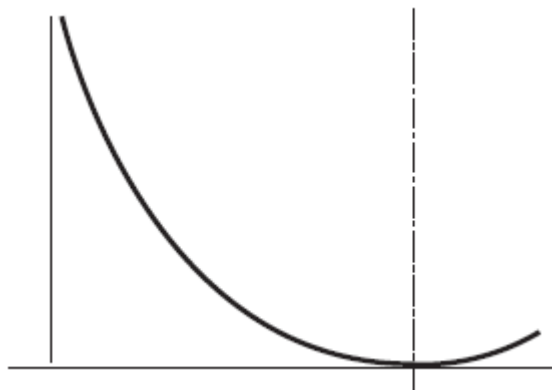


Figura 15. Perfil de cono parabólico para una broca PDC.

Nota. Adaptado de Institute of Petroleum Engineering, Heriot-Watt University.

1.5. Clasificación IADC

Existe un código de cuatro caracteres (1 letra y 3 números) desarrollado por la IADC para clasificar las brocas PDC de acuerdo con su diseño, composición y característica sin tener en cuenta el tipo de formación a perforar (Brandon, y otros, 1992).

EL primer carácter hace referencia al material en que está fabricada la broca.

Tabla 4

Clasificación IADC para broca PDC (primer carácter)

Primer carácter	
Cuerpo de la broca	
M	Matriz
S	Acero

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

El segundo y el tercer carácter hacen referencia a la dureza de la formación a perforar y al tipo de cortador óptimo para acelerar los procesos y obtener mejores desempeños de la broca en la corrida (Brandon, y otros, 1992).

Tabla 5

Clasificación IADC para broca PDC (Segundo y tercer carácter)

Segundo carácter		Tercer carácter	
Dureza de la formación		Tipo y tamaño de cortador	
1	Muy suave	2	PDC, 19mm
		3	PDC, 13mm
		4	PDC, 8 mm
2	Suave	2	PDC, 19mm
		3	PDC, 13mm
		4	PDC, 8 mm
3	Suave a media	2	PDC, 19mm
		3	PDC, 13mm
		4	PDC, 8 mm
4	Media	2	PDC, 19mm
		3	PDC, 13mm
		4	PDC, 8 mm
5	No existe	-	-
6	Medianamente dura	1	Diamante natural
		2	TSP
		3	Combinación
7	Dura	1	Diamante natural
		2	TSP
		3	Combinación
8	Extremadamente dura	1	Diamante natural
		4	Impregnada de diamante

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

Luego está el cuarto carácter, que hace referencia al tipo de perfil que posee la broca.

Tabla 6

Clasificación IADC para broca PDC (cuarto carácter)

Cuarto carácter	
Perfil de la broca	
1	Plano
2	Parabólico corto
3	Parabólico medio
4	Parabólico largo

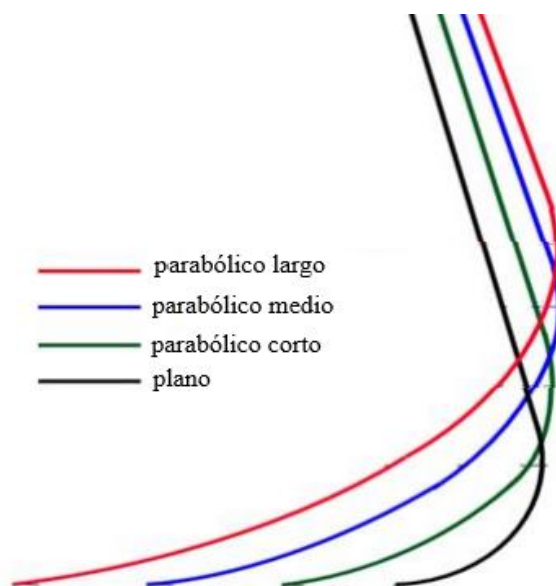


Figura 16. Tipos de perfiles en brocas PDC.

Nota. Adaptado de (Christensen H. , 2008).

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

1.6. Sistema dull grading para brocas PDC

La IADC desarrolló un sistema que permite la clasificación de las brocas que ya han sido usadas. El sistema de dull grading está compuesto por 8 caracteres que describen el desgaste de la broca y la razón por la cual se sacó de la formación. La metodología para describir el estado de la broca consta de 4 espacios, el primero de ellos se refiere a la estructura de corte, el segundo espacio se refiere al sello de las balineras (denotada con una letra B), el tercer espacio corresponde al “gauge” o calibre (denotada con una letra G) y por último se tienen las notas que son las razones por las cuales se sacó la broca de la formación (Christensen H. , 2008).

Sistema Dull grading según la IADC							
Estructura de cortador				B	G	comentarios	
Hilera interior (inner)	Hilera exterior (outer)	características del desgaste	Localización	Sello del cojinete	Gauge o calibre	Otras características	Razón por la que fue sacada

Figura 17. Formato para reporte de dull grading en brocas PDC.

Hilera interior: se utiliza para describir las condiciones de los elementos cortantes sin haber tocado la pared de la formación.

Hilera exterior: se utiliza para describir las condiciones de los elementos cortantes cuando han entrado en contacto la formación.

Para éstas, se usa una escala de 0 a 8. Se utiliza cero para indicar que no se presenta ningún tipo de desgaste y 8 para representar que el desgaste es máximo al punto de que ya hay pérdida total del cortador (figura 18).

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

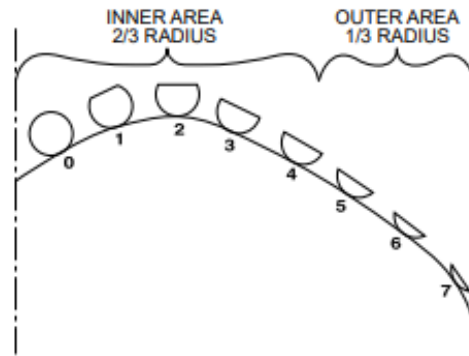


Figura 18. Escala para pérdida del cortador.

Nota. Adaptado de (Christensen H. , 2008).

Características del desgaste: código de dos letras que indica los cambios físicos que sufren los cortadores. En tabla se presentan los desgastes más comunes.

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

Tabla 7*Tipos de desgastes en brocas PDC según la IADC*

Nomenclatura	Descripción
BF	Falla de adherencia
BT	Cortadores rotos
BU	Embolada
CR	Cortado de núcleos
CT	Cortadores astillados o cincelados
ER	Erosión
HC	Daño por calor
JD	Daño por chatarra metálica
LN	Tobera perdida
LT	Cortadores perdidos
NR	No se puede volver a correr
PN	Tobera tapada/ pasaje de flujo tapado
RG	Gauge o calibre redondeado
RO	Desgaste anillado
RR	Se puede volver a correr
SS	Desgaste de autoafilado
TR	Tracking
WO	Broca lavada
WT	Cortadores desgastados
NO	No tiene características de desgaste

Nota. Información tomada de la empresa Baker Hughes

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

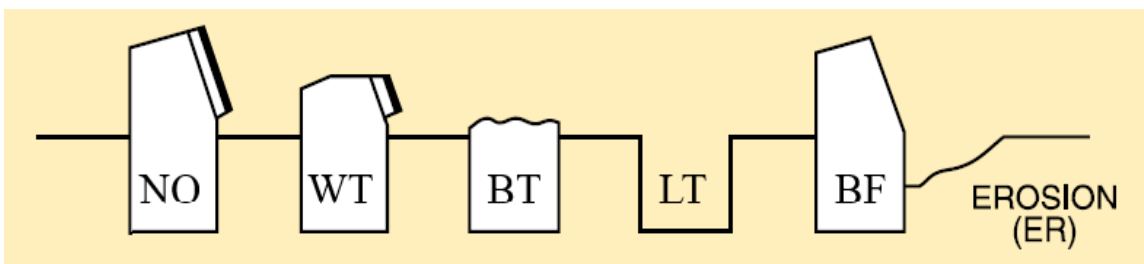


Figura 19. Tipos de desgastes más comunes en brocas PDC.

Nota. Adaptado de (Christensen H. , 2008).

Localización: hace referencia al espacio donde se encuentra ubicado el cortador que presentó el desgaste.

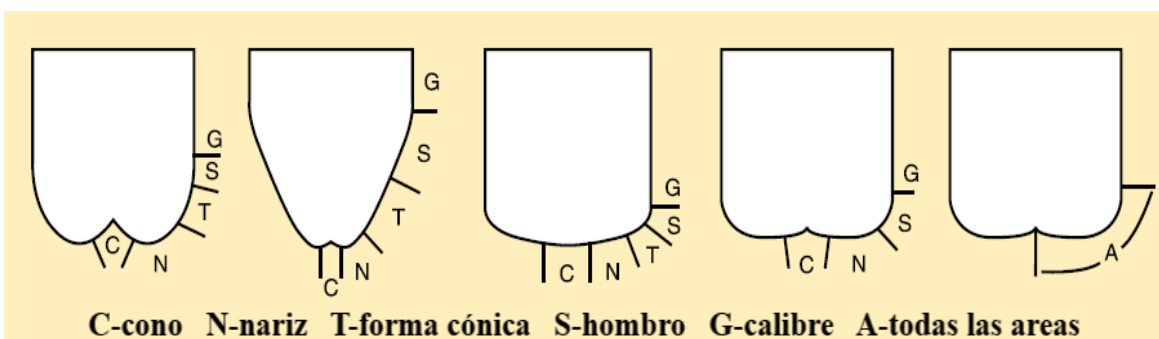


Figura 20. Localización de los desgastes.

Nota. Adaptado de (Christensen H. , 2008).

Sellos de cojinetes: este espacio solo se usa cuando la broca es tricónica. las brocas PDC siempre van a estar designadas con una “X”.

“Gauge” o calibre: este espacio se usa para reportar la condición del calibre. La tabla muestra los tipos de condiciones en los que se puede encontrar el calibre.

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

Tabla 8*Condiciones del gauge*

Codo	Explicación
I	Está en su diámetro inicial
1/16	Diámetro hasta 1/16
2/16	Diámetro varía entre 1/16 y 1/8
3/16	Diámetro varía entre 1/8 y 3/16
4/16	Diámetro varía entre 3/16 y 1/4

Nota. Información tomada de la empresa Baker Hughes

Otras características: hace referencia a las descripciones secundarias y utiliza la misma nomenclatura de las características de desgaste (tabla 7).

Razón por la que fue sacada: es el último espacio propuesto por la IADC para clasificar las brocas que han sido usadas, hace alusión al motivo por el cual la broca se tuvo que sacar de la operación.

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

Tabla 9*Razones para sacar la broca del yacimiento*

Nomenclatura	Descripción
BHA	Cambio de ensamble de fondo de pozo
DMF	Falla del motor en el pozo
DSF	Falla en la sarta de perforación
DTF	Falla de la herramienta de fondo de pozo
LOG	Corrida de registros
RIG	Reparación del equipo de perforación
CM	Condición del lodo
CP	Punto para sacar núcleos
DP	Taponamiento del pozo
FM	Cambio de formación
HP	Problemas del pozo
HR	Horas
PP	Presión de bombeo
PR	Velocidad de perforación
TD	Profundidad total/ punto para tubería de revestimiento
TQ	Torque
TW	Torque excesivo
WC	Condiciones climáticas
WO	Rotura de la sarta de perforación por fuga hidráulica

Nota. Información tomada de la empresa Baker Hughes.

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

1.6.1. Ejemplo dull grading para campo estudio.

Dull Grade In							
INNER	OUTER	DULL	LOCATION	BEARING	GAUGE	OTHER	PULLED
0	0	NO	A	X	I	NO	

Dull Grade Out							
INNER	OUTER	DULL	LOCATION	BEARING	GAUGE	OTHER	PULLED
1	2	BT	S	X	I	WT	TD

Figura 21. Sistema dull grading para campo de estudio.

Nota. Información tomada de la empresa Baker Hughes

La broca sale en calibre, presenta 4 cortadores rotos en su totalidad. Como característica de desgaste se tienen cortadores rotos (BT) en el área de la nariz y en el hombro. Se presenta desgaste (WT) en pocos cortadores. Se infiere que los cortadores se rompieron cuando se perforaba el conglomerado.

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC



Aleta 1	Aleta 2
	
<p>La aleta No. 1 presenta un cortador roto en el área del hombro.</p>	<p>La aleta No. 2 presenta dos cortadores rotos, uno en el área del hombro y otro en el área de la nariz.</p>

Figura 22. Ejemplo de una broca desgastada.

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC




Aleta 3	Aleta 4	Aleta 5
		
<p>La aleta No. 3 no presenta cortadores rotos.</p>	<p>La aleta No. 4 presenta un cortador roto en el área del hombro.</p>	<p>La aleta No. 5 presenta un cortador roto en el área del hombro.</p>

Figura 23. Ejemplo de broca desgastada.

2. Generalidades cuenca del valle magdalena medio

2.1. Localización

Esta cuenca se encuentra ubicada entre las cordilleras central y oriental, está limitada al N con el sistema de fallas Espíritu Santo, al NE con el sistema de fallas de Bucaramanga-Santa Marta, al SE por el sistema de fallas Bituima y La Salina, al S con el cinturón plegado de Girardot y al W con los sedimentos del Neógeno que cubren la Serranía de San Lucas y el basamento de la Cordillera Central. El área comprendida por esta cuenca es de aproximadamente 34.000 km². (Lozano & Zamora, 2014, pág. 5).

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

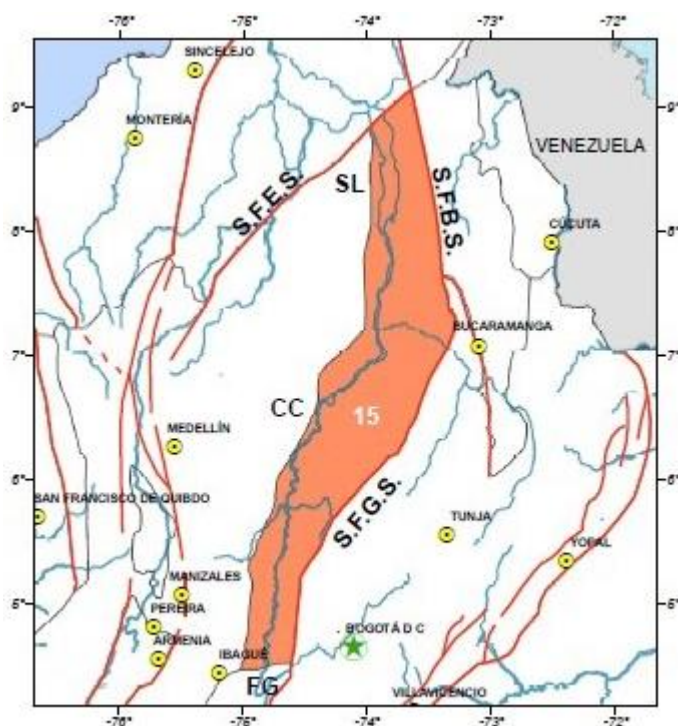


Figura 24. Localización de la cuenca del valle magdalena medio.

Nota. Adaptado de (Hidrovisor-ASVAMM, s.f.)

2.2. Geología

El levantamiento de las cordilleras Central y Oriental da origen a la apertura donde se depositó la cuenca del valle medio del Magdalena (VMM). Así, la evolución de esta cuenca inicia al mismo tiempo que el levantamiento de estas dos cordilleras (Mesozoico) (Lozano & Zamora, 2014, pág. 6).

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

2.3. Estratigrafía y tectónica

La secuencia estratigráfica en la cuenca VMM inicia con rocas cristalinas del paleozoico que se propagan en sentido W incluyendo la Cordillera Central, sobre las que se depositan rocas del Triásico-Jurásico, donde inicia la secuencia sedimentaria. La cuenca VMM ha pasado por una evolución intra-arco con el levantamiento de la cordillera central, una cuenca ante-arco con la finalización del levantamiento de la misma cordillera y una cuenca intra-montana con el levantamiento de la cordillera Oriental. Esta cuenca se ha visto afectada por diferentes procesos tectónicos que han dado origen a los sistemas de fallas de La Salina, Guaicaramo y Soapaga (Lozano & Zamora, 2014, pág. 6).

2.4.Sistema petrolero

La cuenca del VMM, ha sido ampliamente caracterizada ya que de esta hacen parte campos petroleros como Infantas, Cantagallo, Llanito, entre otros. El sistema petrolero lo componen:

- Como roca fuente las formaciones Paja, Tablazo, La Luna y Rosa Blanca.
- Como roca Reservorio las formaciones La Paz, Esmeraldas, Mugrosa, Colorado, Umir y Lisama.
- Como roca sello las formaciones Paja, Simití, Umir, Lisama, los shales de La Paz, Esmeraldas, Mugrosa y Colorado (Lozano & Zamora, 2014, págs. 21-22).

Dentro del sistema petrolero de esta cuenca podemos encontrar estructuras geológicas que incrementan el potencial petrolero, debido a su capacidad de impedir la movilidad de

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

hidrocarburos, esta complementa el papel de la roca sello, existen diferentes tipos de trampas: estructurales, estratigráficas y combinadas, ejemplo de estas son:

- Los campos Casabe y Llanito, sus trampas son anticlinales, producidas por fallas escalonadas.
- Los campos Hermitaño-Caipal, Velásquez y Galaeste, tienen trampas asociadas a fallas normales.
- Campo La Cira, sus trampas están asociadas a anticlinales producidos por fallas inversas.
- Campo Toquiqui, presenta trampa estratigráfica, debido a truncación de las capas contra una disconformidad.
- Campos Totumal y Buturama, tienen trampas combinadas, asociada a anticlinales con calizas fracturadas (Lozano & Zamora, 2014, pág. 23).

3. Tecnología de cortadores

Baker Hughes desde sus inicios se ha caracterizado por crear nuevas configuraciones de brocas con el fin de tener una operación sin contratiempos, limpia y sin NPT (tiempos no productivos). Entre los cuales se han destacado aumento de la ROP durante la operación, mejoras en los tiempos de perforación, minimizar daños en brocas, disminución de costos. La transición ha generado impactos positivos que han llevado a la reinención de nuevas tecnologías en la industria. Con la finalidad de minimizar los desgastes que experimentan los cortadores estándares cuando se encuentran bajo mucha presión y el aumento de la energía mecánica específica que estos transfieren cuando están haciendo los cortes en la formación surge la novedosa idea de cortadores multidimensionales. Esta tecnología diseñada para generar menos calor en la cara del cortador en

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

comparación a los cortadores estándares del mercado, debido a, la reducción del área de contacto con la formación. Dentro de esas tecnologías se encuentra la de cortadores Stabilis Dual chamfer la cual será explicada a continuación.

3.1. Tecnología con cortadores Stabilis Dual Chamfer

Los cortadores “Stabilis Dual Chamfer” introducen un segundo “chamfer” ubicado en la cara del cortador, permitiendo aplicar mayores cargas axiales sin presentar rotura ni erosión. En comparación con un cortador normal el Stabilis ofrece casi el triple de resistencia ante el impacto durante la corrida. Otra de las ventajas que lleva consigo este tipo de cortador es disminuir el desgaste plano del cortador, ya que al tener 2 chamfers el plano del desgaste tiende a permanecer en el área delimitada por el primer chamfer y el segundo chamfer proporciona protección contra el astillado, por lo cual la vida útil del diamante del cortador de la broca es mucho mayor, permitiendo así, mayores usos y perforaciones más eficientes por más tiempo (Baker Hughes, 2018).

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

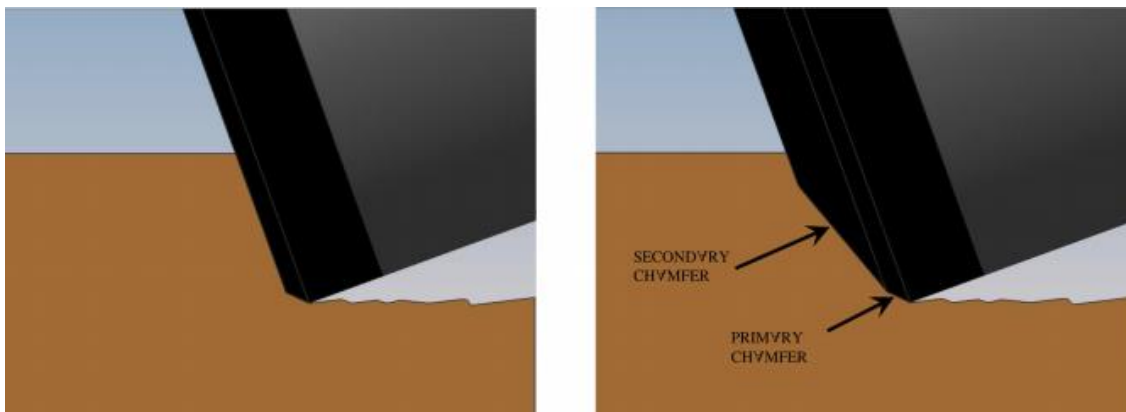


Figura 25. Cortador convencional vs cortador Stabilis.

Nota. Adaptado de (Izbinski, Patel, & VanDeven, Innovative Dual-Chamfer Edge Technology Leads to Performance Gains in PDC Bits, 2015).

Este tipo de tecnología ha sido utilizada en diferentes países como Kuwait, Italia u Omán donde una vez más se comprueba la eficacia del desarrollo de esta nueva tecnología de cortadores (figura 26).

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

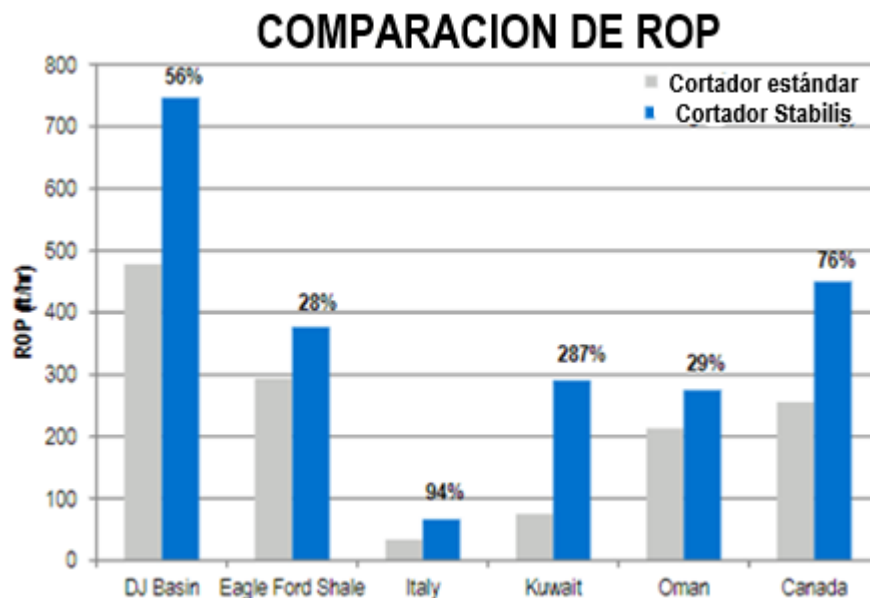


Figura 26. Rendimiento global de la tecnología Stabilis.

Nota. Adaptado de (Baker Hughes, 2016)

El desarrollo de nuevas tecnologías ha sido el foco de estudio de la industria, como lo es el caso de la tecnología de cortadores Stabilis, la cual ofrece cortadores más resistentes y mayores distancias de perforación en formaciones desafiantes. En secciones donde normalmente fallan los cortadores PDC, el Stabilis protege esos cortadores y aumenta el rendimiento de la fase (Baker Hughes, 2016).

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

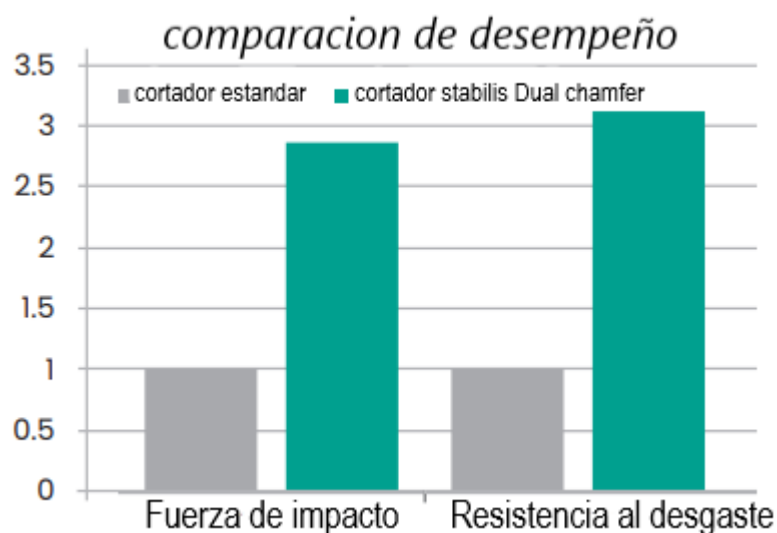


Figura 27. Comparación relativa del desempeño de un cortador estándar vs Stabilis.

Nota. Adaptado de (Baker hughes, 2015). Modificado por el autor.

Los cortadores Stabilis tienden a generar menores fluctuaciones que las generadas por cortadores de geometría convencional. De igual manera, el cortador Stabilis le permite al perforador atravesar formaciones duras con mayor eficiencia incluso a velocidades mayores que los cortadores tradicionales con toques menores y cortes más finos (Baker Hughes, 2018).

Entre otras ventajas de los cortadores Stabilis encontramos:

- Amortiguar la variación de la agresividad.
- Mejorar el flujo de recortes para mejorar la limpieza del pozo.
- Ayudar a perforar formaciones intercaladas y aglomeradas.
- Puede usar “back rake” bajos sin aumentar la posibilidad de tener fallas por sobrecarga.

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC



Figura 28. Cara de la broca con cortador convencional vs cara de la broca Stabilis.

Nota. Adaptado de (Baker Hughes, 2018).



Figura 29. Comparación de torque entre broca cortadores convencionales vs Stabilis.

Nota. Adaptado de (Baker hughes, 2015) .

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

4. Caso de aplicación, análisis y resultados.

La tecnología Stabilis ha sido el foco de estudio de Baker Hughes, por lo cual se ha implementado en diferentes campos del país. En este caso particular se trata de un campo A ubicado en el valle magdalena medio. A continuación, se muestran las generalidades de nuestro campo en estudio.

Tabla 10

Generalidades del campo de estudio

CAMPO A

Sección	12 ¼"
Cuenca	Valle magdalena medio
Formación	Real, colorado
TVD	4000 ft aprox.
ROP	614 fph aprox.
Tipo de pozo	Direccional.
Litología	Arena (55%), arcilla (25%) y conglomerado (10%).

El campo A consta de 48 pozos, de los cuales 37 han sido intervenidos por la compañía Baker Hughes con la tecnología Stabilis, a continuación se muestran los resultados obtenidos después de realizar las corridas.

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

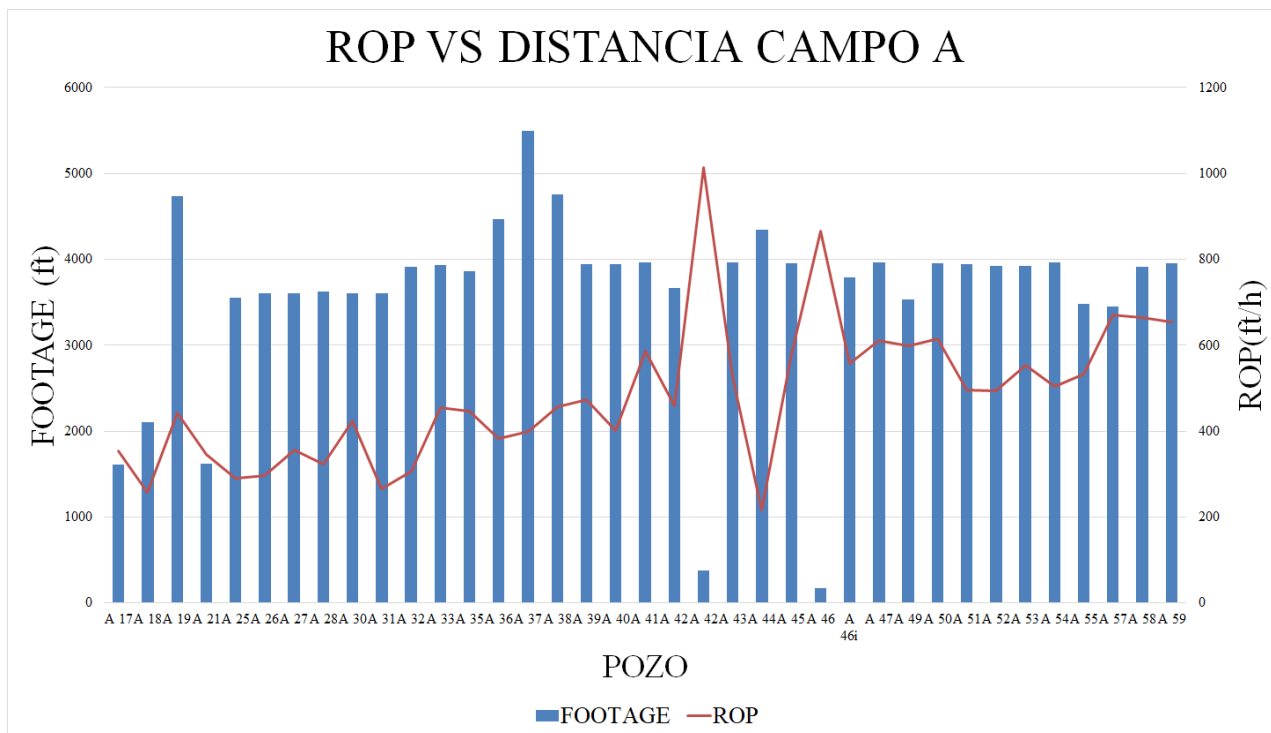


Figura 30. ROP vs distancia del campo A para pozos perforados con broca Stabilis.

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

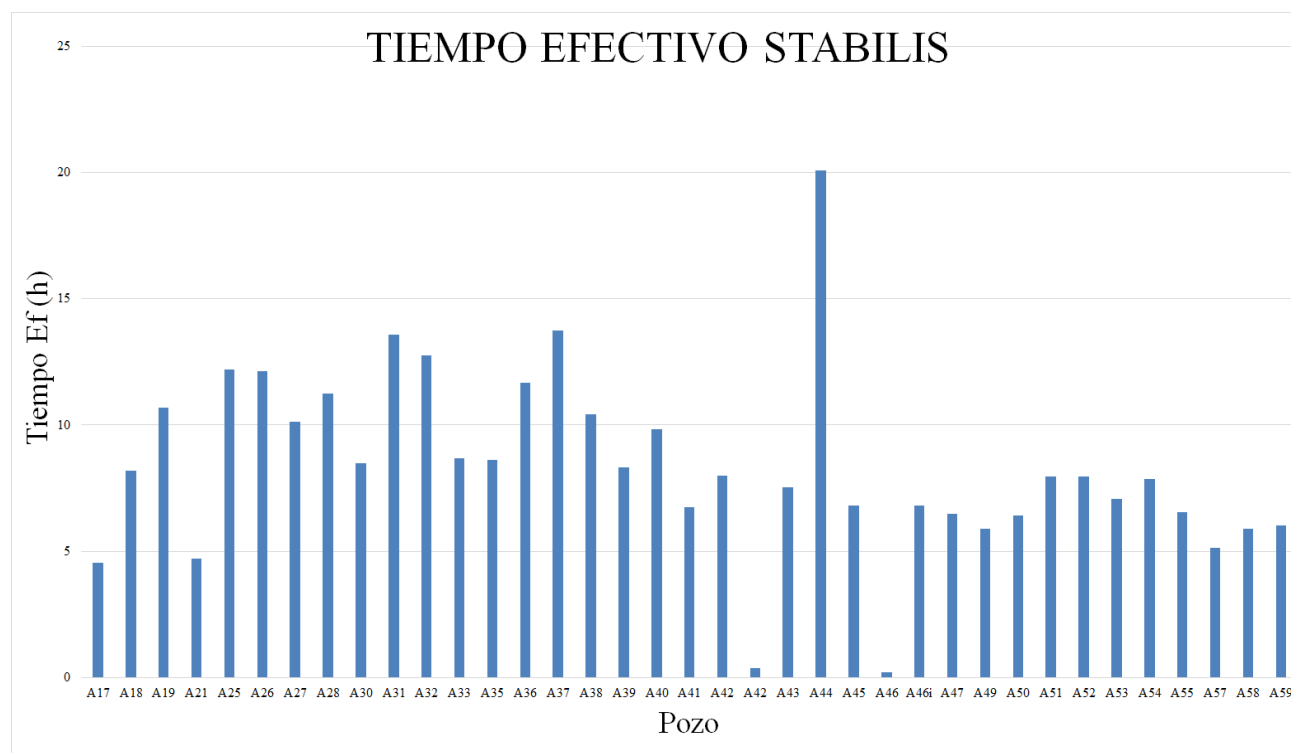


Figura 31. Tiempo efectivo para pozos que utilizaron brocas con cortadores Stabilis.

4.1. Comparación de desempeño por rangos de profundidad perforada

Con el fin de estudiar los cambios que introdujo la tecnología en términos de ROP y tiempo efectivo, se realizó una correlación entre los pozos que utilizaron la tecnología stabilis versus los pozos perforados con tecnología de cortadores convencionales en el mismo campo. Para la correlación se realizó una comparación con las respectivas tasas de perforación y profundidades perforadas (footage) en pozos con parámetros similares. De este modo los pozos perforados con ambos métodos fueron agrupados en rangos de “footage” para hacer una correlación más precisa.

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

La siguiente tabla nos da una muestra de la proyección por correlación que hubieran tenido los pozos que utilizaron cortadores estándar en cuanto a ROP y tiempos efectivos si se hubiese implementado en ellos la tecnología Stabilis propuesta por Baker:

Tabla 11

Factor de aumento de ROP en campo A

Footage(ft)	Stabilis ROP (ft/h)	Convencional ROP (ft/h)	FACTOR DE AUMENTO	Pozos Perforados
1000-2500	304,167	302,810	1,004	8
2500-4000	486,5359	377,712	1,288	32
4000-6000	420,568	216,243	1,945*	5

Para esta correlación se tomaron los datos de más de 40 pozos perforados. Y como se puede observar la tendencia que se observa es que a mayor “footage”, el aumento del rendimiento de las ratas de perforación es mayor lo que hace que la tecnología sea ideal para pozos con profundidades superiores a 2500 ft, ya que la optimización de la rata es directamente proporcional a los pies perforados. *Cabe aclarar que la mayoría de los pozos perforados con ambas tecnologías se encuentran en los rangos de 1000 a 4000 pies, y que para profundidades mayores se perforaron sólo 5 pozos por lo cual no se podría garantizar al cien por ciento que todos los pozos alcanzarán un aumento promedio del 94% debido a la muestra tan pequeña, pero sí decir que el aumento del rendimiento puede ser mayor a un 30%.

A continuación se muestra una gráfica de los pozos del campo que fueron perforados de manera convencional proyectados a la tecnología Stabilis.

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

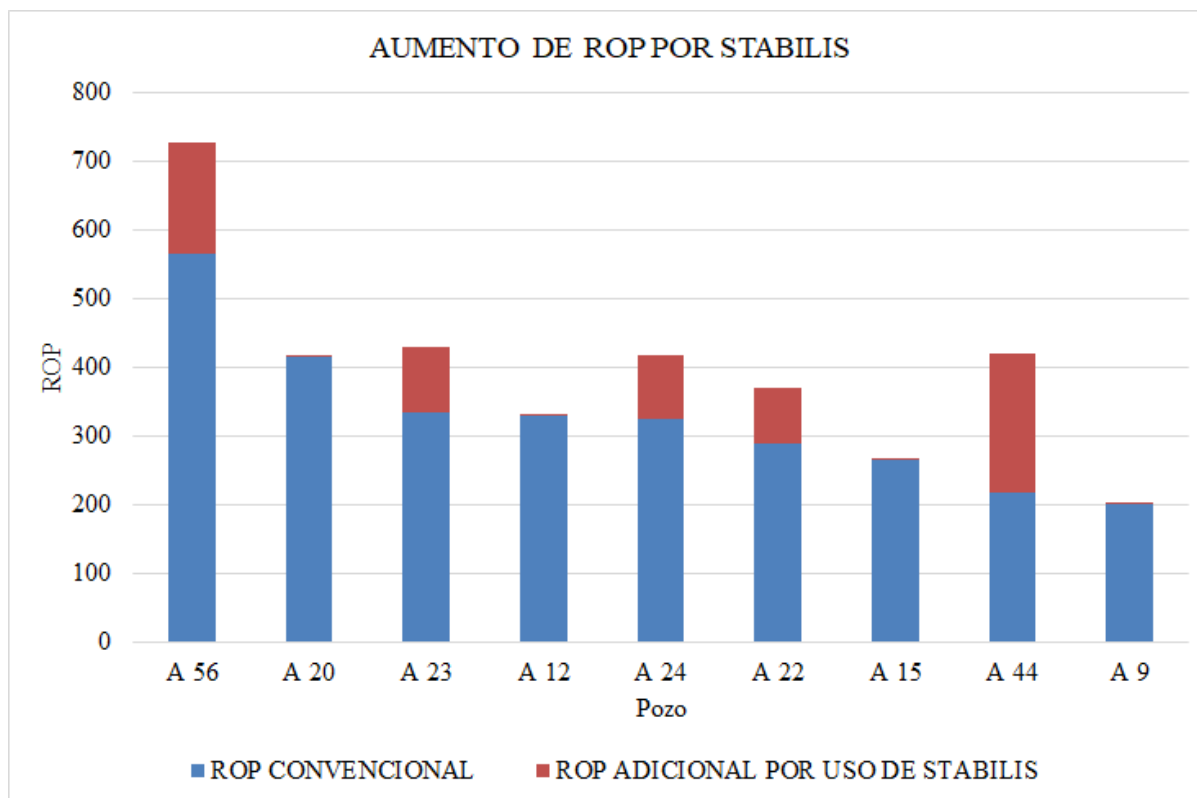


Figura 32. Aumento del ROP por cortador Stabilis.

En la gráfica anterior se muestra el aumento significativo de las ROP para todos los pozos en estudio del campo A. En algunos pozos se hace más notoria la diferencia debido a otros parámetros como WOB, torque, RPM, entre otras.

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

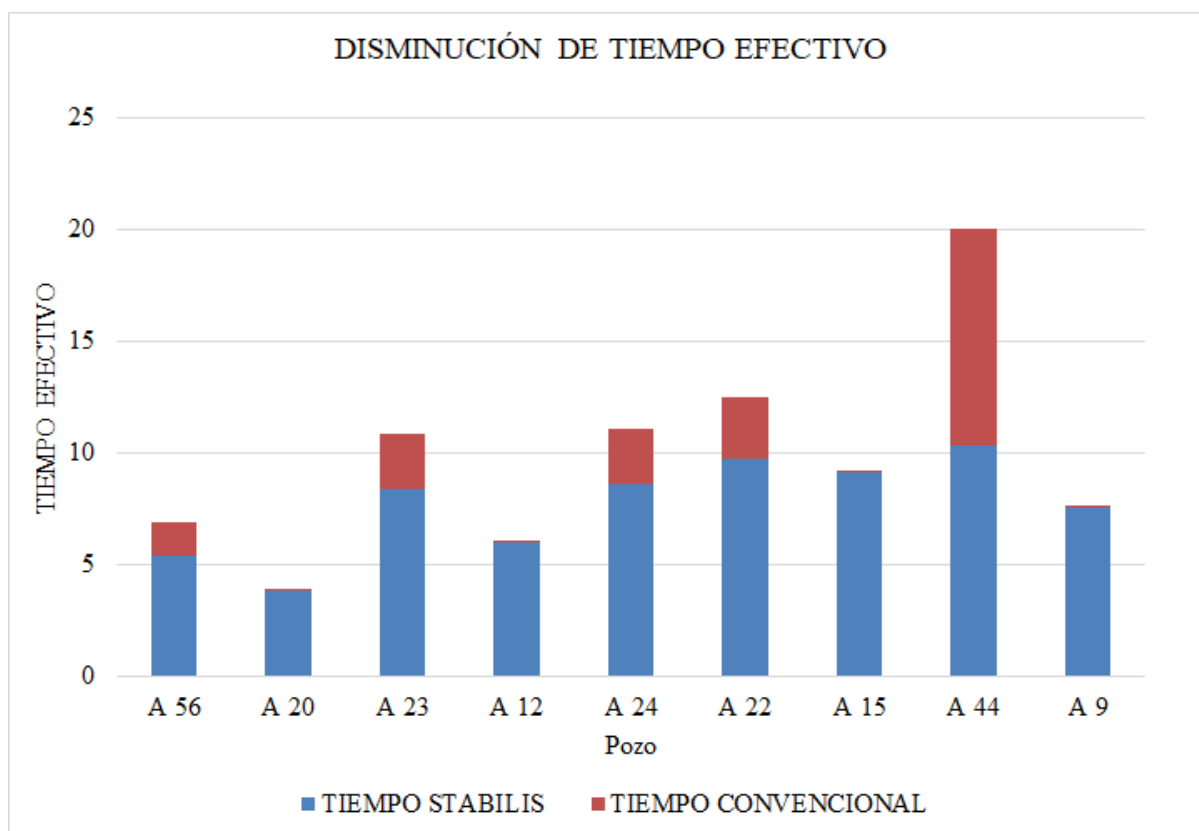


Figura 33. Comparación del aumento efectivo utilizando Stabilis.

De igual manera el parámetro tiempo fue optimizado, debido a que este es inversamente proporcional al ROP, por lo tanto, a aumentos de este último hay disminuciones en el tiempo, lo cual finalmente es el objetivo, ya que a menores tiempos se economizan los costos. Como se puede observar las disminuciones de tiempo van desde un 1% hasta casi un 50% de optimización.

En las figuras 32 y 33 se puede observar gráficas de comparación en donde se contrasta el rendimiento conseguido con la perforación con brocas convencionales y el rendimiento esperado con la tecnología Stabilis aplicando el factor de aumento obtenido de la correlación de los rendimientos de ambos métodos. Como se puede observar hay una diferencia notoria,

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

especialmente en los pozos que tiene un “footage” mayor a 2500 pies, sabiendo que la profundidad de perforación en Colombia ronda por estos números de footage se puede concluir que la tecnología ofrece una ventaja clara en términos de tiempo efectivo y ROP.

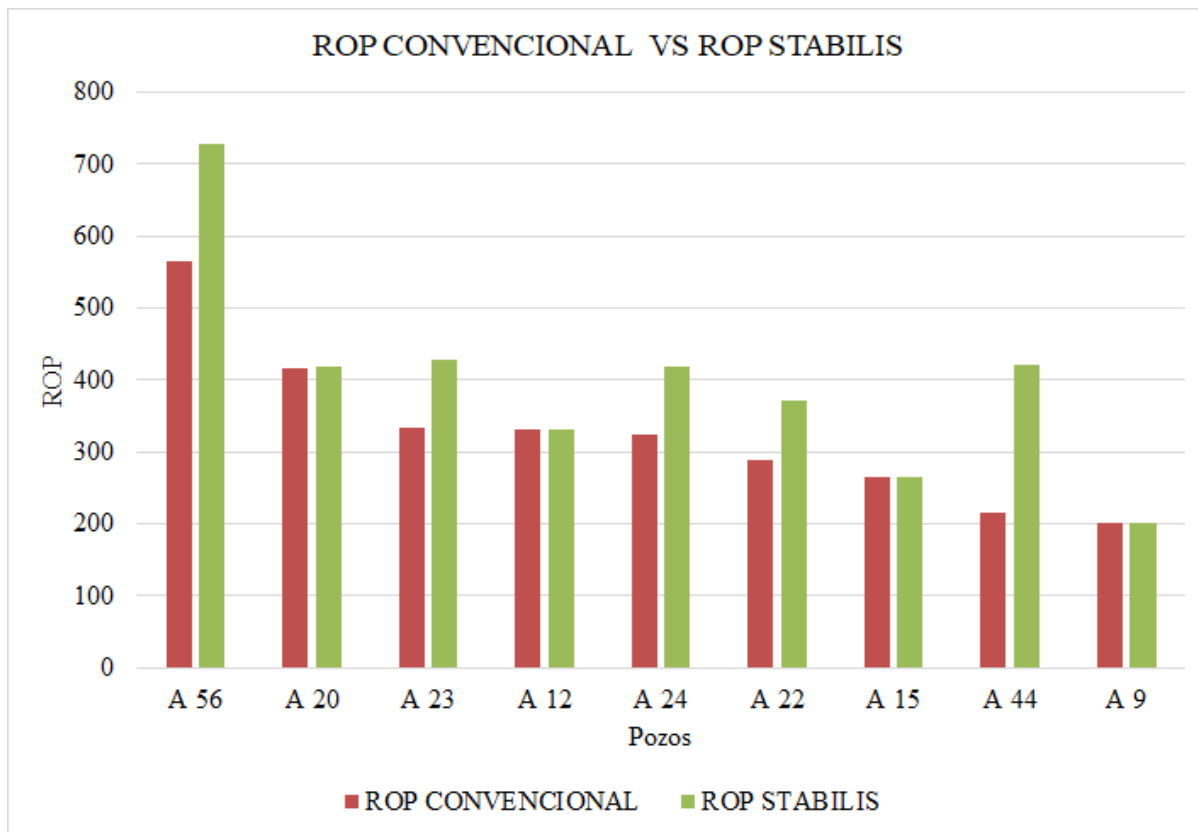


Figura 34. ROP con cortador convencional vs ROP con cortador Stabilis.

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

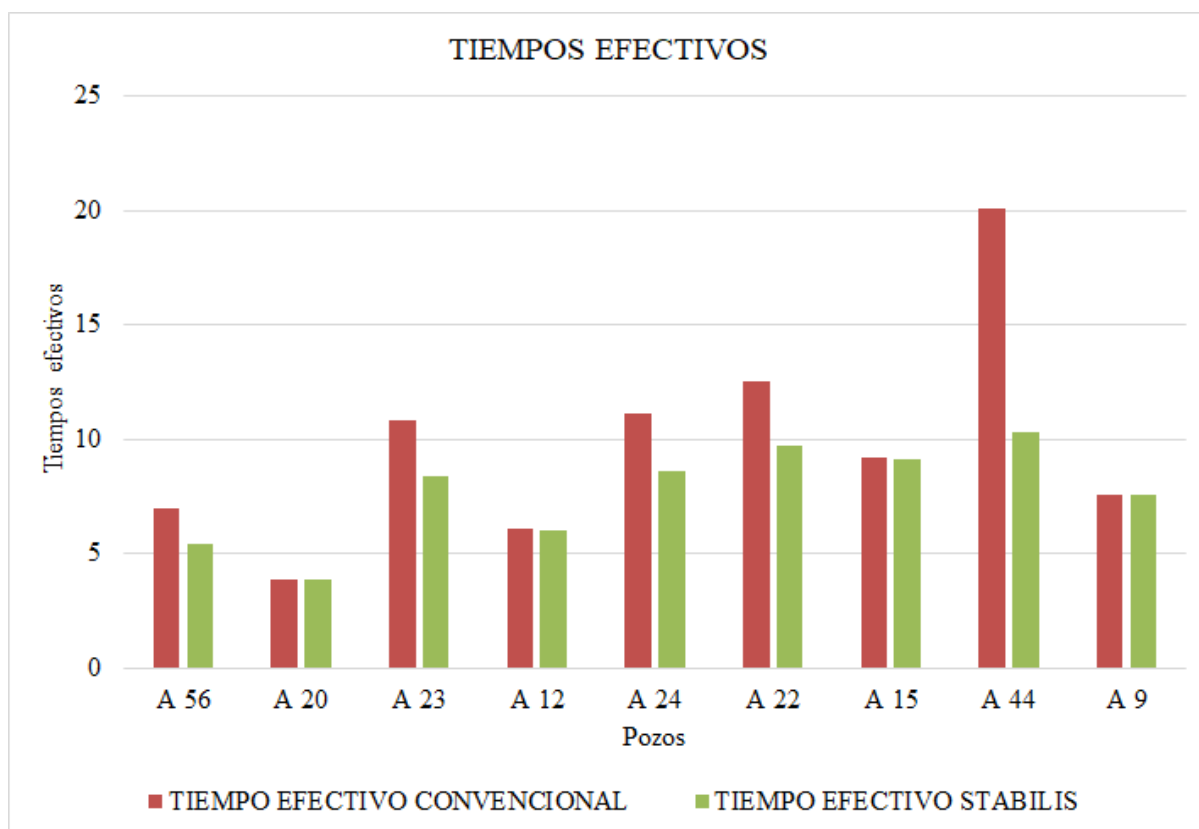


Figura 35. Comparación de tiempos efectivos cortador convencional vs Stabilis.

4.2. Comparación de desempeño por el total de la operación

Este caso comparativo ayuda a tener una idea en general de ambas tecnologías sin tener en cuenta el “footage”, sin tener en cuenta las formaciones que atravesaron ya que unos pozos perforaron hasta 2000 pies y otros hasta 4000 pies, pero dado la poca muestra que se obtuvo en esta operación para los rangos de 1000 a 2500 pies y 4000 a 6000 pies, es justo mirar también el desempeño general de la operación ya que es probable que siendo una muestra tan pequeña en los rangos antes mencionados estos aumentos podrían cambiar. De esta manera con los 45 pozos que

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

fueron tomados para el caso de estudio podemos decir que el balance fue muy positivo para la tecnología Stabilis sacándole ventaja a la convencional en más de un 40%.

Tabla 12*Balance general del ROP*

Broca	Pies perforados (ft)	Tiempo efectivo (h)	ROP (ft/h)	Aumento ROP (%)
Stabilis	132.780	303,13	438,03	44,96
Convencional	26.647	88,19	302,154	

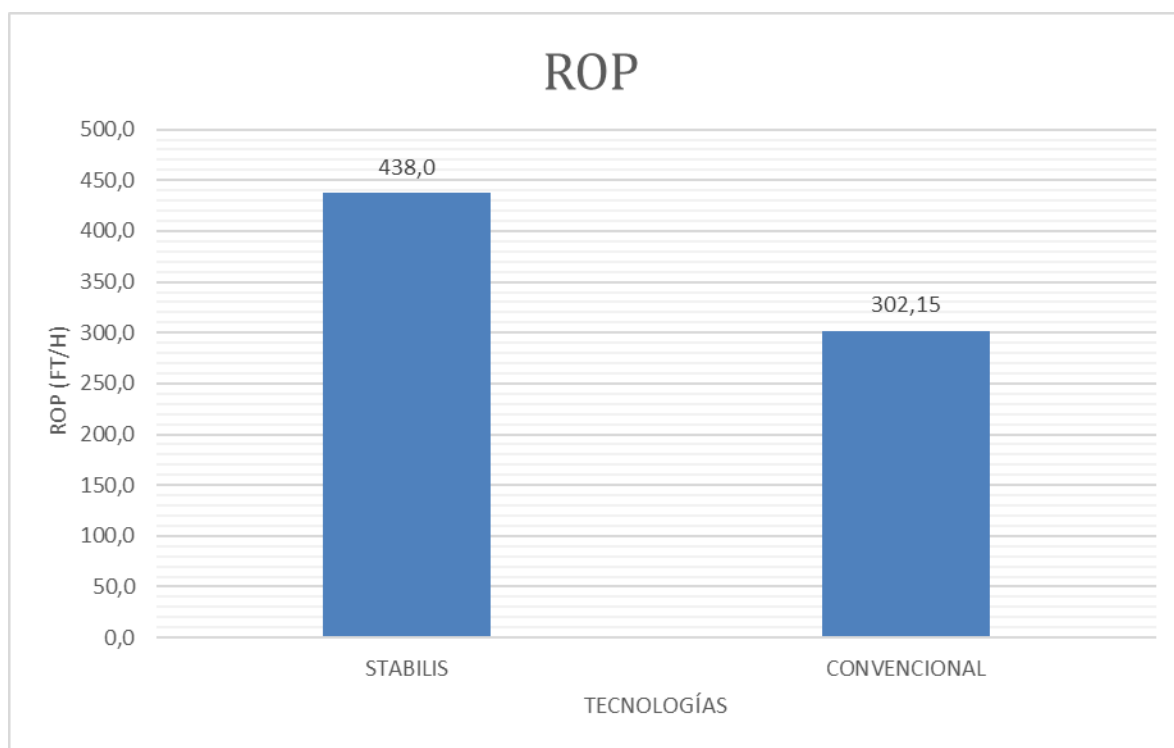


Figura 36. Comparación de ROP del total de pies perforados.

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

4.3. Análisis dull grading

Las figuras 37 y 38 corresponden al estado de las brocas después de correrse en dos pozos de condiciones similares en footages de 3963 ft y 3923 ft respectivamente, utilizando diferentes tecnologías de cortadores, en el primer caso (figura 37) se muestra el estado de daño con el que salió una broca con cortador estándar y en el caso 2 (figura 38) se ilustra el estado de salida de una broca con tecnología de cortador Stabilis Dual Chamfer.

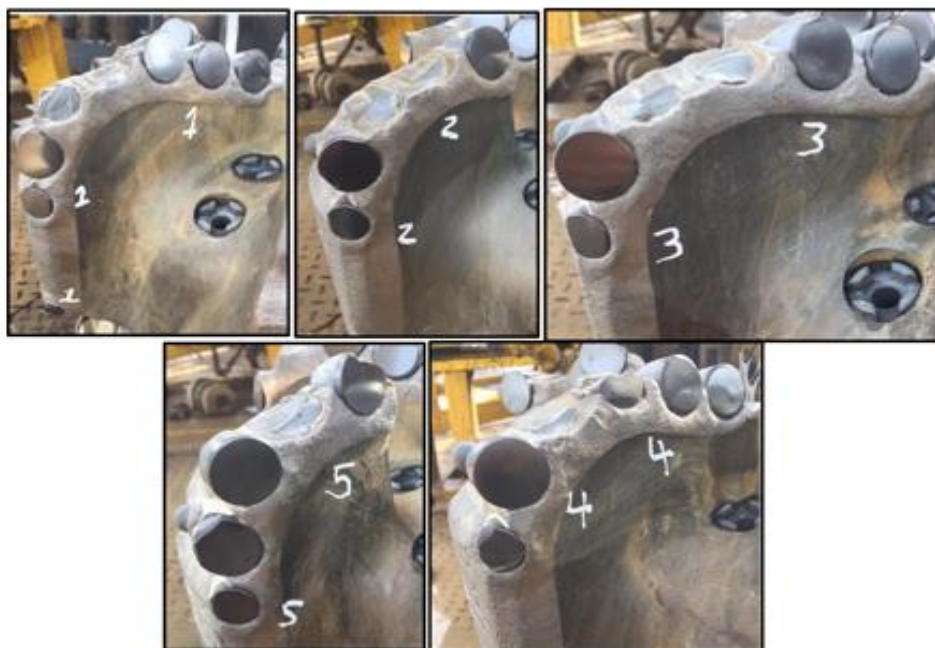


Figura 37. Dull de una broca con cortador convencional.

El análisis arrojó la siguiente caracterización de daño: 2-3-BT-N-X-I-WT-TD, lo cual informa que la broca presenta desgastes en todas sus aletas. Se evidenciaron cortadores rotos y cortadores desgastados por la fricción en la nariz de la broca, de igual manera sale con todas sus boquillas destapadas. El desgaste posiblemente se originó por la presencia de altos contenidos de

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

conglomerados y limolita durante la corrida. Las aletas 1,2,4 y 5 presentan 3 cortadores rotos cada una, y la aleta 3 presenta 2 cortadores rotos para un total de 14 cortadores rotos, lo cual evidencia un alto daño durante el proceso de perforación.

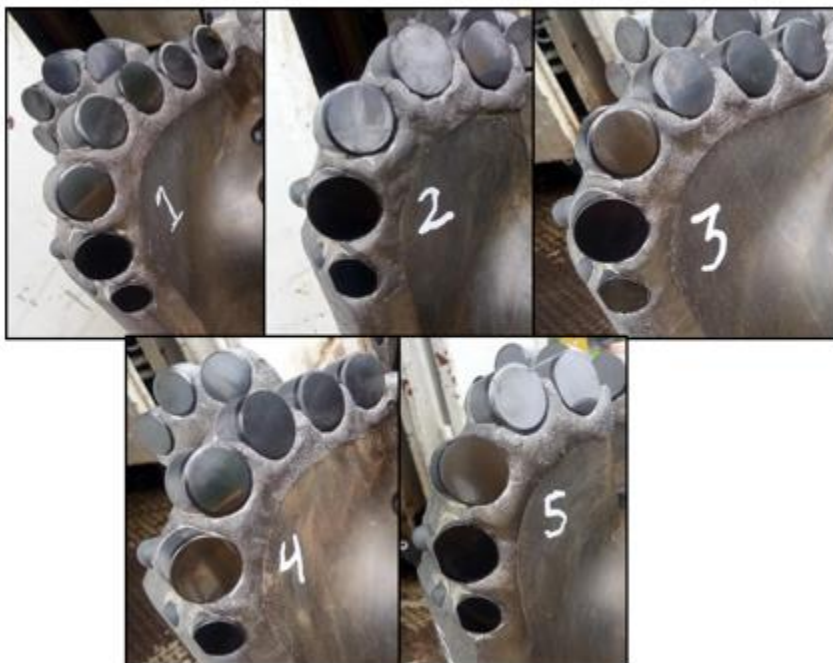


Figura 38. Dull de una broca con cortador Stabilis.

Como se puede evidenciar en la figura anterior la broca no presenta ningún daño notable, se evidencia buena condición de los cortadores, por lo cual, la caracterización de daño fue: 0-0-NO-A-X-I-NO-TD.

Las figuras 39 y 40 hacen referencia nuevamente a otro par de pozos que fueron perforados con condiciones y distancias perforadas similares.

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC



Figura 39. Estado de salida de la broca con cortador convencional.

Los caracteres arrojados luego del análisis de daño fueron: 3-3-BT-S-X-I-CT-TD, lo cual indica que la broca sale en calibre, pero presenta desgaste en varias de sus aletas. Adicionalmente, se pueden evidenciar cortadores rotos y astillados en el área del hombro.

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC



Figura 40. Estado de salida de la broca configurada con cortadores Stabilis Dual chamfer.

La broca sale del pozo con una buena condición mecánica ya que no presenta mayores daños y sus cortadores están en un estado óptimo con el mínimo de desgaste. La caracterización que arrojó el análisis fue: 0-0-NO-A-X-I-NO-TD.

Como se puede observar en la figura 40, en este ámbito también destaca la tecnología Stabilis ya que sus brocas presentan un daño significativamente menor después de las corridas de perforación, a diferencia de las brocas con tecnologías convencionales que presentaron un daño más notorio, esto se debe a que los cortadores con tecnología Dual chamfer soportan más el desgaste

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

por el bisel adicional en la cara de diamante del cortador que tienen. Adicionalmente los costos en cuanto a reparación o remanufacturado, la broca Stabilis va a ser mucho más barata que una broca convencional.

5. Análisis financiero

Se sabe que la tecnología es efectiva, pero eso no significa necesariamente que sea rentable, ya que como en todo negocio algo innovador aunque aumente el rendimiento, debe cumplir ciertas variables económicas para que sea viable su aplicación, para este caso los factores que influyen a favor de la tecnología son el tiempo y el costo del taladro por hora, además de los costos de reparación que son menores que en una broca convencional, y los factores que influyen en contra son los costos iniciales de la misma tecnología aplicada a las brocas Stabilis. De esta manera se debe hacer una evaluación poniendo en cuestión estos factores, para ver si es rentable la aplicación de esta tecnología.

Para realizar este análisis se tomaron los desempeños totales de ambas tecnologías en los campos perforados, se hizo la sumatoria de los pies perforados, el tiempo total efectivo el cual es dependiente del ROP promedio de la operación, los costos de la broca y del taladro por hora.

Para estudiar la rentabilidad de la tecnología se tiene que estudiar el porcentaje de ahorro vs la inversión que se está aplicando con la misma, ya que este va a ser el factor diferencial, porque las ganancias que genera la empresa perforando son las mismas, pero no es menos importante el potencial ahorro que podría generar una nueva tecnología ya que eso al fin y al cabo se traduce en flujo de caja para la organización. Por lo tanto, el punto de comparación de la tecnología se establece con el OPEX.

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

5.1.OPEX.

En inglés, Operating Expenditures se puede definir como gastos operativos, gastos de funcionamiento o gastos operacionales, lo que quiere decir que son permanentes ya que no hay manera de evadir estos gastos pues son de vital importancia para el funcionamiento de una empresa o sistema. Para este caso en particular nuestro OPEX va a estar determinado por factores como el costo del taladro en función del tiempo, el costo de la broca y los pies perforados, de esta manera:

$$CPF = \frac{\frac{\text{Costo taladro}}{\text{hora}} * \text{tiempo} + \text{Costo de la broca}}{\text{Pies perforados}}$$

Cálculo del OPEX:

Donde:

CPF: Costo por pie.

Costo taladro por hora: USD/Hr

Tiempo: (Hr) horas

Costo de la broca: USD

Pies perforados: (Ft)

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

Tabla 13*Comparativa de costos Stabilis vs Convencional*

Tipo de broca (Tecnología cortadores)	Costo UNIT en Millones de USD	Costo de reparación en Millones de USD	Rendimiento esperado (ft)	Costo broca USD/ft	Costo taladro USD/Hr
Stabilis DualChamfer	3,9	1	45000	108,889	188,5
Convencional	2,7	1,4	30000	136,67	188,5

*Nota: Información proporcionada por Baker de manera aproximada por temas de confidencialidad.

Tabla 14*Costos totales Stabilis vs Convencional*

Broca	Pies perforados(ft)	Tiempo (Hr)	Costo de broca (USD)	Costo de taladro (USD)	Costo total	Costo promedio por pie (USD/ft)	Beneficio bruto
Stabilis DualChamfer	132.780	303,13	14.458.26 6,67	57.140,0 1	14.515.406,67	109,319	20,37%
Convencional	26.647	88,19	3.641.756 ,67	16.623,8 2	3.658.380,48	137,291	

Si bien los costos totales difieren por mucho, es debido a que para este estudio se perforaron más pozos con la tecnología Stabilis, por tanto, el dato fundamental es el costo promedio por pie, con el cual se puede observar que el beneficio obtenido con la tecnología Stabilis para este caso en el rubro de costo total promedio por pie es de 20,37% con respecto a la tecnología convencional.

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

5.2. Valor presente neto

El valor presente neto o el valor actual neto es el valor que tiene el dinero de los diferentes periodos de un proyecto o negocio a día de hoy aplicando una tasa de descuento apropiada. Sabemos que el dinero tiende a perder su valor con el tiempo, y esto es debido a fenómenos como la inflación, por tal motivo es necesario aplicar tasas de interés al momento de realizar cálculos para la toma de decisiones, ya que las decisiones que se tomen hoy afectarán inevitablemente en el futuro, y esto, en una empresa se tiene que tener muy claro porque los proyectos por lo general son a mediano y largo plazo. De este modo, cuando se trata de evaluar un proyecto no solo se puede pensar en sumar y restar flujos de cajas para obtener las ganancias, sino que hay que evaluar una tasa que abarque los riesgos de la devaluación del dinero con el tiempo, a esto se le llama tasa de descuento o de interés. Cuando se haya elegido de buena manera una tasa de interés adecuada se puede proceder a evaluar la viabilidad del proyecto. Cuando el proyecto tiene una tasa superior a la tasa de oportunidad del mismo, se puede concluir que el proyecto es viable.

5.3. TIR

La TIR (Tasa Interna de Retorno) es la tasa de interés que genera el proyecto, en otras palabras, es la medida de la rentabilidad de un proyecto. Por lo general, una empresa define una tasa de oportunidad la cual es la base mínima que requiere el proyecto para ser viable, una TIR mayor a la tasa de oportunidad nos marca la pauta de que ese proyecto es factible y se puede llevar a cabo, por el contrario, si es menor o igual a la tasa de oportunidad, no vale la pena realizar dicho programa de inversión. Para este análisis se va a tomar la tasa de oportunidad que suele usarse generalmente en el campo de la industria petrolera cuyo valor es del 12%, por lo tanto, la inversión

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

inyectada a la tecnología Stabilis tiene que generar un ahorro en el flujo de caja con respecto a la tecnología actual, tal que genere una tasa de interés mayor al 12%, ya que se está comparando un escenario en donde se podría seguir igual con la tecnología actual invirtiendo cero pesos adicionales versus una nueva tecnología a la cual hay que inyectarle dinero, y que para que sea viable tiene que generar un beneficio significativo para la empresa.

$$TIR = \left(-I + \left(\frac{FC}{(1+X)^n} \right) \dots \right) = 0$$

Donde,

I: Inversión inicial

FC= Flujo de caja neto

n: Periodo de tiempo

X: Tasa de descuento o incógnita

Para el caso de estudio los periodos se van a tomar en referencia a 15000 pies perforados y lo vamos a evaluar en 12 periodos de perforación.

Cada 15000 pies perforados tenemos un beneficio de 419,500 US\$.

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

Tabla 15*Tasa interna de retorno en 12 periodos de perforación.*

Tasa interna de retorno (TIR) en doce periodos			
Periodo	Inversión (Millones \$US)	Ingresos (Millones \$US)	FC Neto
0	-0,8	-0,8	-0,8
1		0,419569425	0,4195694
2		0,419569425	0,4195694
3		0,419569425	0,4195694
4		0,419569425	0,4195694
5		0,419569425	0,4195694
6		0,419569425	0,4195694
7		0,419569425	0,4195694
8		0,419569425	0,4195694
9		0,419569425	0,4195694
10		0,419569425	0,4195694
11		0,419569425	0,4195694
12		0,419569425	0,4195694
		TIR	52%

Aplicando la ecuación de la tasa interna de retorno se tiene que la tasa interna de retorno (TIR) tiene un valor de 52% en doce periodos de perforación de 15 000 pies cada uno, lo que denota un rendimiento excelente ya que se encuentra marcando 40 puntos más que la tasa de oportunidad que se escogió para la empresa, por lo cual es una decisión más que fácil debido al resultado tan favorable. En 4 periodos de perforación el TIR es de es de 38%, estando 26 puntos por encima de la tasa de oportunidad, por lo cual se puede concluir que la aplicación de la tecnología Stabilis Dual chamfer además de aportar confiabilidad y viabilidad, aporta un retorno

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

rápido, casi que inmediato en un proyecto de perforación, gracias a sus tiempos, y más importante aún, gracias a su resistencia al desgaste.

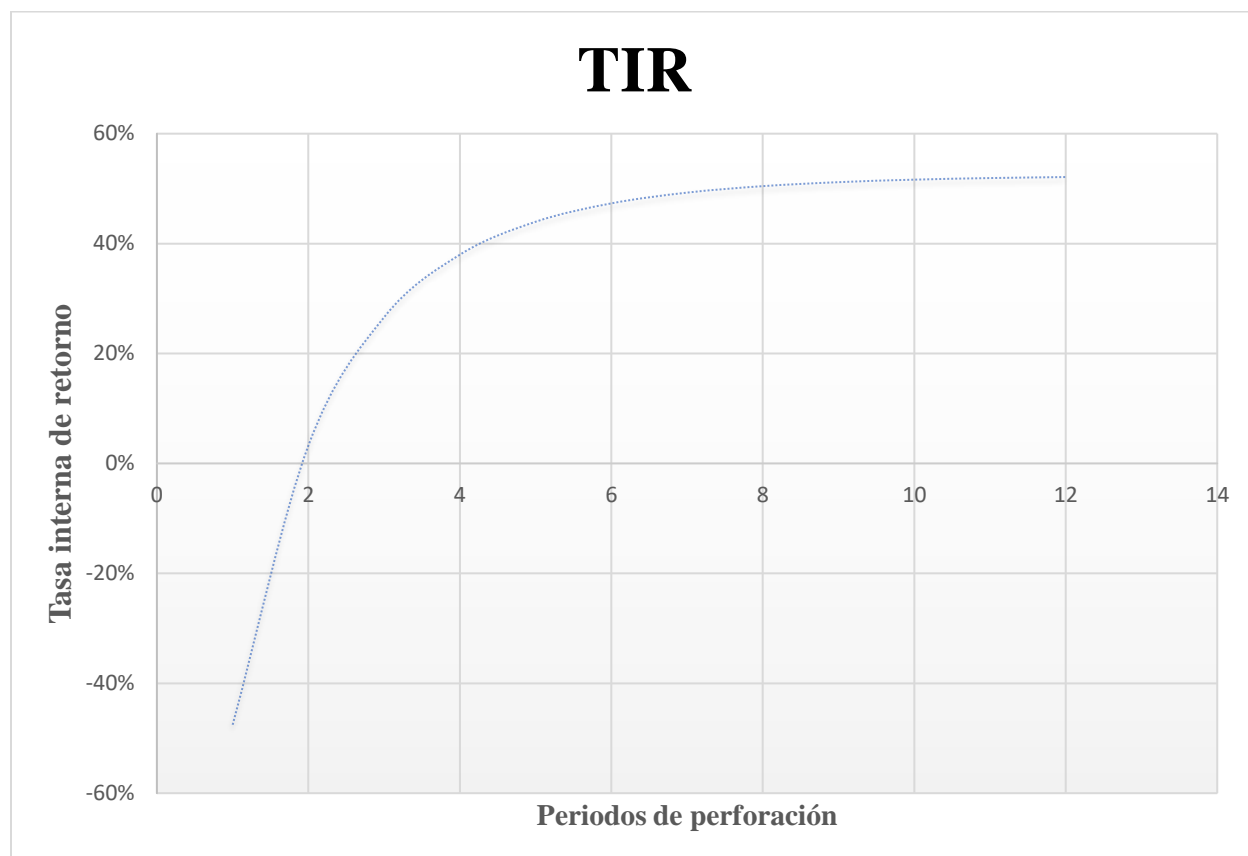


Figura 41. Comportamiento del TIR a través de los pies perforados.

En la Figura 41 se puede observar que según la tasa interna de retorno a muy corto plazo el proyecto nos genera un resultado negativo, lo cual significa que para un proyecto de perforación menor a 15000 pies no es rentable, pero en los siguientes periodos, es decir, de 30.000 pies en adelante, la tasa empieza a subir muy favorablemente hasta estabilizarse en un 52%, con lo cual podemos concluir que el proyecto es ideal para programas de perforación de mediano y largo plazo.

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

6. Conclusiones

La compañía Baker Hughes propone que su tecnología aumenta el ROP un 20%, número que es coherente con los resultados de las corridas efectuadas en el campo A, incluso pesimista en este caso ya que el balance general arroja un 44 % de aumento. Por lo cual podríamos concluir que efectivamente el aumento del rendimiento que se puede esperar al añadir la tecnología Stabilis Dual chamfer es de al menos un 20%.

El tiempo es otro aspecto que se deriva del ROP en el cual la nueva tecnología Stabilis Dual chamfer mejora a la tecnología convencional. En la industria las mejoras de disminución en el tiempo son claves al momento de realizar una operación y económicamente esto se traduce en disminución de costos de taladro, otras maquinarias y recursos humanos.

La durabilidad de las brocas con la tecnología Stabilis es en realidad el componente más significativo de la comparación a nivel económico, ya que hace que su precio valga la pena debido a que rinde alrededor de 50% de pies perforados más que la tecnología convencional porque se desgasta significativamente menos. Esto se traduce en ganancias para la empresa en sus flujos de caja a medida que aumentan los pies perforados en un proyecto que incluye Stabilis Dual chamfer.

El proyecto es económicamente viable debido a que la tasa interna de retorno es mayor a la tasa de oportunidad estipulada por la empresa que es del 12%, por lo cual con un TIR de 52% se encuentra 40 puntos por encima de la tasa de oportunidad lo cual le da una puntuación muy aceptable al proyecto de utilizar la tecnología Stabilis Dual chamfer.

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

7. Recomendaciones

Se recomienda evaluar los sensores de lecturas durante las corridas de perforación, de tal manera que se puedan analizar las vibraciones en fondo y la influencia de la nueva tecnología de cortadores en esta.

Anexa a la tecnología Stabilis Dual chamfer, se encuentran otras tecnologías como lo son la Stay Cooler y la Shock Waves, siendo estas dos últimas las más recientes innovaciones de Baker Hughes, se recomienda hacer corridas de pruebas con estas tecnologías para determinar la eficacia de estas en el campo A y hacer las comparaciones para definir la tecnología óptima para futuros proyectos de perforación.

La invención de tecnologías en la industria petrolera no siempre se da de la misma manera para todos los campos, ya que la heterogeneidad es un factor que juega un papel muy importante, puesto que, ningún campo se comporta igual a otro. Sería de gran utilidad llevar este tipo de tecnologías a otros yacimientos y observar su comportamiento, para así, establecer un protocolo que le permita a la empresa delimitar variables que exhiban la viabilidad de la implementación de dicha tecnología en cualquier formación.

Baker Hughes, en función de la mejora de la tecnología Stabilis Dual chamfer proyecta una reducción en la longitud de uno de los chamfers, estableciendo una nueva configuración de broca, por lo cual sería importante realizar pruebas de corridas en el campo A para establecer comparaciones y determinar si los cambios realizados son los ideales y aportan más beneficios de los que ya se han obtenido con la tecnología Stabilis.

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

Referencias

- Adams, N. (1985). Obtenido de https://www.academia.edu/10795504/Drilling_Engineering_Neal_Adams
- Baker Hughes. (2015). *Talon Force High-Velocity PDC Drill Bits*. Archivo confidencial.
- Baker Hughes. (2016). *King cutter PDC cutting technology*. Archivo confidencial.
- Baker Hughes. (2018). *Stabilis reinforced cutter technology*. Archivo confidencial.
- Brandon, B., Cerkovnik, J., Koskie, E., Bayoud, B., Colston, F., Clayton, R., . . . & Niemi, R. (1992). *Application of the New IADC Dull Grading System for Fixed Cutter Bits*. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/16145-MS
- Brandon, B., Cerkovnik, J., Koskie, E., Bayoud, B., Colston, F., Clayton, R., . . . & Niemi, R. (1992). *Development of a new IADC Fixed Cutter Drill Bit Classification System*. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/23940-MS
- Brandon, B., Cerkovnik, J., Koskie, E., Bayoud, B., Colston, F., Clayton, R., . . . & Niemi, R. (1992). *First Revision to the IADC Fixed Cutter Dull Grading System*. Society of Petroleum Engineers. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/23939-MS
- Burgoyne, A. e. (1991). *Applied Drilling Engineering*.
- Christensen, H. (2008). *Drill bits foundation*. Texas: Hughes Christensen Company.
- Christensen, H. (2008). *IADC dull grading system for fixed cutters bits*. Texas: Hughes Christensen Company.
- Clark, D., Coolidge, R., Kelety, J., & Kerr, J. (1987). *Dull Grading System for Fixed Cutter Bits*. Society of petroleum Engineers. doi:10.2118/16145-MS
- Haro, W. (2013). *Metodología para la selección de brocas para el campo Cuyabeno-VHR*. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

Hidrovisor-ASVAMM. (s.f.). Obtenido de

[https://sites.google.com/site/invhidrovm/Descripcion/cuenca-sedimentaria-valle-medio-del-magdalena.](https://sites.google.com/site/invhidrovm/Descripcion/cuenca-sedimentaria-valle-medio-del-magdalena)

Izbinski, K., Cardoe, J., & Bomidi, J. (2019). *Increased ROP by 18% in Norway and in Other Applications through Optimizing Cutter Geometry from Laboratory Tests, Numerical Models and Field Tests.* Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/194160-MS

Izbinski, K., Patel, S., & VanDeven, A. (2015). *Innovative Dual-Chamfer Edge Technology Leads to Performance Gains in PDC Bits.* Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/194160-MS

Leon, M. (2012). *Elaboración de una manual sobre selección y utilización de brocas de perforación que se emplean en la industria petrolera.* Quito, Ecuador: Universidad Tecnológica Equinoccial.

Liu, Y., Chen, M., & Sheng, S. . (2016). *Optimisation Leads to Improved Hybrid Bit Design and Enhanced Drilling Efficiencies in Challenging Vertical Application in Tarim Basin, China.* Society of Petroleum Engineers. doi:10.2523/IPTC-18755-MS

Lozano, E., & Zamora, N. (2014). Anexo N Compilación de la cuenca del valle medio del magdalena. Obtenido de <http://recordcenter.sgc.gov.co/B20/23008100024725/Documento/Pdf/2105247251114000.pdf>.

Manual, D. (2017). *Drilling Manual.* Obtenido de <https://www.drillingmanual.com/2017/11/classification-of-fixed-cutter-bits.html>

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC

Monzón, A. (2010). *Caracterización del conglomerado basal Tiyuyacu para la correcta aplicación de brocas en los campos Yanaquincha este y Limoncocha en el complejo Indillana*. Guayaquil, Ecuador: Escuela superior politécnica del litoral.

Oliveira, G. D., Freesz, M. P., Izbinski, K. T., Valbuena, F., Carvalho, D. J., & & Alonso, A. (2015). *Unique Hybrid Drill Bit with Novel PDC Cutters Improves Performance in Ultra-Deepwater Brazil Pre-Salt Application*. Society of Petroleum Engineers. doi:10.4043/26067-MS

Ramos, J. (2011). *Estado del Arte de Brocas de Perforación*. Obtenido de <http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/784/1/1034302975-2011-2-IP.pdf>.

ANÁLISIS DE NUEVA TECNOLOGÍA EN BROCAS PDC