

**Avances Tecnológicos y Caracterización de Brocas Diseñadas para Perforar Formaciones  
Duras y Abrasivas.**

**Héctor Alejandro Montaña Rojas, Juan Sebastián Gómez Delgado**

**Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero de Petróleos**

**Director**

**Wilson Raúl Carreño Velasco**

**Magister en Diseño, Gestión y Dirección de Proyectos**

**Universidad Industrial de Santander**

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas**

**Escuela de Ingeniería de Petróleos**

**Bucaramanga**

**2017**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos a la Universidad Industrial de Santander y a la Escuela de Ingeniería de Petróleos por brindarnos los conocimientos que hemos adquirido, por formarnos como profesionales capaces e íntegros, además de permitirnos aprender de grandes profesionales y grandes seres humanos.

Al Ingeniero Wilson Raúl Carreño, por su apoyo, instrucciones y tiempo, por permitirnos hacer este trabajo con su ayuda y su motivación, por ser un gran profesional y una excelente persona.

A los Ingenieros Fabián Becerra, Sandro Mendoza y su equipo de trabajo, por darnos las bases y soporte que necesitamos, por brindarnos su tiempo y colaboración que ha sido fundamental para poder desarrollar este trabajo.

Al Ingeniero José Zambrano, por su ayuda y disposición para poder realizar el trabajo.

**DEDICATORIA**

*A Dios, por permite cumplir mis metas, por darme a mi familia, por siempre guiar e iluminar mi camino, por siempre estar cuando más lo necesite y llenar mi vida de personas maravillosas.*

*A mis padres, Héctor Montaña Montaña y Mary Rojas Martínez, por ser mi motivación cada día porque con su esfuerzo y sacrificio me dieron la posibilidad de lograr lo que hasta hoy he conseguido, por su gran ejemplo, comprensión y amor. A mi hermana, Paula Andrea por ser mi inspiración para cada vez ser mejor.*

*A mis tías, Soraida, Nelsy, Luisa, Nazly, Miyar y toda mi familia por sus consejos e incondicional apoyo; a Nancy por siempre acogerme como a un hermano.*

*A mis amigos, Jhon, Daniel, Sergio, Marco, Sharon por convertirse en mis hermanos, por compartir tantos momentos buenos y malos. A María Paula, por alegrar mi vida y ser mi compañía.*

*Alejandro Montaña.*

*A Dios, por guiarme, enseñarme y cuidarme en buenas y malas experiencias; por ser mi sustento y quien siempre ha estado cuando he necesitado, mi mayor fortaleza y mi mejor amigo.*

*A mi mamá, Luz Marina Delgado Moreno, por su amor y cariño, por ser mi mayor motivación y quien siempre está para aconsejarme.*

*A mi papá, Jorge Eliecer Gómez Sánchez, porque desde el cielo me cuida y orienta, por permitirme vivir tranquilo y feliz junto a mi madre.*

*A mi familia, por su incondicionalidad, por brindarme tantas alegrías y su apoyo.*

*Juan Sebastián Gómez*

**Tabla de Contenido**

INTRODUCCIÓN	13
1 OBJETIVOS	14
2 MARCO TEÓRICO	15
2.1 Formación	15
2.1.1 Dureza.	16
2.1.2 Formaciones abrasivas.	16
2.2 Formación mirador	16
2.3 ROP (Rate of penetration)	16
2.4 Velocidad De Rotación (RPM)	17
2.5 WOB (Weighton bit)	17
2.6 Broca	18
2.6.1 Brocas de cortadores fijos.	18
2.6.8 Broca de conos giratorios.	26
2.7 DullGrading	33
2.7.1 Estructura básica.	34
3 DESARROLLO DE LAS BROCAS DE PERFORACIÓN	38
3.1 Broca Conos Giratorios.	38
3.2 Broca Con Cortadores PDC	41
4 DESCRIPCIÓN DE LAS PRINCIPALES TECNOLOGÍAS	45
4.1 Sharc	45
4.1.1 Cortadores Onyx 360.	46

BROCAS PARA PERFORAR FORMACIONES DURAS Y ABRASIVAS	8
4.2 Genesis	47
4.3 Quantec	48
4.4 Talon	50
4.5 Shamal	52
4.6 Vanguard	53
4.7 Impregnada.	56
5 COMPARACIONES	57
5.1 Diámetro De La Broca: 181/2 pulgadas.	58
5.2 Diámetro De La Broca: 14 3/4 pulgadas.	63
5.3 Diámetro De La Broca: 10 5/8 Pulgadas.	68
5.4 Diámetro De La Broca: 81/2 pulgadas.	73
5.5 Diámetro De La Broca: 6 Pulgadas.	79
5.6 Gráficas De Valores Promedios	84
6 CONCLUSIONES.	86
7 RECOMENDACIONES.	88
REFERENCIAS	89

**Lista de Tablas**

Tabla 1. Características de daño de la broca	35
Tabla 2. Característica del daño de los sellos.	36
Tabla 3. Condición del calibre.	37
Tabla 4. Razón de salida de la broca.	37
Tabla 5. Características brocas Talon.	50
Tabla 6. Primera comparación broca 18.5 pulgadas.	58
Tabla 7. Segunda comparación broca 18.5 pulgadas	60
Tabla 8. Primera comparación broca 14.75 pulgadas.	63
Tabla 9. Segunda comparación broca 14.75 pulgadas.	65
Tabla 10. Primera comparación broca 10.625 pulgadas.	68
Tabla 11. Segunda comparación broca 10.625 pulgadas.	71
Tabla 12. Primera comparación broca 8.5 pulgadas.	73
Tabla 13. Segunda comparación broca 8.5 pulgadas.	76
Tabla 14. Primera comparación broca 6 pulgadas.	79
Tabla 15. Segunda comparación broca 6 pulgadas.	82

**Lista de Figuras**

Figura 1. Broca de cortadores fijos PDC.	20
Figura 2. Vista frontal broca PDC.	21
Figura 3. Boquilla.	22
Figura 4. Mecanismo de corte PDC.	22
Figura 5. Cortador PDC.	23
Figura 6. Tamaño de cortador PDC Vs Tamaño de broca.	23
Figura 7. Rastrillaje (Back Rake).	24
Figura 8. Calibre de broca con cuerpo de acero.	25
Figura 9. Broca de diamante natural.	26
Figura 10. Broca impregnada.pdf	26
Figura 11. Estructura broca triconica.	27
Figura 12. Conos de insertos de carburo de tungsteno y conos con dientes de acero.	29
Figura 13. Offset (Excentricidad) del cono. Adaptado de:	29
Figura 14. Acción de corte broca triconica.	30
Figura 15. Acción de corte de los compactos.	31
Figura 16. Subtipos de formas de compactos	31
Figura 17. Pads de desgaste.	33
Figura 18. Sistema de clasificación IADC Dull Grading.	34
Figura 19. Grado de desgaste del cortador.	34
Figura 20. Perfil de la broca de cortadores fijos.	36
Figura 21. Broca PDC Sharc.	45
Figura 22. Desgaste de un cortador PDC convencional.	46

BROCAS PARA PERFORAR FORMACIONES DURAS Y ABRASIVAS	11
Figura 23. Cortador PDC rotativo.	47
Figura 24. Broca PDC Genesis.	48
Figura 25. Diseño Quantec dependiendo del tipo de aplicación.	49
Figura 26. Interface tabla de diamante-sustrato de carburo de tungsteno.	49
Figura 27. Calibre en el diseño Quantec.	50
Figura 28. Broca PDC Talon con cortadores StaySharp.	51
Figura 29. Cortadores StaySharp Vs cortadores standard.	52
Figura 30. . Broca triconica con TIC Shamal.	53
Figura 31. Broca triconica Vanguard.	53
Figura 32. Sello de cojinete broca Vanguard.	55
Figura 33. Efecto de sobre huellado. A	55
Figura 34. Broca impregnada.	57
Figura 35. Comparación broca de diámetro 18 ½pulgadas. Tecnologías Shamal y Onix 360.	59
Figura 36. Comparación brocas de diámetro 18 ½ pulgadas. Genesis, Triconica y Quantec.	62
Figura 37. Comparación brocas de diámetro 14 ¾ pulgadas. Tecnologías Onyx, Onyx 360 e impregnada.	64
Figura 38. Comparación brocas de diámetro 14 ¾ pulgadas. Tecnologías Genesis, Quantec, Vanguard e Impregnada.	67
Figura 39. Comparación brocas de diámetro 10 5/8 pulgadas. Tecnologías Onyx, Onyx 360, Impregnada y triconica.	69
Figura 40. Comparación broca de diámetro 10 5/8pulgadas. Tecnologías Quantec, Vanguard e Impregnada	72

## BROCAS PARA PERFORAR FORMACIONES DURAS Y ABRASIVAS

	12
Figura 41. Comparación brocas de diámetro 8 ½ pulgadas. Tecnologías Onyx, Onyx 360, impregnada y triconica.	75
Figura 42. Comparación brocas de diámetro 8 ½ pulgadas. Tecnologías Vanguard, Genesis, Quantec, Impregnada y Talon.	78
Figura 43. Comparación brocas de diámetro 6 pulgadas. Tecnologías Onyx, Onyx 360, Triconica e impregnada.	80
Figura 44. Comparación brocas de diámetro 6". Tecnologías Quantec, Talon e Impregnada.	83
Figura 45. Comparación promedios de Footage y ROP.	84
Figura 46. Comparación promedios de Footage y ROP.	85

## Introducción

La perforación de pozos requiere la utilización de herramientas con tecnología de punta que permitan su construcción en el menor tiempo posible, minimizando riesgos y reduciendo costos hasta alcanzar la profundidad de interés. Una de las herramientas más importantes es la broca de perforación, ya que es la encargada de realizar el corte de la roca en el subsuelo, atravesando diferentes formaciones las cuales varían en propiedades y características como dureza y abrasividad, que hacen que las condiciones de perforación sean cada vez más desafiantes. En la industria se ha dado una revolución en el diseño de las brocas dando paso a nuevos materiales y estructuras de corte, permitiendo que cada día la perforación de este tipo de formaciones se haga con mayor eficiencia, rapidez y menores costos.

Las brocas de perforación presentan dos tipos de estructuras de corte, como lo son: conos giratorios y cortadores fijos. En la primera categoría, las brocas están constituidas de uno o más conos giratorios ensamblados en un cuerpo que generalmente es de acero o de materiales de alta resistencia; las estructuras de corte son maquinadas en el mismo material del cono o pueden ser insertos de materiales duros resistentes al desgaste, como carburo de tungsteno, diamante natural o sintético. En la segunda categoría, se tiene brocas de compactos de diamante policristalino (PDC) e impregnadas de diamante natural y sintético que no poseen partes móviles y están constituidas de un cuerpo de acero o matriz de materiales duros y resistentes. En el presente trabajo se hace una recopilación y descripción de los últimos diseños y mejoras en los diferentes tipos de brocas disponibles en la industria para la perforación de formaciones duras y abrasivas, también se realiza un comparativo con datos reales de campo para finalmente determinar el avance que plantean estas brocas respecto a diseños de brocas convencionales.

## **1 Objetivos**

### **1.1.General**

Elaborar un estado del arte de los avances tecnológicos y realizar la caracterización de las brocas diseñadas para perforar formaciones duras y abrasivas.

### **1.2.Específicos**

- Realizar una recopilación de los últimos avances en brocas que se han desarrollado en la industria para optimizar la perforación de formaciones duras y abrasivas.
- Describir las principales características de los diseños de brocas enfocados a formaciones duras y abrasivas.
- Presentar la evolución que han tenido los diseños de estas brocas y la mejora de su rendimiento en comparación con brocas tradicionales.
- Hacer un comparativo del desempeño de los últimos diseños disponibles en la industria.

## 2 Marco Teórico

La perforación de los estratos del subsuelo en busca de hidrocarburos requiere bajar una broca en el comienzo de la sarta de perforación y hacerla girar desde superficie mediante equipos de perforación rotativa, o directamente en el fondo con motores y turbinas emplazados en el fondo del hueco (Besson, A., Burr, B., Dillard, S., Drake, e., Ivie, B., Ivie, C., Smith, R. y Watson, G., 2001): “Uno de los retos que enfrentan las compañías petroleras y los contratistas de perforación a la hora de planear el pozo, es la selección de la mejor broca para una aplicación en particular” (Besson, et al. 2001, p.38). El tiempo necesario para perforar un pozo se encuentra relacionado directamente con la rapidez con la cual las brocas penetran en la formación y con el tiempo que conserven sus propiedades de corte. Los precios de las brocas empleadas en un pozo constituyen solamente del 1% al 5% del costo del proyecto, sin embargo, son pieza clave en la economía de la construcción del pozo. Invertir en la broca indicada reduce de forma significativa el costo total, ya que, disminuye el tiempo de perforación y el número de viajes (Besson, et al. 2001) Estos factores se ven incrementados cuando la broca se enfrenta a formaciones duras y abrasivas, donde las tasas de perforación y la vida útil de esta se ven reducidas significativamente.

### 2.1 Formación

Una formación es definida como una capa de roca depositada en un mismo periodo de tiempo y bajo un el mismo ambiente sedimentario, además se caracteriza por tener propiedades litológicas relativamente constantes que la diferencian de las capas adyacentes.

**2.1.1 Dureza.** Es una propiedad litológica de las formaciones que está ligada a la solidez o cohesión de la roca y de los esfuerzos de comprensión a los que es sometida por lo que esta propiedad aumenta con la profundidad debido a los esfuerzos que imponen las formaciones o capas superiores. Da una referencia de que tan difícil es fracturar o romper una formación (López, 2009).

**2.1.2 Formaciones abrasivas.** Son formaciones litológicas que por su composición tienden a desgastar la superficie de contacto de otro cuerpo más duro durante un rozamiento. Reducen significativamente la vida útil de las brocas al generar un desgaste mayor en los cortadores al momento de ser perforada, todo esto por la fricción que se genera (López, 2009).

## **2.2 Formación mirador**

La formación mirador hace parte de la cuenca de los llanos orientales, es la principal formación productora del piedemonte llanero. Es precedida por la formación carbonera y seguida por la formación Cuervos. La formación Mirador está comprendida por un conjunto de areniscas masivas de grano grueso a fino, compuesta por más del 95% de cuarzo, lo cual hace que sea abrasiva, en menor grado feldespatos y materia orgánica leñosa. La porosidad promedio de esta formación es de 8% además de contar con una alta permeabilidad. Las arenas de mirador tienen altas resistencias de compresión, mayores a los 20000 Psi, convirtiéndola en una formación muy dura de perforar (Smith, Browne, Heinz, Wise, Baker Hughes, 1996).

## **2.3 ROP (Rate of penetration)**

Es la velocidad a la cual la broca penetra en la formación. Normalmente medida en pies por hora y metros por hora. Una formación dura y abrasiva, como una arenisca bien consolidada puede presentar una tasa de penetración muy baja a su vez que desgasta en gran medida la broca (Schumberger, 2017). Esta variable es de gran importancia porque está directamente relacionada

con la eficiencia de la perforación. Una alta ROP indica mejor desempeño del taladro y mayor productividad. (Hedge, Daigle, Millwater, Gray, The University of Texas, at San Antonio, 2017).

Aunque si la ROP supera un valor crítico se producirían una masiva cantidad de recortes de la formación que serían muy difíciles de retirar por acción del lodo, lo que terminaría en una porterir reducción de la ROP. ( Heydarshahy, Karekal, 2017)

#### **2.4 Velocidad De Rotación (RPM)**

Significa la cantidad de vueltas o revoluciones que da la broca en un minuto. En formaciones suaves se puede decir que la velocidad de perforación es directamente proporcional a la velocidad de rotación. En general, es un parámetro que afecta la velocidad de penetración, pero no tanto como el tipo de formación. El valor adecuado para la velocidad de rotación normalmente es encontrado a prueba y error. (Centala et al. 2011).

#### **2.5 WOB (Weighton bit)**

Peso de la sarta que se descarga sobre la broca para ayudar en la perforación. El peso adecuado sobre la broca mantiene a esta sobre la formación de modo que este siempre en posición perpendicular al fondo del pozo. Cualquier variación en el peso sobre la broca puede afectar la tasa de penetración. Es importante mantener el peso correcto sobre la broca para tener la sarta de perforación en tensión y evitar la vibración que puede ocasionar desde daños leves a incluso quebrar la tubería de perforación. Demasiado peso sobre la broca en formaciones duras puede derivar en que se pueden quemar o quebrar los dientes de la broca; y, por otro lado, muy poco peso disminuye la velocidad de penetración (García Gómez, 2016). En general, a mayor WOB, más rápida será la perforación. (Heydarshahy, Karekal, 2017)

## 2.6 Broca

La broca de perforación es la herramienta cortadora de roca localizada en el extremo inferior de la sarta de perforación, el principal objetivo de la broca es cortar o triturar la formación durante el proceso de la perforación rotaria. Su función es perforar los estratos de la roca mediante el vencimiento de su esfuerzo de compresión y de la rotación de la broca. En general las brocas se rigen por dos principios básicos para la trituración de la roca: excediendo la resistencia al corte y la fuerza compresiva (López, 2009).

Para que la broca logre vencer la resistencia al corte de la roca, involucra el uso de un diente o cortador, el cual, al introducirse dentro de la formación y debido a la rotación crea fracturas que permite cortar o romper en pequeños fragmentos la roca haciendo más fácil su remoción; para que la roca falle o se rompa se requiere que la carga que se aplica sobre la roca exceda la fuerza compresiva de ésta. La carga deberá permanecer sobre la superficie de la roca el tiempo necesario para que ocurra la falla, la cual no se presentará si la fuerza compresiva de la roca excede a la carga o si ésta es removida antes de ser transmitida del diente hacia la formación. Lo anterior, es básico para la perforación de rocas duras con grandes pesos sobre la broca y bajas velocidades de rotación (López, 2009).

Es posible clasificar las brocas de perforación rotativa en dos grupos:

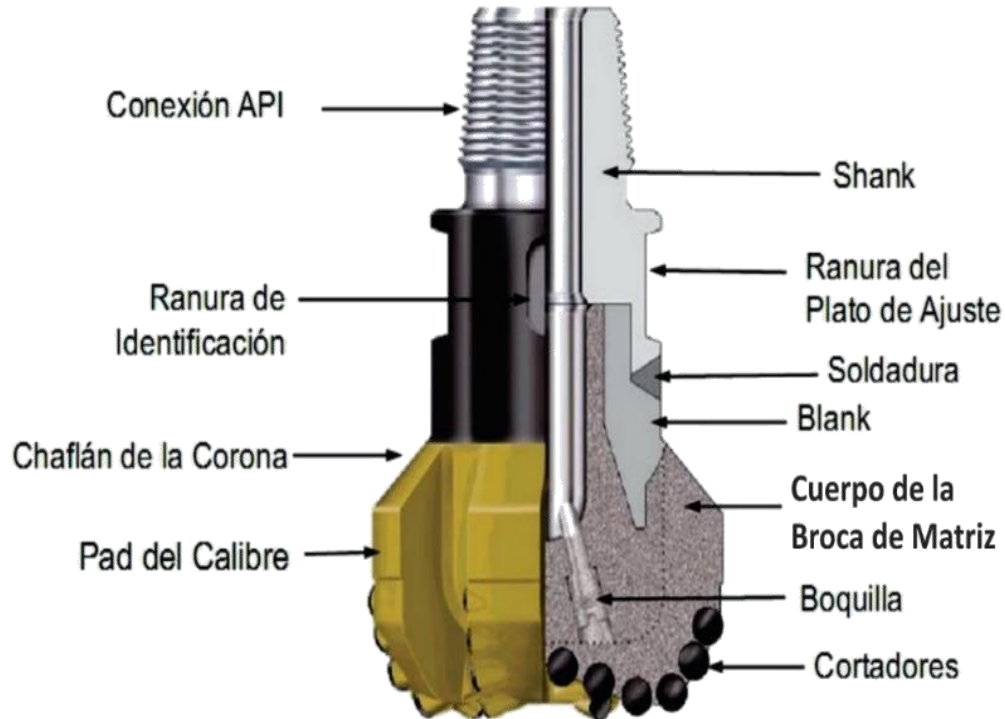
**2.6.1 Brocas de cortadores fijos.** No poseen partes móviles, sino superficies cortantes para desgastar. Se pueden clasificar en dos grupos: de compuesto policristalino de diamante (PDC por sus siglas en inglés) y de diamante, que se a su vez se divide en brocas de diamante natural y diamante impregnado.

**2.6.7.1 Brocas de compuesto policristalino de diamante (PDC.)** Los insertos de PDC pueden montarse en brocas con estructura de acero o en las brocas de matriz de carburo de tungsteno con aleación de metal como aglutinante.

Desde que fue posible para el hombre la elaboración de diamante sintético, la industria del diamante policristalino (PDC) avanzo sustancialmente. Los cortadores PDC han sido ampliamente usados en la perforación de formaciones de todo tipo de dureza. De acuerdo con las estadísticas, actualmente en promedio el 75% de la longitud total de un pozo es perforada con brocas PDC. (Lui, Han, Zou, Zhu, 2016).

En formaciones tanto suaves como duras es común que las brocas con cortadores PDC exhiban una alta velocidad de rotación y mayor eficiencia. Sin embargo, la estabilidad térmica del cortador, la rata de penetración y la vida útil de la broca se ven comprometidas cuando se perforan ambientes muy duros, abrasivos o intercalaciones suave- duras no homogéneas. (Lui, et al., 2016).

El corte de la roca es más eficaz, debido a que, la resistencia a la tensión es normalmente menor que la resistencia a la compresión, por lo que, con las brocas PDC se puede perforar rápido, debido a la acción de corte que ejercen; lo que requiere menos energía que las grandes cargas que ocasionan fallas por compresión en las formaciones. Las brocas de cortadores fijos cuestan más, pero perforan más rápidamente y duran más que las brocas de conos giratorios en algunas formaciones duras y abrasivas (Besson et al. 2001). En la siguiente imagen se muestra la estructura de una broca de cortadores fijos



*Figura 1.* Broca de cortadores fijos PDC. Adaptado de: Baker Hughes, (2008). Fundamentos de Barrenas de perforación. [Figura].

Los principales componentes de una broca de cortadores fijos son:

**Conexión API.** Conexión roscada que une la broca con una caja del mismo diámetro de los drill collars.

**Shank.** Construido de acero de alto porcentaje de aleación tratado térmicamente, contiene la conexión API, ranuras del plato de ajuste y ranuras de identificación. Este elemento se utiliza soldado directamente al cuerpo en brocas con cuerpo de acero y soldado al blank en brocas con cuerpo de matriz (Baker Hughes, 2008).

**Blank.** Estructura de sostén hecha de acero blando y dúctil, funciona como esqueleto de una broca con cuerpo de matriz. La matriz de carburo de tungsteno es colada alrededor del blank y este sirve como unión entre la matriz y el shank (Baker Hughes, 2008).

**Cuerpo de la broca.** Puede ser de acero o de matriz. Para el cuerpo de acero se utiliza acero de alta aleación, lo cual, da resistencia y elasticidad a la broca, para obtener la corona se debe tornearse desde cero un cilindro de acero. Debido a la baja resistencia del acero a la abrasión y a la erosión, es necesario aplicar una película protectora de carburo de tungsteno (hardfacing) en las zonas críticas del cuerpo de la broca para aumentar su vida útil. El cuerpo de las brocas de matriz es construido con polvo de carburo de tungsteno con aleación de metal como aglutinante, el cual, es fundido en un molde de grafito que tiene la forma de la broca, el cuerpo de matriz es muy resistente a la erosión y abrasión (Baker Hughes, 2008).

**Boquillas.** Orificios a través de los cuales el fluido de perforación fluye para limpiar del fondo del pozo los recortes que origina la broca y realizar el enfriamiento de esta. Son una pieza importante en el diseño hidráulico de la broca, ya que, con el simple hecho de modificar su orientación, posición o tamaño se logra mejorar la limpieza en los cortadores y en los canales de flujo, evitando que la broca se embole cuando se perforan formaciones pegajosas como las lutitas, y por lo general mejorando la rata de perforación. En la siguiente figura se muestra la vista frontal de una broca PDC en donde se muestra las boquillas.

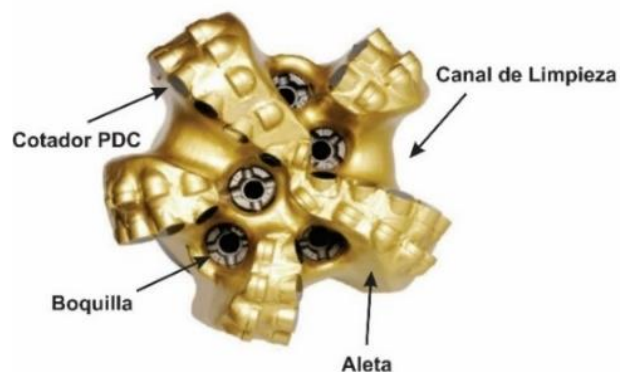


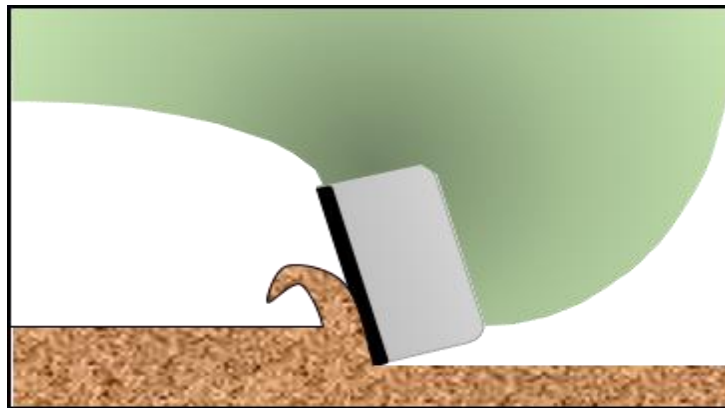
Figura 2. Vista frontal broca PDC. Adaptado de: Baker Hughes, (2008). Fundamentos de Barrenas de perforación.

[Figura].



*Figura 3.*Boquilla. Adaptado de: Smith Bits, (2016). Boquilla. ProductCatalog. [Fotografía]. Recuperado de: [https://www.slb.com/~media/Files/smith/catalogs/bits\\_catalog.pdf](https://www.slb.com/~media/Files/smith/catalogs/bits_catalog.pdf)

**Cortadores.** Es una de las partes más importantes de la broca, ya que, es el elemento que realiza la acción de corte en la roca, por esta razón, gran parte de los esfuerzos por mejorar el rendimiento en la perforación se centra en el mejoramiento de este elemento. Como ya se había mencionado los cortadores PDC perforan la roca al vencer el esfuerzo de tensión como se puede observar en la figura 4.



*Figura 4.*Mecanismo de corte PDC. Adaptado de: Besson, A., Burr, B., Dillard, S., Drake, e., Ivie, B., Ivie, C., Smith, R. yWatson, G. (2001). Corte PDC. Adaptado de Bordes cortantes. [Dibujo]. Recuperado de: [https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield\\_review/spanish00/win00/p36\\_57.pdf](https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/spanish00/win00/p36_57.pdf)

Los cortadores son construidos de compactos de diamante policristalino (PDC) unido a un sustrato de carburo de tungsteno, sometidos a un proceso de alta temperatura y presión que da como resultado el cortador PDC, resistente a la abrasión y al impacto. A la tabla de diamante se le hace un borde biselado que generalmente es de  $45^\circ$  como se muestra en la figura 5 lo cual mejora su vida útil (Baker Hughes, 2008).

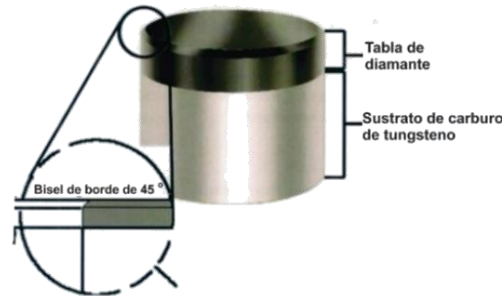


Figura 5. Cortador PDC. Adaptado de: Baker Hughes, (2008). Fundamentos de Barrenas de perforación. [Figura].

El tamaño del cortador depende del tamaño de la broca, pero, por lo general se utilizan cuatro tamaños de cortadores: 8 mm, 13 mm, 16 mm y 19 mm. Si el cortador tiene mayor tamaño, por ejemplo: el cortador de 19 mm producirá cortes más grandes y tendrá una mayor arena utilizable, mientras que, los cortadores de menor tamaño como el de 8 mm produce cortes más pequeños y es utilizado en brocas con diámetros pequeños, por lo general menores de 5” (pulgadas) (Baker Hughes, 2008). Sin embargo, un determinado tamaño de cortador puede ser utilizado en un amplio rango de brocas como se muestra en la siguiente figura.

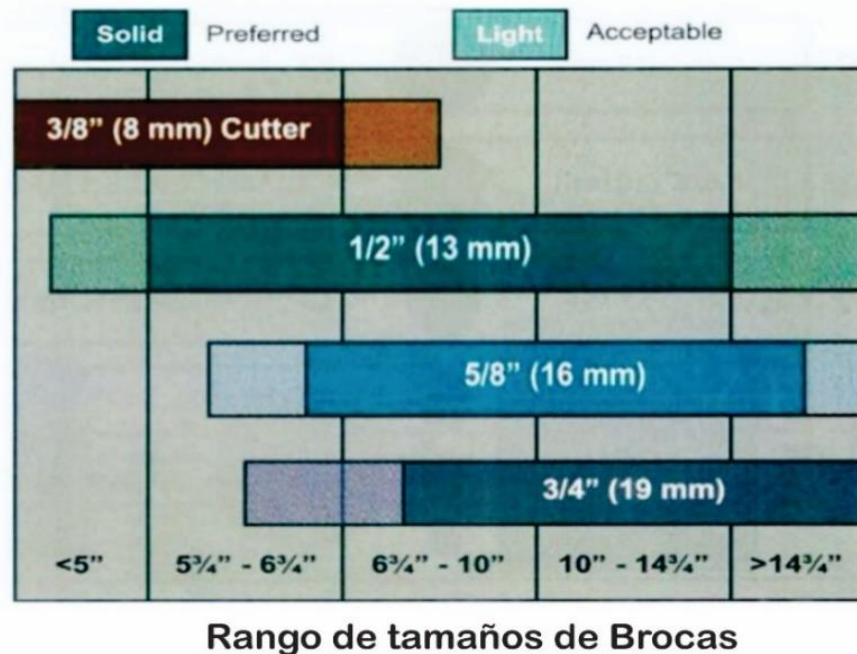


Figura 6. Tamaño de cortador PDC Vs Tamaño de broca. Adaptado de: Baker Hughes, (2008). Fundamentos de Barrenas de perforación. [Figura].

Los cortadores se colocan en la broca con cierta orientación conocida como ángulo de derastrillaje, ángulo de ataque o Back Rake y se define como el ángulo entre la cara de corte y una recta perpendicular a la superficie cortada (Baker Hughes, 2008); como se muestra en la figura 7. Este ángulo de orientación determina la agresividad del cortador, cuando menor sea el rastrillaje más agresivo será el corte, mayor remoción, pero, el desgaste del cortador será mayor. Los cortadores que se ubican en la nariz de la broca tienen un menor rastrillaje; debido a que, necesitan remover mayor volumen de roca.

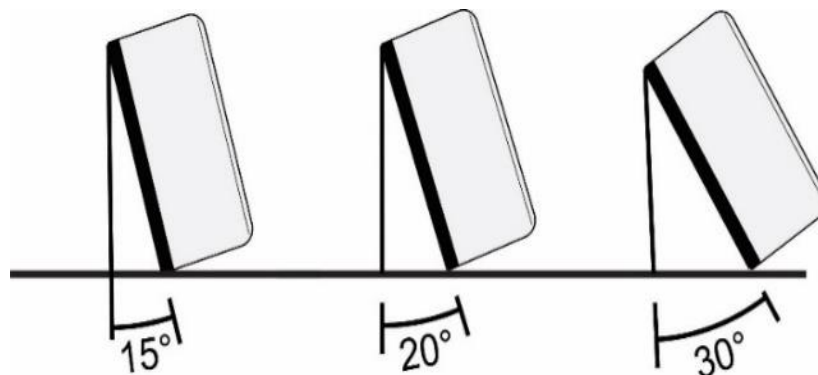


Figura 7. Rastrillaje (Back Rake). Adaptado de: Baker Hughes, (2008). Fundamentos de Barrenas de perforación.

[Figura].

**Pad de calibre.** Permite mantener el calibre de la broca, además de que se considera como la sección estabilizadora de esta. El calibre en brocas de matriz está constituido de diamantes naturales redondeados o cúbicos, placas de carburo de tungsteno o diamante policristalino térmicamente estable (TSP), los cuales, son utilizados cuando se perforan formaciones abrasivas. En las brocas con cuerpo de acero se cuenta con calibre estándar y de categoría superior, el primero se constituye de compactos de insertos redondeados de carburo de tungsteno acompañados de cortadores PDC en calibre ubicados en el borde de ataque, y en el segundo se reemplaza los compactos de insertos redondeados de carburo de tungsteno por cortadores PDC (Baker Hughes, 2008); como se muestra en la figura 8.



Figura 8. Calibre de broca con cuerpo de acero. Adaptado de: Smith Bits, (2016). ProductCatalog. [Fotografía]. Recuperado de: [https://www.slb.com/~media/Files/smith/catalogs/bits\\_catalog.pdf](https://www.slb.com/~media/Files/smith/catalogs/bits_catalog.pdf)

**2.6.7.2 Broca de diamantes.** Las brocas llamadas impregnadas son usadas típicamente para perforar formaciones muy duras y abrasivas, como areniscas. Las brocas impregnadas comúnmente emplean una cara de corte compuesta de elementos cortantes de alta dureza como lo son los diamantes, ya sean naturales o sintéticos, dispersos dentro de una matriz de un material resistente al desgaste. A medida que la broca va perforando y sufriendo el desgaste los elementos de cortes son perdidos, pero remplazados a medida que se exponen nuevos diamantes por el propio desgaste. Estos diamantes pueden ser parte integral de la matriz de la broca, insertados a través de un proceso de infiltración a baja presión, o pueden ser agregados a la broca de forma separada a la fabricación de esta, por procesos como el brazing (Estados Unidos Patente No. 6510906, 2003).

Las brocas impregnadas convencionales generalmente presentan una pobre hidráulica, dado su diseño, que hace que dispongan de un área de flujo muy mínima para evacuar los recortes. Además, las brocas impregnadas no perforan de forma efectiva cuando esta encuentra formaciones suaves y menos abrasivas como arcillas. Perforar shales con brocas impregnadas generalmente termina en que la broca se cubra de arcilla o se embole y su perforación sea ineficiente. Formaciones como los shales tienden a limitar en gran medida el flujo del lodo de perforación a medida que se perfora, generando un incremento en la temperatura de la broca, lo cual hace que el desgaste de la broca, especialmente en impregnadas, sea prematuro (Baker Hughes, 2014).



*Figura 9.* Broca de diamante natural. Adaptado de: Baker Hughes, (1998). Drill bits catalog. [Fotografía].  
Recuperado de: <http://ww.w.chinapdf.com/PDF-samples/product-brochure/bakerhughescatalog.pdf>



*Figura 10.* Broca impregnada. Adaptado de: Besson, A., Burr, B., Dillard, S., Drake, e., Ivie, B., Ivie, C., Smith, R. y Watson, G. (2001). Bordes cortantes. [Dibujo]. Recuperado de:  
[https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield\\_review/spanish00/win00/p36\\_57.pdf](https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/spanish00/win00/p36_57.pdf)

**2.6.8 Broca de conos giratorios.** Poseen conos de metal que giran en forma independiente al mismo tiempo que la broca rota en el fondo del pozo. Cada uno de los conos cuenta con estructuras cortantes que pueden ser dientes de acero resistentes al desgaste o insertos de carburo de tungsteno, que cortan y trituran o penetran y rompen como si fuesen cinceles o palas, dependiendo de la dureza de la formación. (Besson et al. 2001, p.38)

Las brocas con dientes de acero se utilizan en formaciones blandas con baja resistencia a la compresión, así como también en formaciones semiduras o duras con mayor resistencia a la compresión. Las brocas de insertos se utilizan para perforar formaciones que van de blandas y semiduras, a duras semiabrasivas y duras abrasivas. (Besson et al. 2001, p.41)

En la siguiente imagen se muestra la estructura de una broca de conos giratorios:

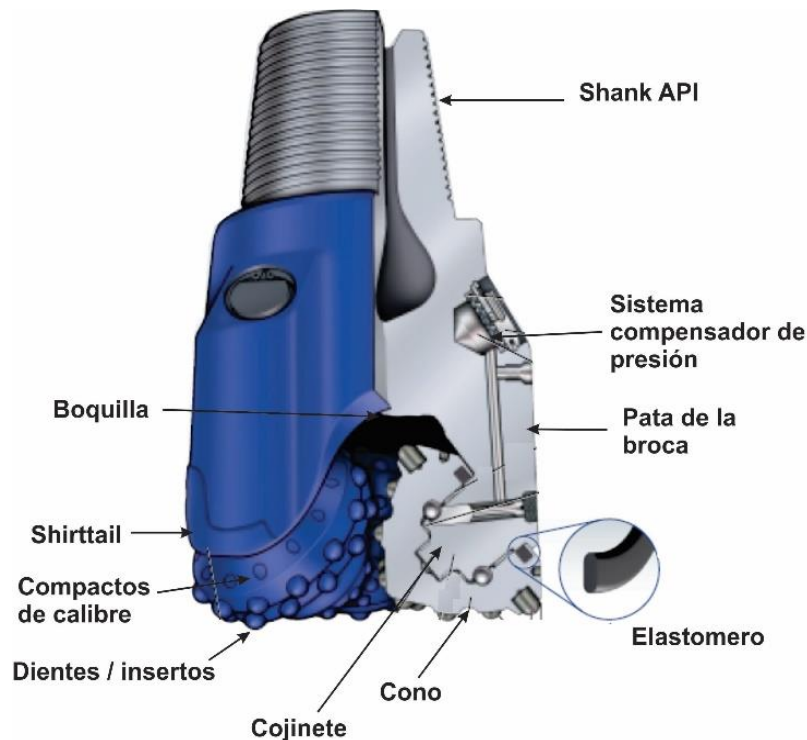


Figura 11. Estructura broca triconica. Adaptado de: Smith Bits, (2016). Estructura broca triconica. ProductCatalog. [Figura]. Recuperado de: [https://www.slb.com/~media/Files/smith/catalogs/bits\\_catalog.pdf](https://www.slb.com/~media/Files/smith/catalogs/bits_catalog.pdf)

Los principales componentes de una broca triconica son:

**Shank API.** Es el elemento de unión entre el cuerpo de la broca y la sarta de tubería.

**Sistema compensador de presión.** Este sistema iguala la presión en el cojinete con la presión del fluido de perforación en fondo de pozo con el fin de evitar un diferencial de presión alto en el sello del cojinete. Se compone de un depósito de grasa, compensador de caucho (elastómero), válvula de alivio, un canal conductor y el sello del cojinete. Básicamente el elastómero permite que la presión del lodo se iguale con la presión de la grasa evitando que el sello del cojinete falle (Baker Hughes, 2008). Este sistema permite mantener lubricadas las superficies del cojinete del cono y el cabezal para reducir la velocidad de desgaste de estos y evitando fallas en los cojinetes.

**Pata de la broca.** Son segmentos maquinados, a partir de piezas forjadas de acero de aleación media con bajo contenido de carbono a las cuales se le hace un tratamiento térmico que permite aumentar su dureza incorporando carbono en la superficie logrando así un núcleo suave y fuerte con una superficie dura permitiendo que la pata soporte alta tensión y fatiga. Las patas forman lo que se conoce como el cuerpo de la broca (Baker Hughes, 2008).

**Cono.** Esta es una de las piezas más críticas de la broca, ya que están sometidas a difíciles condiciones de funcionamiento, en el peor de los casos los conos se pueden desprender de la broca debido a grietas producidas por el recalentamiento o por falla en los sellos, resultando en situaciones de pesca, sidetrack o pérdida del pozo, por esta razón deben ser piezas capaces de resistir altas cargas y desgaste. Las superficies de fricción crítica en el cono están recubiertas con plata, que actúa como un lubricante sólido. Las superficies antifricción se carburan, endurecen y templan para evitar el desgaste y aumentar la resistencia de la superficie (Baker Hughes, 2008).

Existen dos tipos de conos, con dientes de acero y con insertos de carburo de tungsteno. Los conos con dientes de acero se maquinan de piezas de acero en aleación con níquel, molibdeno y cromo. A este tipo de conos se les hace una cobertura mediante carburación y se les aplica carburo de tungsteno en un proceso llamado hardfacing, con el fin de aumentar la resistencia de los dientes y por lo tanto su vida útil. Los conos con insertos de carburo de tungsteno al igual que los conos con dientes de acero se maquinan de piezas forjadas de acero en aleación con níquel, molibdeno y cromo; luego, son sometidos a tratamiento térmico donde son carburados y templados al aceite, con lo cual se logra un núcleo resistente capaz de retener los compactos. (Baker Hughes, 2008).

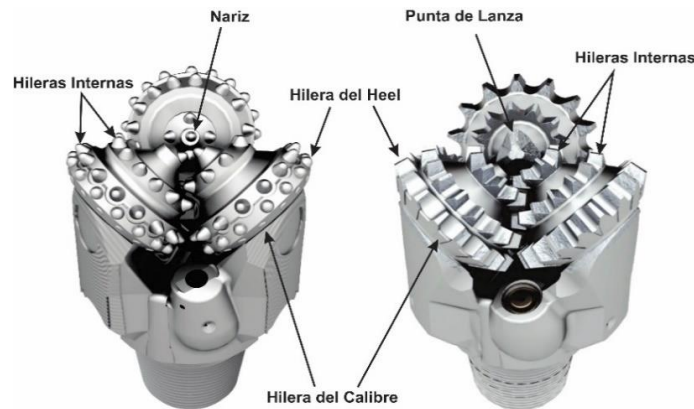


Figura 12. Conos de insertos de carburo de tungsteno y conos con dientes de acero. Adaptado de: Baker Hughes, (2008). Fundamentos de Barrenas de perforación. [Figura].

La orientación y posición del cono también es importante en el rendimiento de la broca. La excentricidad también conocida como offset es uno de los parámetros a tener en consideración en el diseño de la broca ya que este determina el tipo de acción de corte que esta tiene. El offset es la distancia horizontal que hay entre el eje geométrico de la broca y un plano vertical que contiene el eje geométrico del cono, figura 13. Cuando el eje geométrico del cono coincide con el eje geométrico de la broca se dice que tiene un offset de cero lo cual le da a la broca una acción de corte de trituración, que se utiliza cuando se desea perforar formaciones duras, mientras que para formaciones blandas se utiliza un offset mayor que hace que la acción de corte sea por arrastre (Baker Hughes, 2008).

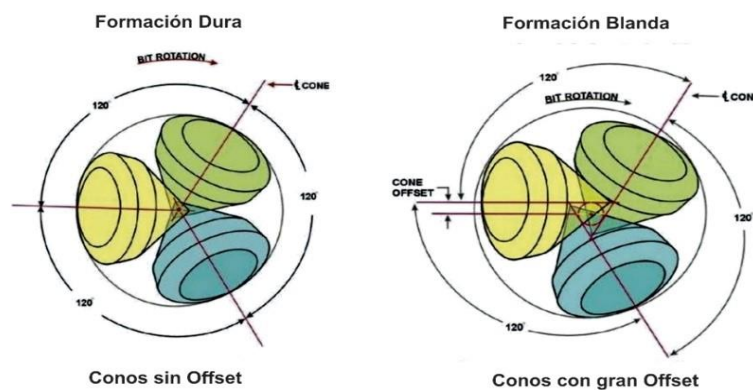
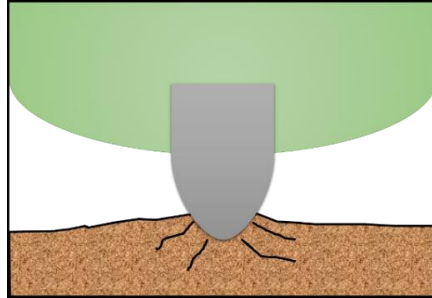


Figura 13. Offset (Excentricidad) del cono. Adaptado de: Baker Hughes, (2008). Fundamentos de Barrenas de perforación. [Figura].

**Dientes / Insertos.** Las brocas triconicas, ya sean con dientes de acero o con insertos de carburo de tungsteno, realizan el corte de la roca venciendo el esfuerzo a la compresión como se muestra en la figura 14:



*Figura 14.* Acción de corte broca triconica. Adaptado de: Besson, A., Burr, B., Dillard, S., Drake, e., Ivie, B., Ivie, C., Smith, R. y Watson, G. (2001). Bordes cortantes. [Dibujo]. Recuperado de: [https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield\\_review/spanish00/win00/p36\\_57.pdf](https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/spanish00/win00/p36_57.pdf)

Los dientes de acero son una parte fundamental de la broca por esta razón se dedica un gran esfuerzo en el diseño y elaboración de estos. Como ya se había mencionado los dientes se maquinan en forma de cuña en el acero del cono básico, luego, se le hace un proceso de hardfacing con el fin de aumentar su resistencia y vida útil. En el diseño de los dientes es de vital importancia lograr el correcto espaciamiento entre estos, en función del tipo de formación que se desea perforar, las brocas que son utilizadas para perforar formaciones medianas y duras necesitan mayor cantidad de dientes con mayor WOB, mientras que si se desea perforar una formación blanda se necesita que un buen espaciamiento entre dientes con el fin de generar recortes más grandes, ayudar a removerlos y por lo tanto obtener una mayor ROP (Baker Hughes, 2008).

Los insertos de carburo de tungsteno son colocados a presión en los orificios que fueron perforados en el cono. Los insertos están conformados de una matriz de granos de carburo de tungsteno y cobalto que es utilizado como aglutinante. El tamaño de los insertos depende del tamaño de la broca. Existen tres tipos de formas de compactos, cincel, cónico y ovoide, que se pueden utilizar dependiendo de la resistencia de la formación que se va a perforar. La forma tipo

cincel combinada con un offset considerable es utilizada para formaciones blandas donde produce una acción de corte mezclada con trituración. La forma cónica en combinación con un menor offset de la broca se utiliza para perforar formaciones medianas, mientras que para formaciones duras se utiliza la forma de ovoide que realiza una acción de trituración debido a las altas cargas que necesitan para perforar este tipo de formación (Baker Hughes, 2008).



Figura 15. Acción de corte de los compactos. Adaptado de: Baker Hughes, (2008). Fundamentos de Barrenas de perforación. [Figura].

Se desarrollaron unos subtipos de las formas básicas para mejorar el rendimiento de la perforación en diversas formaciones como se muestra en la siguiente figura:

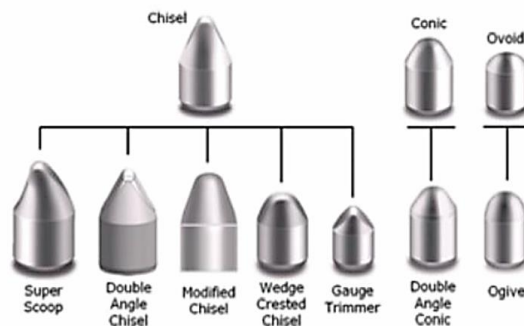


Figura 16. Subtipos de formas de compactos. Adaptado de: Baker Hughes, (2008). Fundamentos de Barrenas de perforación. [Figura].

**Cojinetes.** El peso necesario para perforar que se aplica sobre la broca se transmite por el cojinete hacia el cono y los dientes o insertos. Existe básicamente dos tipos: cojinetes a fricción conocidos también como Journal y cojinetes a rodillos. El cojinete journal es un perno sólido unido a la superficie interna del cono, tolera pesos elevados y es relativamente eficiente con respecto al

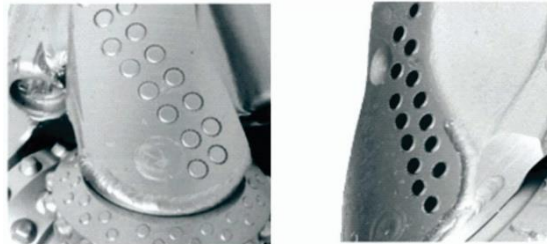
espacio, las superficies del cojinete que están en contacto con el cono se carburan para darle mayor resistencia al desgaste, de la misma manera que el cojinete del cono se carbura y se recubre con plata para reducir la fricción. Los cojinetes a rodillos cuentan con una o más hileras de rodillos, tienen la ventaja de que soportan altas RPM pero tienen la desventaja de que requieren más espacio que los cojinetes Journal por lo que solo se utilizan en brocas de mayor tamaño (mayores de 12 1/4") (Baker Hughes, 2008).

**Sellos.** El sello es el elemento que evita que el lubricante salga del cojinete y que el lodo de perforación entre a este. Existen dos tipos: sellos de elastómeros y sellos metálico. Los sellos de elastómero o sellos O-ring consiste de un elastómero colocado a presión entre el cabezal y el cono. Las propiedades del elastómero deben ser tales que soporten las altas temperaturas, los químicos y el desgaste. Los sellos metálicos son más resistentes a las altas temperaturas, los químicos y además, resisten altas RPM durante más tiempo debido a que el sello metálico tiene superficies de baja fricción que lo hacen más resistente al desgaste. Para este tipo de sello se tiene dos variaciones: para cojinete Journal, que consta de sello del cabezal, sello del cono, anillo de back-up y energizador del cabezal. Y para cojinete a rodillos que a diferencia del anterior utiliza un inserto de sello del cono, sello del cabezal, anillo de back-up y energizador del cabezal (Baker Hughes, 2008).

**Compactos de calibre.** La función de la hilera del calibre es proteger el calibre de la broca para evitar que el sello del cojinete sufra daños por desgaste severo del calibre. Además de compartir la carga y el desgaste con la hilera del heel. Permiten que la broca perfora el pozo con un buen calibre (Baker Hughes, 2008).

Normalmente se utilizan insertos de carburo de tungsteno, pero en formaciones abrasivas el desgaste es considerable por lo que se utilizan insertos de PDC en la hilera del calibre. En formaciones abrasivas la hilera del heel debe ser protegida, por lo que se utiliza compactos del heel con diamante (DH) o gauge trimmers con diamante (DT) los cuales permiten alargar la vida útil de la broca (Baker Hughes, 2008).

Para proteger la pata de la broca se aplica material duro, obteniéndose una mejor protección utilizando compactos de carburo de tungsteno o de diamante en el Shirttail, además de pads de desgaste que también funcionan como pads estabilizadores, que de igual manera pueden ser de carburo de tungsteno o en aplicaciones abrasivas compactos de diamante, como se muestra en la figura:



*Figura 17.* Pads de desgaste. Adaptado de: Baker Hughes, (2013). Drill bits catalog. [Fotografía]. Recuperado de: [https://assets.www.bakerhughes.com/system/v1/3221bfb4c03d399066ebcf6190e835aa/37471.DrillBits\\_Catalog\\_HiRes.pdf](https://assets.www.bakerhughes.com/system/v1/3221bfb4c03d399066ebcf6190e835aa/37471.DrillBits_Catalog_HiRes.pdf)

## 2.7 DullGrading

Es una clasificación estándar para evaluar la condición de la broca de perforación luego de ser corrida, donde se describe a través de códigos y números su estado y motivo de salida de la broca. Permite al personal entender mejor como fue su rendimiento (Baker Hughes, 2005).

En la evaluación de una broca hay leves diferencias si es una broca con partes móviles o triconica de una de cortadores fijos como una PDC; pero no hay diferencias entre una PDC, una broca de corazonamiento o una impregnada (Baker Hughes, 2005).

**2.7.1 Estructura básica.**

Estructura de corte				B	G	Observaciones	
Cortadores Internos	Cortadores Externos	Características De daño	Ubicación	Sello del cojinete	Calibre	Otras características de daño	Razón de salida

Figura 18. Sistema de clasificación IADC DullGrading. Adaptado de: Baker Hughes, (2005)IADC dull grading system for fixed cutter bits. [Figura].

**Cortadores internos:** Representa el estado de los cortadores de la zona interna. En una broca triconica se entiende como los cortadores que no están en contacto con la cara del pozo, y en una con cortadores fijos como los que están dentro de 2/3 del radio del área. Se califica con 0 cuando el cortador está intacto y 8 cuando está totalmente desgastado. La forma correcta es asignar un valor a cada cortador de esta zona y luego hallar el promedio al dividirlo por el números de cortadores internos evaluados (Baker Hughes, 2005).

**Cortadores externos:** Representa el estado de los cortadores del área externa. En una broca triconica son los cortadores que están en contacto con la cara del pozo; en una PDC son los cortadores que se encuentran en el área externa, comprendida como 1/3 del área total, como se muestra en la figura 19. Igualmente se califican de 0 a 8, donde 0 significa que están intactos y 8 un desgaste total (Baker Hughes, 2005).

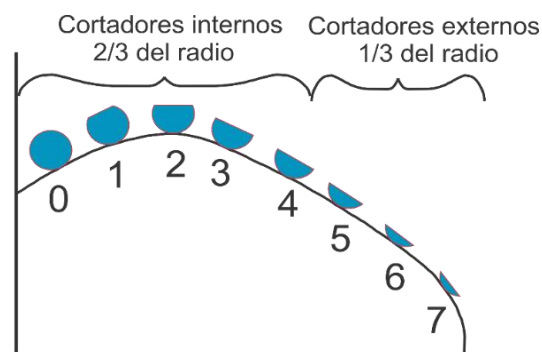


Figura 19. Grado de desgaste del cortador. Adaptado de: Halliburton, (2009). IADC DullGrading. [Figura].

Recuperado de: [http://www.halliburton.com/public/sdbs/sdbs\\_contents/Data\\_Sheets/H03086.pdf](http://www.halliburton.com/public/sdbs/sdbs_contents/Data_Sheets/H03086.pdf)

**Características de daño:** corresponde a la tercera y séptima casilla. En estas se registra a través del uso de siglas los principales cambios físicos de la broca luego de ser corrida, donde la casilla número 3 representa el daño más significativo. En la siguiente tabla se muestran los códigos para la clasificación (Baker Hughes, 2005).

*Tabla 1.*  
*Características de daño de la broca*

<b>BC</b> Cono roto	<b>LT</b> Diente perdido
<b>BF</b> Bond Failure	<b>NO</b> No major/ Other dull characteristics
<b>BT</b> Diente roto	<b>NR</b> NotRerunnable
<b>BU</b> Balled up	<b>OC</b> Off-Center Wear
<b>CC</b> CrackedCone	<b>PB</b> Pinched Bit
<b>CD</b> ConeDragged	<b>PN</b> PluggedNozzle
<b>CI</b> Interferencia de conos	<b>RG</b> Rounded Gauge
<b>CR</b> Cored	<b>RO</b> Ring Out
<b>CT</b> ChippedTeeth	<b>RR</b> Rerunnable
<b>ER</b> Erosion	<b>SD</b> ShirttailDamage
<b>FC</b> Flat CrestedWear	<b>SS</b> SelfSharpeningWear
<b>HC</b> HeatChecking	<b>TR</b> Tracking
<b>JD</b> JunkDamage	<b>WO</b> WashedOut Bit
<b>LC</b> Cono perdido	<b>WT</b> WornTeeth/Cutters
<b>LN</b> Boquilla perdida	

*Nota:* Adaptado de Baker Hughes, (2005), *IADC dull grading system for fixed cutter bits*. USA.

**Ubicación:** Esta se utiliza para señalar donde está ubicado el daño principal o el correspondiente a la casilla número 3. En brocas triconicas además de ubicar el daño como se muestra en la siguiente figura, se localiza el cono afectado, siendo el cono número 1, el que tenga el cortador más central, y prosiguiendo en sentido horario su numeración(Baker Hughes, 2005).

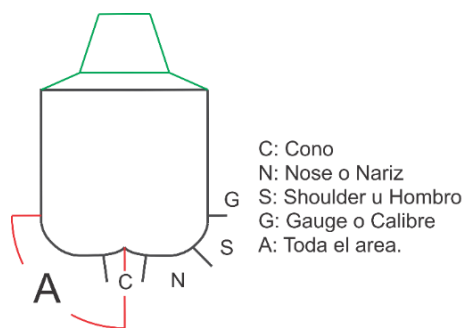


Figura 20. Perfil de la broca de cortadores fijos. Adaptado de: Baker Hughes, (2005).IADC dull grading system for fixed cutter bits. [Figura].

**Sello del cojinete (B):** Solo aplica para brocas triconicas, si es PDC se marca una X. Dependiendo del desgaste e integridad del sello en la broca triconica se marca en la casilla de la siguiente forma (Baker Hughes, 2005).

Tabla2.

Característica dl daño de los sellos.

Letra	Descripción
<b>E</b>	Sellos en buen estado
<b>F</b>	Sellos que han fallado
<b>N</b>	No es posible calificar
<b>X</b>	Broca con cortadores fijos

Nota: Adaptado de Baker Hughes, (2005), IADC dull grading system for fixed cutter bits. USA.

**Calibre (G):** En esta casilla se califica como es el estado del calibre o diámetro de la broca luego de ser corrida. Se utiliza la siguiente nomenclatura (Baker Hughes, 2005).

*Tabla3.*  
*Condición del calibre.*

<b>Código</b>	<b>Descripción</b>
I	En calibre
1/16	Por debajo del calibre por 1/16''
2/16	Por debajo del calibre entre 1/16'' y 1/8''
3/16	Por debajo del calibre entre 1/8'' y 3/16''
4/16	Por debajo del calibre entre 3/16'' y 1/4''

*Nota:* Adaptado de Baker Hughes, (2005), *IADC dull grading system for fixed cutter bits*. USA.

**Razón de salida:** Es la última casilla de la clasificación, explica por qué causa fue terminada la corrida de la broca. La siguiente tabla muestra el código para cada razón de salida. (Baker Hughes, 2005).

*Tabla4.*  
*Razón de salida de la broca.*

<b>BHA</b>	Cambio de BHA	<b>FM</b>	<b>Cambio de formación</b>
<b>DMF</b>	Falla del motor de fondo	<b>HP</b>	Problemas de hueco
<b>DSF</b>	Falla de la sarta de perforación	<b>HR</b>	Horas
<b>DST</b>	Prueba de Drill Stem	<b>PP</b>	Presión de la bomba
<b>DTF</b>	Falla de una herramienta de fondo	<b>PR</b>	Rata de penetración
<b>LOG</b>	Corrida de registros	<b>TD</b>	Profundidad total o CSG Point
<b>RIG</b>	Reparación del taladro	<b>TQ</b>	Torque
<b>CM</b>	Condición del lodo	<b>TW</b>	Ruptura de la sarta por fatiga o torque
<b>CP</b>	Punto de corazonamiento	<b>WC</b>	Condiciones climáticas
<b>DP</b>	Drill plug	<b>WO</b>	Washoutdrillstring

*Nota:* Adaptado de Baker Hughes, (2005), *IADC dull grading system for fixed cutter bits*. USA.

### 3 Desarrollo De Las Brocas De Perforación

#### 3.1 Broca conos giratorios.

Con el inicio de la perforación de pozos petroleros alrededor de 1859 y el rápido desarrollo de la industria debido a la creciente demanda de petróleo que se dio gracias a las propiedades que este tenía como lubricante y combustible se vio la necesidad de buscar nuevos recursos petrolíferos, y con ello la perforación de pozos cada vez más profundos que requerían herramientas que permitieran perforar formaciones duras. Los primeros pozos fueron perforados mediante percusión con barras de acero pesadas levantadas mediante cable, luego estas se dejaban caer en el pozo para triturar la roca. Esta técnica solo permitía llegar a una poca profundidad y de manera muy lenta. Con el descubrimiento de la perforación rotaria las primeras brocas eran hechas de acero, con forma de aleta plana dividida en dos: “conocidas como barrenas tipo cola de pescado debido a sus formas características” (Besson, et al. 2001, p. 38). Estas brocas servían para perforar formaciones blandas y su vida útil no era muy larga, debido a la baja resistencia del acero con que se fabricaban. Luego, las brocas de perforación evolucionaron en lo que se conoce como la primera broca de conos giratorios, que estaba provista por dos conos con dientes en forma de cincel que se extendían de forma longitudinal, con el fin de triturar la roca a medida que la broca giraba (Estados Unidos Patent No. 930759, 1909). Los conos son montados en unos pernos de metal del grosor suficiente para evitar que se doblen o se rompan; además estos son los encargados de transmitir la carga necesaria para que las estructuras de corte trituren la roca. Este nuevo diseño permitió que los pozos fueran un poco más profundos, fue patentada por Howard R Hughes en 1909. Pocos años después se desarrolló la broca con tres conos giratorios que hasta hoy se utiliza bajo los mismos conceptos de diseño.

Aunque la implementación de la broca con conos giratorios permitió reducir los tiempos empleados en la perforación y aumentar la longitud perforada en formaciones duras, el desgaste en las brocas seguía siendo crítico por lo que en los siguientes años se dieron mejoras que permitirían aumentar su vida útil y la eficiencia de corte.

“A principios de la década de 1930, se desarrollaron brocas con suficiente espacio entre los conos” (Besson, et al. 2001, p. 40), lo que permitió que tuvieran una mejor limpieza de los recortes que producía, además de que con este espaciamiento los conos podían tener dientes más largos. También, se empezó a dar mejoras en los materiales de fabricación empleando acero tratado térmicamente, dándole mayor resistencia a la hora de perforar formaciones duras (Besson, et al. 2001, p. 41).

Con el aumento de la profundidad se incrementó las presiones y temperaturas, el peso de la sarta de tuberías se hizo mayor y por lo tanto, la carga sobre los cojinetes (Estados Unidos Patent No. 4738322, 1988). La alta fricción provocaba que los cojinetes tuvieran un desgaste prematuro, resultando en corridas muy cortas por lo que “(...) a mediados de la década de 1930, se desarrollaron los cojinetes de rodillos antifricción” (Besson, et al. 2001, p. 41), que están conformados por un conjunto de rodillos y un conjunto de esferas dispuestas en pistas de apareamiento en el cono y el cojinete, estos dos conjuntos absorben el peso de la carga, además sirven para mantener el cono anclado al cojinete (Estados Unidos Patent No. 3235316, 1966). Estas nuevas características le permitieron tener a la broca una mayor vida útil perforando cada vez más.

Se siguió dando mejoras en los materiales empleados en las brocas para hacer cada una de las partes con mayor resistencia. En cuanto a las estructuras de corte, los dientes de acero que eran maquinados en el mismo material del cono alrededor de 1928 se empezaron hacer con un

recubrimiento de carburo de tungsteno (International Association of Drilling Contractors (IADC), 2015), para evitar el gran desgaste en formaciones duras y abrasivas: “el recubrimiento es aplicado con soldadura de oxiacetileno. Un tubo de acero hueco que contiene granos de carburo se mantiene en una llama hasta que la varilla de acero se derrita y se adhiere a la superficie” (William, 2016, p. 201). Más tarde en 1951 se empezaron a usar insertos de carburo de tungsteno (International Association of Drilling Contractors (IADC), 2015), que son colocados a presión en el cono y están conformados por un polvo de carburo de tungsteno y cobalto. El desarrollo de estos insertos fue de gran ayuda para la perforación de rocas duras ya que su principal característica es la alta resistencia al desgaste y dureza (Estados Unidos Patent No. 5158148, 1992).

En la década de 1960, se dio otro gran avance para mantener la integridad y vida útil de los cojinetes implementando un sello para inhibir la entrada de los fluidos del pozo y el material de corte producido durante la perforación, además de mantener la grasa o el material lubricante dentro del cojinete lejos de cualquier contaminación (Estados Unidos Patent No. 2271794, 1994). Como lo muestra la patente (Estados Unidos Patente n° 3075781, 1963), el sello está diseñado en forma de anillo de un material flexible e impermeable que hace sello entre el cojinete y cono. Más tarde, a fines de la década de 1960 y principios de la década de 1970 se introdujeron sellos O-rings los cuales están comprimidos más del 15% lo que hace que el sistema de sellado sea más efectivo. Este tipo de sellos fue utilizado en cojinetes de fricción los cuales no utilizan rodamientos (Besson, et al. 2001).

En 1987, Baker Hughes Christensen Company mejoró las estructuras de sellado con un sello bimetal. En comparación con los sellos de goma convencionales, se observó un aumento notable tanto en la velocidad de rotación como en la vida útil debido a la mayor resistencia que tiene el metal al desgaste y las altas temperaturas producidas por la fricción. En 1998, Baker Hughes lanzó

un sello metálico energizado con anillo de goma y en 2003 mejoró este sistema logrando un aumento del 47% y del 38% en revoluciones de trabajo con respecto a los sistemas de sellado convencionales y el sello metálico energizado respectivamente (Yi, et al., 2014).

Hasta aquí, se ha llevado a cabo una serie de mejoras, con implementación de nuevas partes que les permiten a las brocas de conos giratorios perforar durante más tiempo y de una forma más efectiva en ambientes cada vez más profundos. En los años posteriores y hasta la actualidad, los esfuerzos se centran en mejorar cada una de las partes de estas brocas con nuevos materiales y diseños más efectivos para tener una mayor resistencia y, por lo tanto, vida útil en aplicaciones específicas como la perforación de formaciones de alta dureza y abrasividad. La dificultad que presentan perforar este tipo de formaciones ha llevado a que se desarrollen diseños mejorados como los que presentan las brocas triconicas Shamal y Vanguard que son descritas más adelante.

### **3.2 Broca con cortadores PDC**

Desde la invención del cortador con diamante policristalino PDC por General Electric en 1971, esta ha impactado en casi todas las industrias relacionadas con uso de materiales duros, especialmente en la industria petrolera, donde ha cambiado el panorama de la perforación de pozos. Al comienzo las brocas con cortadores PDC progresaron muy lentamente, opacadas debido a que por el mismo tiempo se estaba desarrollando y probando de forma efectiva la broca triconica con insertos de carburo de tungsteno (Scott, 2016).

Con el descubrimiento de grandes campos en el Golfo de México, Países del golfo pérsico, Norte de África, entre otros lugares, se necesitó de implementar brocas que pudieran lidiar con las difíciles condiciones de perforación de estos campos, donde las brocas triconicas no estaban dando el rendimiento esperado, fue acá cuando se empezó a tener en cuenta de forma más seria disponer

de brocas con cortadores PDC. En 1973 GE llevo a cabo las primeras pruebas experimentales de la broca PDC en colaboración con Exxon, al comienzo el diseño de estas hacía difícil la limpieza del hueco, además que los cortadores fallaban en la unión con el cuerpo de la broca, viendo estos problemas GE optó por mejorar la hidráulica lo cual fue conseguido; se reportaron perforaciones con alto ROP en intercalaciones de arenas y arcillas, pero, presentando un comportamiento errático en su trayectoria. La siguiente optimización de su diseño se realizó en abril de 1974, donde se cambió el perfil de corte por uno mejorado que podría enfrentar de mejor forma las formaciones duras, aunque este diseño presentaba pérdidas de las boquillas, las cuales luego dañaban la broca PDC en la perforación (Scott, 2016).

Los años 1977 a 1979 las brocas PDC reportaron sus primeros éxitos significativos, aunque su adopción fue lenta, en ese tiempo se presentaba una caída en el número de taladros a nivel mundial, presentando valores de 20 años atrás. A comienzo de los años 1980, la industria de brocas presentó innovaciones, tanto técnicas como nuevas propuestas comerciales, aparecieron los cortadores PDC con borde biselado, se implementó la reparación de brocas PDC, lo que dio paso a la posibilidad de no solo vender las brocas, sino también alquilarlas. Compañías operadoras de gran tamaño optaban por desarrollar sus propias brocas con ayuda de vendedores de estas tratando de entender cuál era la mejor vía para aplicar esta nueva tecnología. Este fue un periodo de gran innovación y aprendizaje respecto a las brocas PDC (Scott, 2016).

Para diciembre de 1981, el número de taladros activos se disparó, alcanzando cifras récord a nivel mundial con 6227 taladros, estando 4520 de estos en Los Estados Unidos. Este gran número de clientes activos hizo crecer el mercado de brocas rápidamente, siendo espacio para demostrar las nuevas tecnologías e innovaciones de la época. La mala noticia para las brocas PDC era que

pocas formaciones eran aptas para estas debido a las limitaciones tecnológicas que aún tenían, lo cual permitió a las brocas triconicas seguir siendo las dominantes en el mercado (Scott, 2016).

En los años próximos el precio internacional del barril de petróleo cayó a valores que redujeron la demanda de brocas, sin embargo, las brocas PDC siguieron teniendo pequeños avances constantemente, llegando a representar el 5% de la longitud perforada promedio de un pozo a nivel mundial para el año 1990 (Scott, 2016).

El mercado de brocas tuvo valores mínimos entre 1992 y 1999, donde varias compañías enfocadas a la producción de brocas quebraron, pero la pequeña porción de brocas que sobrevivieron se consolidó de forma financiera y con los recursos técnicos necesarios para seguir en el desarrollo de los cortadores PDC. En este periodo se mejoró las propiedades del PDC, además que su sustrato se perfeccionó para poder ser más adaptable a las nuevas brocas con cuerpo de carburo de tungsteno, las cuales con el tiempo se volvieron las más apetecidas para el mercado de la época (Scott, 2016).

Las nuevas brocas PDC eran más estables además que sus cortadores soportaban mejor altos pesos sin quebrarse, lo cual permitió un gran avance en el mercado de brocas PDC para pasar del 5% al 9% de toda la longitud perforada a nivel mundial para el año 1992 (Scott, 2016).

En los próximos años se introdujo el diseño asistido por computadora para la elaboración de brocas PDC. El principal logro de esta iniciativa fue la corrección del diseño que hacía a las brocas PDC altamente erráticas en su trayectoria de perforación, lo cual permitió a la industria enfocarse de lleno al diseño de cortadores PDC, donde se llegó a la creación de interfaces no lineales entre la tabla de diamante y el sustrato de carburo de tungsteno, haciendo cortadores mucho más resistentes (Scott, 2016).

Los nuevos avances tanto de estabilidad de la broca como resistencia de los cortadores hicieron posible que para 1995, las brocas PDC ya controlaran el 15% de la longitud perforada total a nivel mundial. Desde el año 2000, las brocas PDC crecieron rápidamente, donde los avances permitieron usar este tipo de brocas donde antes se pensaban como no viables. Estas brocas tomaron el rol para perforar intervalos de alta dureza con intercalaciones de arcillas, fueron estas características las que le permitieron a las brocas PDC aportar el 24% de la longitud total perforada a nivel mundial para finales del 2000 (Scott, 2016).

A medida que la industria ha avanzado ha permitido que las brocas con cortadores PDC demuestren sus bondades, permitiéndoles a estas últimas controlar el 60% de la longitud perforada a nivel mundial para el año 2004 y actualmente este porcentaje se eleva hasta el 90% (Scott, 2016).

Ahora la industria está enfocada en la optimización de los cortadores, desde cómo hacerlos más resistentes al desgaste, a la temperatura y a la abrasión hasta opciones más innovadoras como cortadores PDC giratorios, los cuales controlan de mejor manera el desgaste causado por altas temperaturas. Este cortador gira por la interacción propia con la roca y permite mantener un borde filoso por más tiempo. Además, nuevas propuestas como cortadores pulidas que evacuan mejor los recortes de la perforación y son más resistentes a la erosión (Scott, 2016; Baker, 2014; Estados Unidos Patent No US20140124270A1, 2014).

Se puede decir que las brocas con cortadores PDC han tenido un inicio lento, pero poco a poco han demostrado ser las brocas predilectas para afrontar los retos actuales de perforación, con amplios enfoques para optimizar y mejorar, pero siendo hoy en día las brocas que dominan el 90% de la longitud perforada a nivel mundial (Scott, 2016).

## 4 Descripción De Las Principales Tecnologías

### 4.1 Sharc

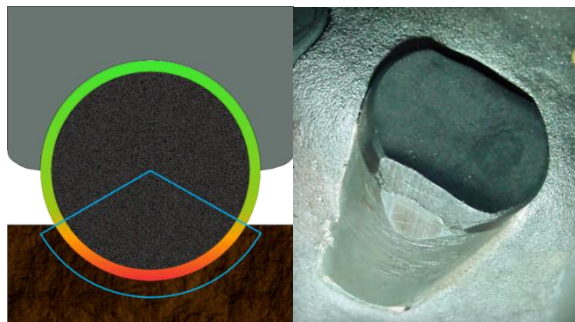
La broca Sharc PDC es diseñada específicamente para la perforación de formaciones duras y abrasivas obteniendo ROP altas y máxima durabilidad de la broca. Cuenta con una estructura de corte que presenta dos filas de cortadores (cortadores de back up) colocadas en ciertas aletas, cada fila refuerza la otra para aumentar la durabilidad sobre las áreas críticas de la nariz y el hombro de la broca. Además, las filas dobles de cortadores están orientadas para asegurar que la limpieza hidráulica y la eficiencia de refrigeración se mantengan. Los cortadores que utiliza la broca Sharc son resistentes al desgaste, especialmente diseñados para perforar formaciones abrasivas, están diseñados para un alto nivel de estabilidad con los mejores materiales y una interfaz mejorada. Esta broca puede utilizar dos tipos de cortadores, los Onyx convencionales y Onyx 360 que son cortadores PDC rotativos (Smith Bits, 2010).



*Figura 21.* Broca PDC Sharc. Aadaptado de:Smith Bits, (2016). ProductCatalog. [Figura]. Recuperado de:  
[https://www.slb.com/~media/Files/smith/catalogs/bits\\_catalog.pdf](https://www.slb.com/~media/Files/smith/catalogs/bits_catalog.pdf)

**4.1.1 Cortadores Onyx 360.** La broca equipada con cortadores giratorios tiene la ventaja de incrementar significativamente su durabilidad. Estos cortadores giratorios se posicionan estratégicamente en las áreas que más desgaste sufren en la broca (no todos los cortadores en esta broca son giratorios). La capacidad rotativa del cortador permite que este mantenga su capacidad de corte por más tiempo, ya que reparte el desgaste sufrido en toda su circunferencia, extendiendo su tiempo de vida más que los cortadores fijos de más alta categoría (Estados Unidos Patente No 2014012427, 2014)

Los cortadores PDC convencionales formados por el sustrato de carburo y la tabla de diamante que está formada por cristales de diamante y cobalto como catalizador metálico para unir los cristales a veces no pueden sostener una tasa de desgaste suficientemente baja a las temperaturas de corte generalmente encontradas al perforar en una formación dura y abrasiva. Estas temperaturas pueden afectar la vida de la broca, especialmente cuando las temperaturas alcanzan 700 a 750 °C (...) tras el calentamiento de la tabla de diamante, el cobalto y la red de diamante se expandirán a velocidades diferentes, provocando la formación de grietas dando como resultado un fallo estructural de la capa ultra-dura o de la capa de corte PDC. (Estados Unidos Patente No. 2014012427, 2014, p.2)



*Figura 22.* Desgaste de un cortador PDC convencional. Adaptado de: Smith Bits, (2015). ONYX 360 (Rolling PDC cutter. [Figura]. Recuperado de: [https://www.slb.com/~media/Files/smith/brochures/drill\\_bits/onyx\\_360.pdf](https://www.slb.com/~media/Files/smith/brochures/drill_bits/onyx_360.pdf)

El enfoque para el desarrollo de los cortadores giratorios es que aproximadamente el 60% del borde del cortador termina su corrida sin haber aportado en la perforación, entonces la solución a este problema es permitir el giro del cortador y así repartir el desgaste en toda su circunferencia.



Figura 23. Cortador PDC rotativo. Adaptado de: Smith Bits, (2015). ONYX 360 (Rolling PDC cutter. [Figura].

Recuperado de: [https://www.slb.com/~media/Files/smith/brochures/drill\\_bits/onyx\\_360.pdf](https://www.slb.com/~media/Files/smith/brochures/drill_bits/onyx_360.pdf)

Para permitir el giro al cortador fue necesario un diseño más robusto anclado a la aleta de la broca, donde se pudiera almacenar el mecanismo de giro y a su vez diera la resistencia necesaria para que el cortador no se desprendiera de la broca en la perforación. Esto se logró con una analogía de sistema rotor-estator, donde el estator se encuentra anclado a la broca y el rotor se encuentra asegurado a este y a su vez girando con él cortador.

La rotación en el cortador se logra por la orientación del cortador en la broca; al estar la broca girando y el cortador en contacto con la formación este se ve forzado a girar sin necesidad de una energía extra.

## 4.2 Genesis

Esta es una broca PDC la cual está diseñada para aplicaciones en formaciones duras, abrasivas e intercaladas. Cuenta con un mitigador de movimiento lateral (LMM) el cual reduce las vibraciones, mejora la estabilidad de la broca y protege los cortadores de daños por impacto aumentando su vida útil y por lo tanto mejorando el tiempo de la corrida. El LMM está formado por la aleta y la parte superior de hombro detrás de los cortadores primarios, como se muestra en la figura 24. También cuenta con hidráulica optimizada, maximizando la remoción de los recortes y el enfriamiento del cortador. Además, cuenta con un pad de calibre mejorado que le permite mantener su calibre durante mayor tiempo (Baker Hughes, 2013).



Figura 24. Broca PDC Genesis. Adaptado de: Baker Hughes, (2013). Drill bits catalog. [Figura]. Recuperado de: [https://assets.www.bakerhughes.com/system/v1/3221bfb4c03d399066ebcf6190e835aa/37471.DrillBits\\_Catalog\\_HiRes.pdf](https://assets.www.bakerhughes.com/system/v1/3221bfb4c03d399066ebcf6190e835aa/37471.DrillBits_Catalog_HiRes.pdf)

### 4.3 Quantec

La introducción de la broca Quantec PDC en el mercado sin duda alguna ha marcado la historia de la perforación ya que ofrece un diseño innovador que ha permitido perforar formaciones duras y abrasivas que antes requerían de un gran esfuerzo, tiempo y número de brocas; con mayor eficiencia, rapidez y en general reduciendo los costos de la perforación. A continuación, se hace una descripción del diseño de la tecnología Quantec (Baker Hughes, 2010).

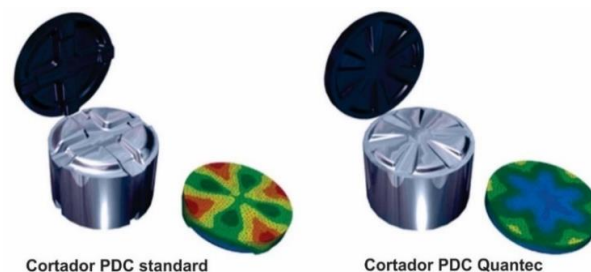
El desarrollo de la tecnología Quantec se basó en administrar la cantidad de diamante que se necesita en las áreas críticas de la broca, aumentar la resistencia de los cortadores a la abrasión y al impacto, optimizar el sistema hidráulico, controlar la profundidad de corte, reducir las vibraciones y aumentar la protección del calibre (Baker Hughes, 2010).

El diseño de la Quantec administra el volumen de diamante colocando una o varias filas de cortadores de backup dependiendo de la aplicación que se le va a dar, con el fin de obtener una mayor estabilidad en la broca, corridas más largas y ROP más altos (Baker Hughes, 2010).



*Figura 25.* Diseño Quantec dependiendo del tipo de aplicación. Adaptado de: Baker Hughes, (2010). Quantec (Drilling and evaluation). [Figura]. Recuperado de: <https://www.bakerhughes.com/news-and-media/resources/brochures/quantec-premium-pdc-drill-bits-brochure>

En cuanto a los cortadores se mejoró la interfaz entre la tabla de diamante y el sustrato de carburo de tungsteno, diseñándola de tal manera que las tensiones residuales causadas por las cargas térmicas debidas a la fricción se alejen del borde, como se muestra en la figura 26, dándole mayor durabilidad al cortador. La tabla de diamante es de una sola capa lo cual la hace más resistente a la abrasión y menos propensa a sufrir fracturas (Baker Hughes, 2010).



*Figura 26.* Interface tabla de diamante-sustrato de carburo de tungsteno. Adaptado de: Baker Hughes, (2010). Quantec (Drilling and evaluation). [Figura]. Recuperado de: <https://www.bakerhughes.com/news-and-media/resources/brochures/quantec-premium-pdc-drill-bits-brochure>

Para mejorar la estabilidad de la broca se controla la profundidad de corte mediante stringers duros, además cuenta con mitigador de movimiento lateral que reduce las vibraciones, mejora la ROP y aumenta los pies perforados. La protección del calibre en la Quantec se mejoró para ser resistente en las aplicaciones más abrasivas rediseñando la geometría, tamaño y espaciamiento de los insertos de TSP (Baker Hughes, 2010).

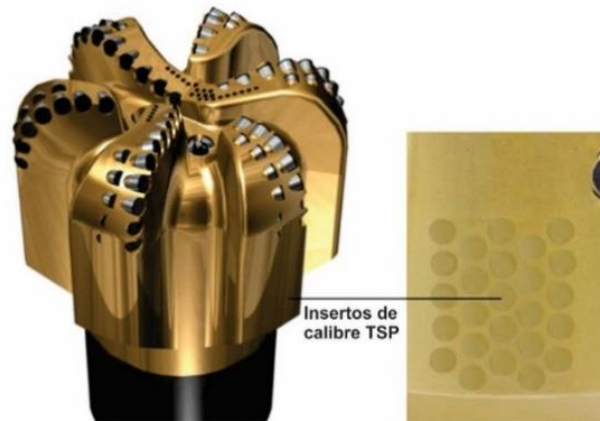


Figura 27. Calibre en el diseño Quantec. Adaptado de: Baker Hughes, (2010). Quantec (Drilling and evaluation). [Figura]. Recuperado de: <https://www.bakerhughes.com/news-and-media/resources/brochures/quantec-premium-pdc-drill-bits-brochure>

#### 4.4 Talon

Una de las últimas propuestas en innovación en el área de brocas para formaciones duras y abrasivas es la tecnología Talon, la cual busca mejorar el rendimiento optimizando diferentes aspectos de la broca, desde los cortadores hasta su hidráulica (Baker Hughes, 2012).

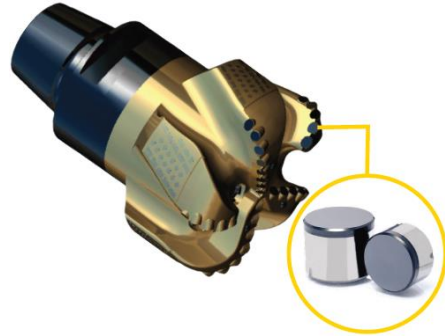
Tabla 5.

Características brocas Talon.

EFICIENCIA		
Hidráulica	Cortadores	Mecánica
Optimización de la energía hidráulica en la broca para asegurar máxima remoción de recortes.	Cortadores con tecnología avanzada en el uso de diamante la cual ayuda al cortador a permanecer afilado, aumentar ROP y durabilidad.	Mejora en la estabilidad y desarrolla un diseño general con un rendimiento superior.

Nota: Adaptado de Baker Hughes, (2012). Talon 3D Vector-Accurate PDC bits (Overview). Baker hughes.com.

En el diseño las brocas de la línea Talon han sido desarrolladas para mantener un rendimiento elevado en diferentes situaciones, desde pozos verticales y casi verticales a pozos donde el control direccional es crítico, además de poder enfrentar de forma efectiva formaciones de alta dureza y abrasividad, donde puede generar altos ángulos de construcción de pozo y mantener ratas de penetración sobresalientes (Baker Hughes, 2012).



*Figura 28.* Broca PDC Talon con cortadores StaySharp. Adaptado de: Baker Hughes, (2014).

StaySharp premium polished cutter technology (Overview). [Figura]. Recuperado de: [https://assets.www.bakerhughes.com/system/96599d804d94403e9215de5516d322ef/pdfs/pdf/36359\\_StaySharp\\_Overview.03\\_10\\_.pdf](https://assets.www.bakerhughes.com/system/96599d804d94403e9215de5516d322ef/pdfs/pdf/36359_StaySharp_Overview.03_10_.pdf).

El diseño de la línea Talon cuenta con aletas más altas respecto al cuerpo de la broca y con mayores canales de flujo entre aletas, con esto se incrementa la evacuación de los cuttings y hace más eficiente el recorrido del lodo de perforación, de la cara de la broca hacia su camino ascendente. Para enfrentar problemas con fluctuaciones de torque se implementa un borde del calibre de la broca rediseñado, el cual con una especie de bisel minimiza la interacción de las paredes de la formación con el cuerpo de la broca.

Todas las brocas con tecnología Talon vienen equipadas con los cortadores StaySharp, cortadores muy resistentes a la erosión, los cuales, de categoría premium, tienen la particularidad de que el diamante se encuentra pulido. Esta característica busca aumentar de forma significativa el tiempo que dura el filo del cortador y maximizar la evacuación de los recortes para mantener la broca limpia, resultando en unas mayores ROP, aumento en el footage y por consiguiente disminución del costo por pie perforado (Baker Hughes, 2014).

Los cortadores StaySharp pueden venir equipados con una configuración de más de una capa de diamante pulido en el cortador, el cual busca incrementar la resistencia a la abrasión con la adición de capas de diamantes. Este proceso de manufactura ha sido probado y mejorado con el tiempo a través de distintas pruebas en campo (Baker Hughes, 2014).

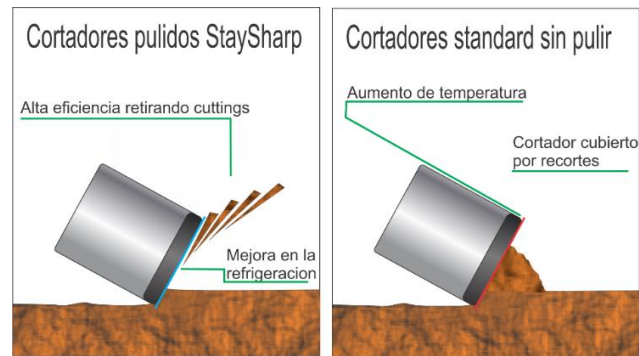


Figura 29. Cortadores StaySharp Vs cortadores standard. Adaptado de: Baker Hughes, (2014). StaySharp premium polishedcutter technology (Overview). [Figura]. Recuperado de: [https://assets.www.bakerhughes.com/system/96599d804d94403e9215de5516d322ef/pdfs/pdf/36359\\_StaySharp\\_Overview.03\\_10\\_.pdf](https://assets.www.bakerhughes.com/system/96599d804d94403e9215de5516d322ef/pdfs/pdf/36359_StaySharp_Overview.03_10_.pdf).

Además, en cuanto al aumento de la vida útil de la broca, se aplica en cada broca Talon la tecnología StayTough, la cual innova a través de dos aspectos en el recubrimiento del cuerpo de la broca, la combinación de materiales avanzados y el uso de técnicas más efectivas en la aplicación de estos materiales, como la soldadura con oxiacetileno, la cual imparte máximos niveles de fuerza y durabilidad. Esta combinación de protección a la broca reduce de forma significativa el desgaste y erosión que sufre su cuerpo al enfrentarse a formaciones duras y abrasivas (Baker Hughes, 2014).

#### 4.5 Shamal

La broca triconica Shamal cuenta con un sistema de sellado doble, como se muestra en la figura 30, un sello primario protege los cojinetes, y el sello secundario protege el sello primario. El sello primario combina un elastómero de cara dinámica altamente resistente al desgaste y un material energizante más suave que ejerce presión de contacto constante. El sello secundario está diseñado para evitar que las partículas abrasivas en los fluidos del pozo entren en contacto con el sello del cojinete. Un tejido termoplástico reforzado con Kevlar se coloca sobre la cara dinámica, incrustado en una matriz de elastómero. El tejido proporciona resistencia al desgaste y al desgaste por calor,

además de actuar como una barrera para las partículas abrasivas. Este sistema de sellado le permite a la broca perforar durante más tiempo con mayores RPMs y WOB más altos (Smith Bits, 2016).



Figura 30. . Broca triconica con TIC Shamal. Adaptado de: Smith Bits, (2016).ProductCatalog. [Figura].

Recuperado de: [https://www.slb.com/~media/Files/smith/catalogs/bits\\_catalog.pdf](https://www.slb.com/~media/Files/smith/catalogs/bits_catalog.pdf)

#### 4.6 Vanguard

La línea de tecnología en brocas triconicas vanguard es diseñada para aplicaciones específicas. Los insertos se combinan en diferentes grados de carburo de tungsteno lo que da a la broca una mayor ROP. Se dan mejoras en la protección del calibre y patas más resistentes, además cuenta con elastómeros diseñados para resistir largas horas en ambientes calientes de hasta 550°F (Baker Hughes, 2009).



Figura 31. Broca triconica Vanguard. Adaptada de: Baker Hughes, (2013). Drill bits catalog. [Figura]. Recuperado de: [https://assets.www.bakerhughes.com/system/v1/3221bfb4c03d399066ebcf6190e835aa/37471.DrillBits\\_Catalog\\_](https://assets.www.bakerhughes.com/system/v1/3221bfb4c03d399066ebcf6190e835aa/37471.DrillBits_Catalog_HiRes.pdf)

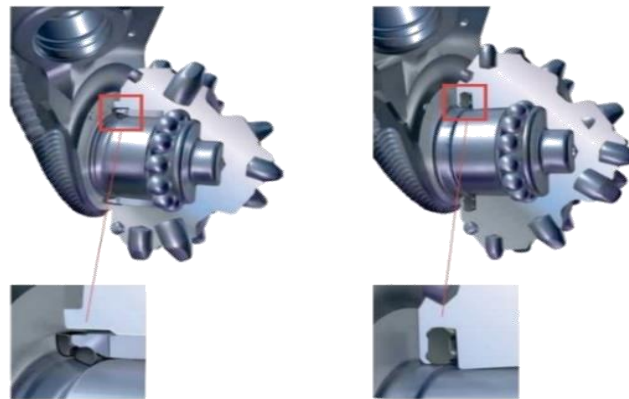
HiRes.pdf

Las temperaturas extremas dañan prematuramente los componentes de elastómero de los sistemas de sellado tradicionales. Los diseños Vanguard amplían el rango de temperatura funcional de perforación, estableciendo nuevos estándares de rendimiento y fiabilidad. El diseño a utilizar depende del rango de temperaturas de circulación como se describen a continuación:

- VM – Sello de cara metálica estándar (MFS) es recomendado para temperaturas de circulación de hasta 350 ° F (177 ° C). Su ventaja es una superficie de sellado de metal-metal que produce un menor coeficiente de fricción que adicionalmente tiene un recubrimiento de baja fricción y resistente al desgaste aplicado a la cara metálica del sello (Baker Hughes, 2009).
- VMG – recomendado para perforar en temperaturas de circulación de 135 ° C a 288 ° C (275 ° F a 550 ° F). Este nuevo sistema de sellado aumenta aún más las ventajas de alto rendimiento del sistema de sellado de cara metálica reemplazando todos los componentes de elastómero con compuestos de alta temperatura especialmente formulados que son más resistentes a la degradación térmica ya la compresión. Una grasa sintética de cojinetes de alta viscosidad proporciona un recubrimiento de lubricante de baja fricción a los componentes del cojinete y del sello (Baker Hughes, 2009).
- VXG – diseño de ultra alta temperatura, utiliza cojinetes no sellados de precisión diseñado para perforar en temperaturas de circulación superiores a 288 ° C (550 ° F). cuenta con un sistema de rodamiento de rodillos con rodamientos refrigerados por fluido de perforación para generar menos fricción y menos calor (Baker Hughes, 2009).

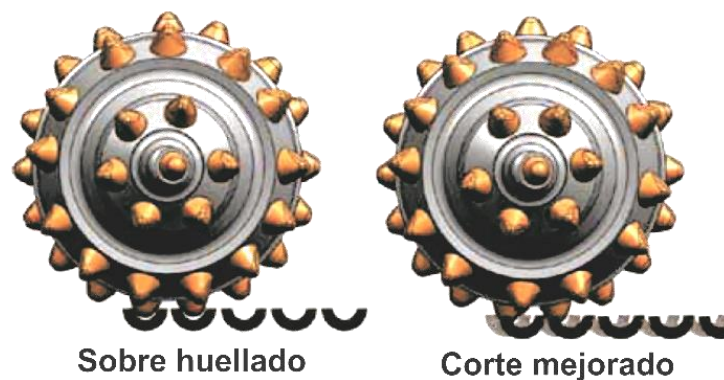
En cuanto a los cojinetes, Vanguard cuenta con diseños para una máxima capacidad de carga, resistentes al desgaste por calor en aplicaciones para alta velocidad y alta temperatura con sello metal-metal (VM) o un nuevo sello de elastómero (VG) de alta relación de aspecto (HAR) que

mantiene el sellado óptimo dentro del cojinete. Las brocas VG utilizan una grasa de cojinete de alta viscosidad que aumenta la capacidad de carga y asegura una larga vida de los cojinetes. Además, debido a las propiedades térmicas avanzadas de la grasa, también se utiliza en todas las brocas VMG VanguardGeothermal (Baker Hughes, 2009).



*Figura 32.* Sello de cojinete broca Vanguard. A la izquierda sello metal-metal y a la derecha sello de elastómero HAR. Adaptado de: Baker Hughes, (2009). Vanguard premium tricone drill bits (Drilling and evaluation). [Figura]. Recuperado de: <https://www.bakerhughes.com/products-and-services/drilling/drill-bit-systems/tricone-roller-cone-drill-bits/vanguard-tricone-roller-cone-drill-bits>

La distancia entre los insertos ha sido optimizada para eliminar el sobre huellado de los dientes o insertos, haciendo más eficiente el corte, reduciendo el desgaste de los cortadores y mejorando la tasa de penetración (Baker Hughes, 2009).



*Figura 33.* Efecto de sobre huellado. Adaptado de: Baker Hughes, (2009). Vanguard premium tricone drill bits (Drilling and evaluation). [Figura]. Recuperado de: <https://www.bakerhughes.com/products-and-services/drilling/drill-bit-systems/tricone-roller-cone-drill-bits/vanguard-tricone-roller-cone-drill-bits>

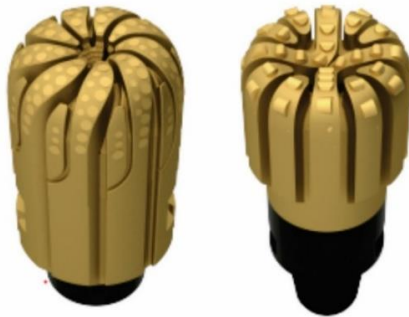
La protección de las patas de la broca ha sido mejorada con Hardfacing lo que minimiza el desgaste severo y asegura la protección del sello de los cojinetes, asegurando una mayor vida útil de la broca y por tanto menores corridas en aplicaciones exigentes como la perforación de formaciones duras y abrasivas (Baker Hughes, 2009).

#### **4.7 Impregnada.**

Las últimas tecnologías en brocas impregnadas cuentan con un diseño innovador en la cara de corte, empleando estructuras parecidas a pequeñas barras hechas netamente de material impregnado, separadas entre ellas y extendiéndose de forma radial respecto al centro de la broca por toda la cara de corte. La separación entre las barras tiene como principal objetivo mejorar la refrigeración y la remoción de los cortes de la cara de la broca. Además estas pequeñas barras de material impregnado se ubican en una distribución de aletas parecidas a las aletas de brocas de cortadores PDC, estas aletas se extienden de forma longitudinal a través de la cara de la broca, del centro o cono hasta el borde o gauge; al tener estas aletas se crean canales de flujo espaciosos, lo cual, juntos con el diseño de las barras de material impregnado hacen que el volumen de lodo y su flujo sea mucho mejor respecto a un diseño de broca impregnada convencional (Estados Unidos Patente No 6010906, 2003).

Al empezar una corrida con una broca impregnada con estas características se tiene como resultado una ROP muy variable, esto mientras las capas superiores de las barras de material impregnado se ven pulidas por la formación y exponen de mejor forma los diamantes o el material de corte, una vez pulidas la ROP se estabiliza y mejora el rendimiento (Estados Unidos Patente No 6010906, 2003).

Ha sido demostrado en pruebas de laboratorio, a escala real, que esta configuración en las brocas impregnadas aumenta la ROP en comparación a brocas impregnadas convencionales, otra forma de ver su eficiencia es que tiende a mostrar una ROP similar, pero con un WOB muy inferior (Estados Unidos Patente No 6010906, 2003).



*Figura 34.* Broca impregnada. Adaptado de: Baker Hughes, (2013). Drill bits catalog [Figura]. Recuperado de: [https://assets.www.bakerhughes.com/system/v1/3221bfb4c03d399066ebcf6190e835aa/37471.DrillBits\\_Catalog\\_HiRes.pdf](https://assets.www.bakerhughes.com/system/v1/3221bfb4c03d399066ebcf6190e835aa/37471.DrillBits_Catalog_HiRes.pdf)

## 5 Comparaciones

A continuación, se hace un comparativo de las tecnologías descritas anteriormente con datos reales recolectados en corridas de estas brocas en pozos del piedemonte llanero, todas perforando la formación Mirador. En las tablas se describen las características más importantes y teniendo en cuenta como principales datos a comparar la longitud perforada, rata de penetración y dull grade, este último dándonos un estimativo del estado de la broca después de la corrida. Cabe resaltar que cada una de las comparaciones se hace a una profundidad relativamente similar con el fin de que las condiciones de perforación en las que se desempeñan cada una de las brocas traten de ser lo más similares posibles. En la tabla se incluye una fila para valores promedios de longitud perforada

y tasa de perforación, estos promedios se hallan seleccionando las brocas que terminaron su corrida por razones propias de su rendimiento, como rata de penetración y horas de trabajo entre otros; de estas brocas se seleccionaba la mejor para comparar. Vale la pena aclarar que, si la broca que presentaba mejor rendimiento para su tecnología salía por razones ajenas a su rendimiento, como son problemas de BHA, esta se seleccionaba como la broca a comparar, entendiéndose que su rendimiento pudo haber sido mayor e incluyéndose en el cálculo del promedio. Además, se incluyen los costos por pie perforado de cada una de las brocas comparadas dando una referencia de la viabilidad económica al perforar con estas nuevas tecnologías.

### 5.1 Diámetro de la broca: 18<sup>1</sup>/<sub>2</sub> pulgadas.

Tabla 6.

Primera comparación broca 18.5 pulgadas.

<b>Tecnología</b>	<b>Shamal</b>	<b>Onyx 360</b>
<b>Tipo de broca</b>	GS30BDOVCRD	MDSiR816M
<b>Numero de conos/aletas</b>	3 conos	8 aletas
<b>Material del cuerpo de la broca</b>	Acero	Carbono de tungsteno
<b>Tamaño del cortador [mm]</b>	N/A	16
<b>Cortadores de Back Up</b>	N/A	No
<b>Boquillas</b>	0.862 TFA	6x10 6x11
<b>Dull Grade</b>	4-4-WT-A-E-I-CT-PR	1-1-WT-A-X-I-NO-BHA
<b>Razón de salida</b>	Rata de penetración	Cambio de BHA
<b>Profundidad de entrada [ft]</b>	4682	4280
<b>Profundidad de salida [ft]</b>	5108	5380
<b>Longitud perforada [ft]</b>	426	1100

<b>Longitud per. Prom [ft]</b>	296	1100
<b>Tiempo [horas]</b>	61.1	72.9
<b>ROP [ft/h]</b>	7.0	15.09
<b>ROP prom[ft/h]</b>	5.1	15.09
<b>WOB Min [lb]</b>	30000	2000
<b>WOB Max [lb]</b>	50000	45000
<b>Costo por pie [\$]</b>	1017,49	575,27

<b>Aumento de la longitud perforada.</b>	158 %
<b>Aumento ROP</b>	116 %

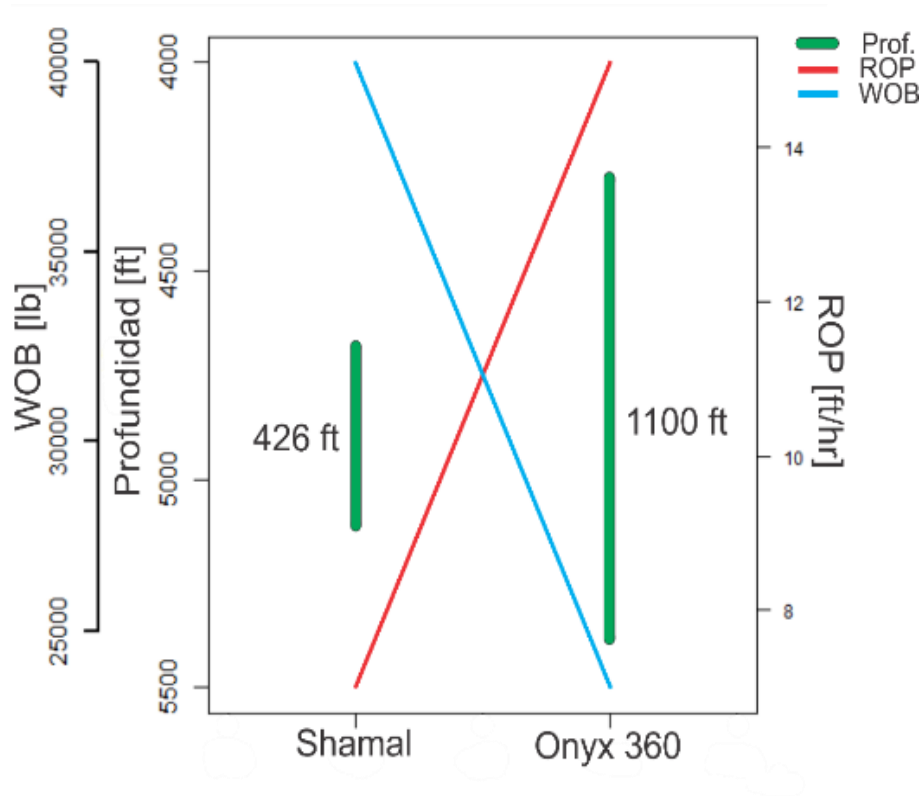


Figura 35. Comparación broca de diámetro 18 ½pulgadas. Tecnologías Shamal yOnyx 360.

Según la tabla y la gráfica anterior se puede observar que las brocas en esta sección, corridas en el mismo intervalo de profundidad en la formación mirador, mostraron la diferencia que hay entre una tecnología triconica y una tecnología avanzada de brocas PDC. La broca Sharc con cortadores Onyx 360 tuvo un rendimiento muy superior tanto en footage como en ROP con una mejora del 158 % y 116% respectivamente. Además, presenta el menor costo por pie perforado. Cabe resaltar que la broca Sharc a pesar de que perforaba con una excelente ROP tuvo que ser sacada por un cambio en el BHA y al revisar su desgaste como lo muestra el dull grade esta salió en muy buenas condiciones, con un desgaste mínimo en sus cortadores. Mientras que la broca Shamal presento un desgaste de aproximadamente el 50% en sus insertos, además de que fue sacada porque presentaba una ROP muy baja.

### Consideraciones

- En esta sección se corrieron 7 brocas triconicas Shamal, de las cuales 5 salieron por problemas de ROP, Torques erráticos o porque ya habían cumplido sus horas de funcionamiento.
- No se corrieron brocas impregnadas ni PDC convencionales. Solo se empleó una broca Sharc Onyx 360 y fue la que mejor tuvo rendimiento en toda la sección.

*Tabla 7.  
Segunda comparación broca 18.5 pulgadas*

<b>Tecnología</b>	<b>Genesis</b>	<b>Quantec</b>	<b>Triconica</b>
<b>Tipo de broca</b>	HCQD512X	QD508FX	MLX-DS20DX
<b>Numero de aletas</b>	12	8	3 Conos
<b>Material del cuerpo de la broca</b>	Carbono de tungsteno	Carbono de tungsteno	Acero
<b>Tamaño del cortador [mm]</b>	16	16	N/A

<b>Cortadores de Back Up</b>	Si	Si	N/A
<b>Boquillas</b>	1.325 TFA	5X11 6X12	4x20
<b>Dull Grade</b>	1-2-WT-S-X-I-NO-PR	2-5-RO-N-X-I-CT-PR	2-4-WT-S-E-I-BT-BHA
<b>Razón de salida</b>	Rata de penetración	Rata de penetración	Cambio de BHA
<b>Profundidad de entrada [ft]</b>	4348	3357	4001
<b>Profundidad de salida [ft]</b>	4522	4280	4356
<b>Longitud perforada [ft]</b>	174	923	355
<b>Longitud perf. prom [ft]</b>	174	486	264
<b>Tiempo [horas]</b>	27.5	87.2	46.93
<b>ROP [ft/h]</b>	6.3	10.58	7.6
<b>ROP prom [ft/h]</b>	6.3	5.96	5.9
<b>WOB Min [lb]</b>	30000	6000	40000
<b>WOB Max [lb]</b>	80000	51000	50000
<b>Costo por pie [\$]</b>	2.187,36	701,18	1.001,23

<b>Genesis (base de cálculo)</b>	Quantec	Triconica
<b>Aumento de la longitud perforada.</b>	430%	104%
<b>Aumento ROP</b>	68%	21%

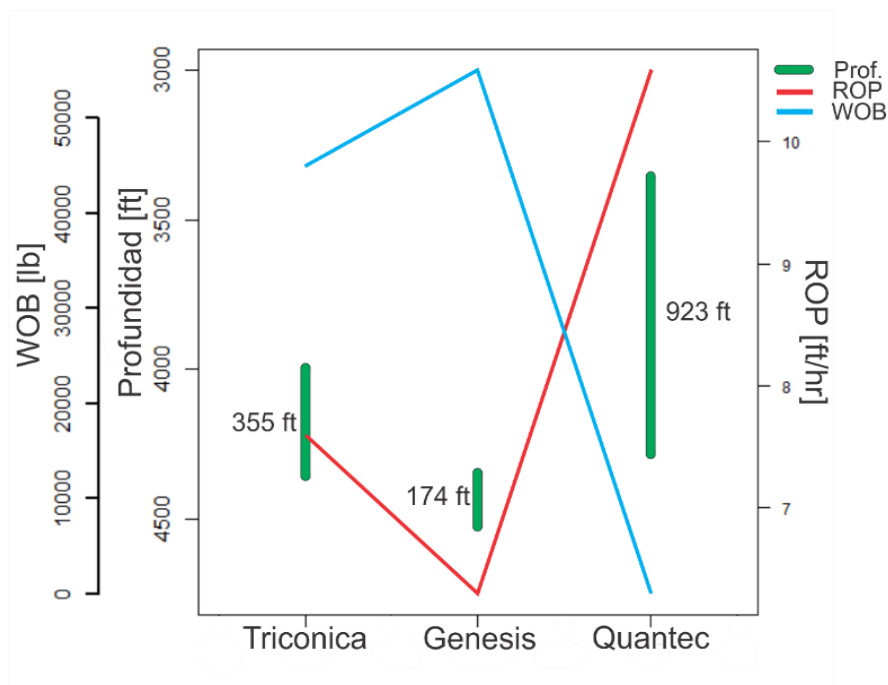


Figura 36. Comparación brocas de diámetro 18 ½ pulgadas. Genesis, Triconica y Quantec.

De la tabla y la gráfica anterior podemos observar que la broca PDC Quantec tuvo un excelente rendimiento comparado con la triconica y la PDC Genesis, esta las supera tanto en footage como en ROP con el menor costo por pie perforado; a pesar de que como muestra el dull grade la broca salió con un desgaste considerable. Al comparar la broca Genesis podemos ver que esta broca PDC no tuvo un desgaste significativo; sin embargo, su desempeño no fue bueno en comparación con la triconica convencional que por el contrario perforo a una buena tasa y superándola por más de 180 ft perforados.

### Consideraciones

- En esta sección se corrieron tres brocas Quantec terminando con un desgaste medio alto.
- Solo se corrió una broca Genesis con desgaste mínimo en sus cortadores.
- Se corrieron 2 brocas Triconicas convencionales una saliendo por rata de penetración y otra por problemas de BHA, ambas presentando un desgaste medio-bajo en sus insertos.

## 5.2 Diámetro de la broca: 14 <sup>3</sup>/<sub>4</sub> pulgadas.

Tabla 8.

Primera comparación broca 14.75 pulgadas.

Tecnología	Onyx	Onyx 360	Impregnada (convencional)
<b>Tipo de broca</b>	MDSI616HSPX	MDSiR813LHEBPX	K505TBPXXC
<b>Numero de aletas</b>	6	8	N/A
<b>Material del cuerpo de la broca</b>	Carbono de tungsteno	Carbono de tungsteno	Carbono de tungsteno
<b>Tamaño del cortador [mm]</b>	16	13	N/A
<b>Cortadores de Back Up</b>	Si	Si	N/A
<b>Boquillas</b>	8x13	3x13 7x12	4.2 TFA
<b>Dull Grade</b>	2-8-RO-S-X-I-WT-PR	3-8-RO-S-X-42-WT-TQ	1-1-WT-A-X-I-NO-PR
<b>Razón de salida</b>	Rata de penetración	Torque	Rata de penetración
<b>Profundidad de entrada [ft]</b>	7856	7925	7165
<b>Profundidad de salida [ft]</b>	8160	8307	7416
<b>Longitud perforada [ft]</b>	304	382	251
<b>Longitud perf. Prom [ft]</b>	268	289	251
<b>Tiempo [horas]</b>	134.4	68.5	50.7
<b>ROP [ft/h]</b>	2.3	5.58	5.0
<b>ROP prom[ft/h]</b>	2.4	9	5
<b>WOB Min [lb]</b>	20000	10000	10000
<b>WOB Max [lb]</b>	50000	60000	15000

<b>Costo por pie [\$]</b>	2.934,47	1.684,97	1.778,51
<b>Impregnada (base de cálculo)</b>	Onyx	Onyx 360	
<b>Aumento de la longitud perforada.</b>	21%	52%	
<b>Aumento ROP</b>	-54%	12%	

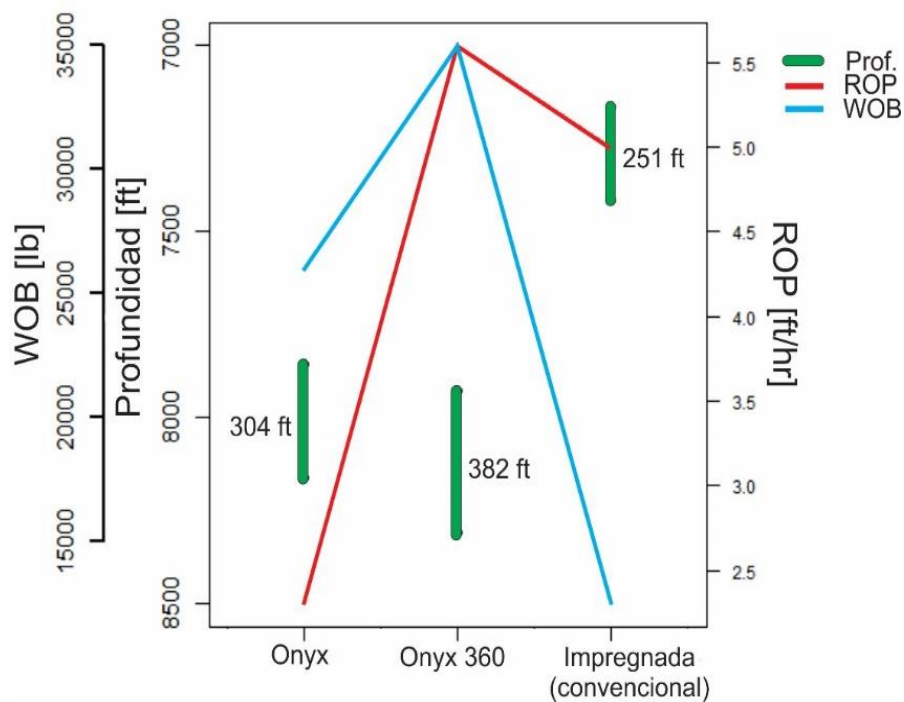


Figura 37. Comparación brocas de diámetro 14 ¾ pulgadas. Tecnologías Onyx, Onyx 360 e impregnada.

Al comparar el dull grade se evidencia que las dos brocas Sharc tienen un desgaste muy similar en los cortadores; la Onyx 360 presenta un desgaste significativo en el calibre. La impregnada sale con un desgaste inferior al 15% y su calibre en buenas condiciones. La Sharc con cortadores Onyx 360 fue la que mejor se desempeñó tanto en ROP como en footage a pesar de su desgaste, enfrentándose a un intervalo más profundo que las otras brocas y con el menor costo por pie perforado.

### Consideraciones

- Se corrieron 5 brocas con cortadores Onyx 360, 3 salieron por problemas de torque o rata de penetración.
- Se corrieron 3 brocas con cortadores Onyx convencionales, 2 salieron por problemas de torque o rata de penetración.
- En esta sección solo se corrió una broca impregnada la cual tuvo un desgaste mínimo. Cabe resaltar que esta broca perforo formación mirador en un intervalo más somero que las brocas Share aunque presento un ROP inferior a la broca con cortadores Onyx 360.
- Solo se corrió una broca triconica por parte de Smith en esta sección, la cual solo perforo 8 ft y fue sacada por problemas de BHA, no fue tomada en cuenta para la comparación.
- Primera corrida a nivel mundial de una broca con cortadores Onyx 360 en una sección de 14  $\frac{3}{4}$ , Siendo la mayor longitud perforada por una sola broca a través de la formación Mirador en una sección de 14  $\frac{3}{4}$ .

Tabla 9.

*Segunda comparación broca 14.75 pulgadas.*

<b>Tecnología</b>	<b>Genesis</b>	<b>Quantec</b>	<b>Vanguard</b>	<b>Impregnada</b>
<b>Tipo de broca</b>	HCM512Z	QD508FX	VMDS28CGD X2	HH178G1G5U4
<b>Numero de conos/aletas</b>	12 aletas	8 aletas	3 conos	N/A
<b>Material del cuerpo de la broca</b>	Carbono de tungsteno	Carbono de tungsteno	Acero	Carbono de tungsteno
<b>Tamaño del cortador [mm]</b>	16	16	N/A	N/A
<b>Cortadores de Back Up</b>	No	Si	N/A	N/A

<b>Boquillas</b>	6x12 6x16	4X12 4X13	4X18	8x12
<b>Dull Grade</b>	2-6-CT-RO-A-I-ID-BHA	7-8-RO-S-X-I-BB/LT-PP	2-7-BT-G-E-I-CT-TQ	1-3-PN-S-X-I-WT-PP
<b>Razón de salida</b>	Cambio del BHA	Presión de la bomba	Torque	Presión de la bomba
<b>Profundidad de entrada [ft]</b>	6798	7186	7416	6795
<b>Profundidad de salida [ft]</b>	7165	7416	7570	7385
<b>Longitud perforada [ft]</b>	367	230	154	590
<b>Longitud perf. prom [ft]</b>	367	230	132	555
<b>Tiempo [horas]</b>	33.73	56.7	98.4	157.5
<b>ROP [ft/h]</b>	10.9	4.1	1.6	3.9
<b>ROP prom [ft/h]</b>	10.9	3.3	2.2	3.8
<b>WOB Min [lb]</b>	30000	10000	40000	9000
<b>WOB Max [lb]</b>	55000	45000	60000	18000
<b>Costo por pie [\$]</b>	944,05	2.302,22	4.090,45	1.673,56
<b>Vanguard (base de cálculo)</b>		Genesis	Quantec	Impregnada
<b>Aumento de la longitud perforada.</b>		138 %	49 %	283%
<b>Aumento ROP</b>		581 %	156 %	143%

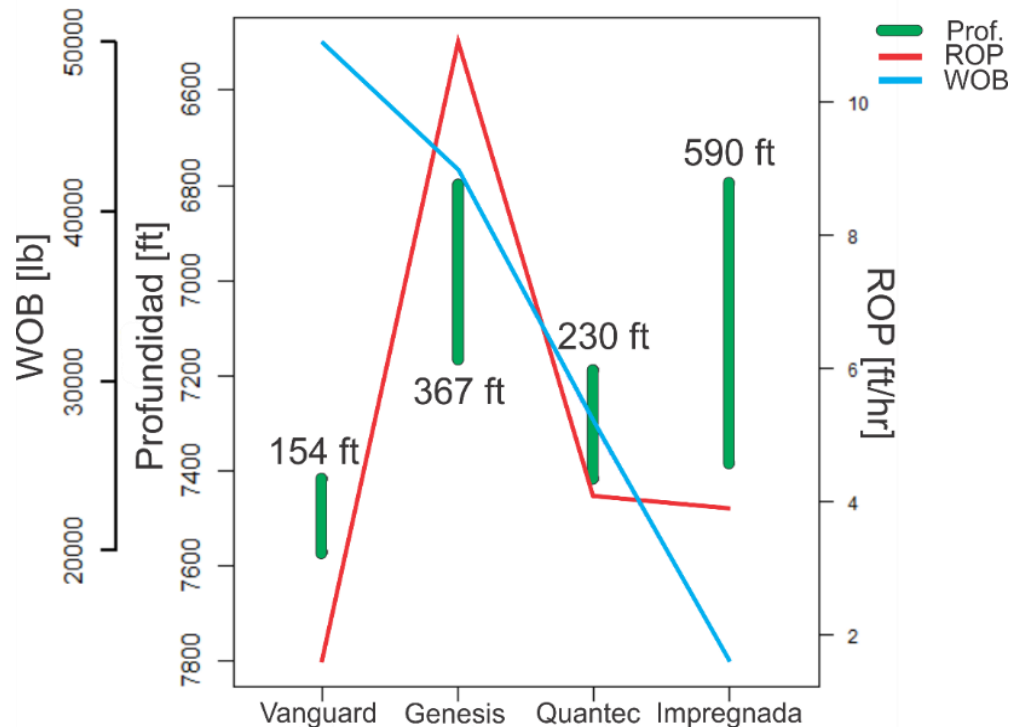


Figura 38. Comparación brocas de diámetro 14 ¾ pulgadas. Tecnologías Genesis, Quantec, Vanguard e Impregnada.

Con base a la tabla y la gráfica anterior podemos afirmar que en esta sección la mejor broca PDC es la Genesis, ya que logra una mayor longitud perforada con la mejor ROP de las brocas comparadas. La Quantec como lo muestra el dull grade tuvo un desgaste significativo con anillamiento, es decir, perdió los cortadores externos. En cuanto a la broca Triconica Vanguard no logra un buen rendimiento respecto a las demás brocas comparadas; mientras que la broca Impregnada perforo 590 ft superando a la triconica en un 283% y a la mejor de las PDC compradas en 61%.

### Consideraciones

- En esta sección la compañía Baker corrió 8 brocas, de las cuales 2 fueron Quantec, estas brocas tuvieron un desgaste alto ambas con pérdida de cortadores externos.

- Se corrió solo una broca Genesis con razón de salida por BHA, lo que nos diría que es ajeno a su rendimiento, pero podemos ver en el dull grade que presentaba un desgaste alto sus cortadores externos de lo cual podríamos decir que no perforaría mucho más.
- Se corrieron dos brocas Vanguard con rendimiento y desgaste similares.
- Por último, se corrieron tres brocas impregnadas, presentando un rendimiento mas que sobresaliente. De las tres brocas solo dos se tuvieron en cuenta para el cálculo del promedio debido a que una de ellas salió por BHA y solo perforo 6ft.

### 5.3 Diámetro de la broca: 10 <sup>5</sup>/<sub>8</sub> pulgadas.

Tabla10.

Primera comparación broca 10.625 pulgadas.

Tecnología	Onyx 360	Onyx	Triconica (convencional)	Impregnada (convencional)
Tipo de broca	---	MDSI813LPBPXX	GFK47YODPD	K503TBPXXC
Numero de aletas	8	8	3 conos	N/A
Material del cuerpo de la broca	Carbono de tungsteno	Carbono de tungsteno	Acero	Carbono de tungsteno
Tamaño del cortador [mm]	13	13	N/A	N/A
Cortadores de Back Up	--	SI	N/A	N/A
Boquillas	8x12	2x11 2x12 4x13	3x22	1.6 TFA
Dull Grade	4-6-WT-A-X-I-LT/BT-BHA	2-3-WT-A-X-I-HC-PR	5-7-CT-A-E-3-LT-HR	7-8-WT-S-X-I-JD-PP
Razón de salida	Cambio de BHA	Rata de penetración	Horas de trabajo	Presión de bomba

<b>Profundidad de entrada [ft]</b>	14276	11299	14046	11904
<b>Profundidad de salida [ft]</b>	14630	11532	14139	12029
<b>Longitud perforada [ft]</b>	354	233	93	125
<b>Longitud perf. prom [ft]</b>	265	197	112	113
<b>Tiempo [horas]</b>	120.9	36.89	38.79	29.2
<b>ROP [ft/h]</b>	2.9	6.3	2.4	4.3
<b>ROP prom [ft/h]</b>	3.5	3.8	2.1	2.9
<b>WOB Min [lb]</b>	-	18000	20000	2000
<b>WOB Max [lb]</b>	-	25000	35000	6000
<b>Costo por pie [\$]</b>	2.370,23	1.669,12	3.944,89	3.325,32

<b>Triconica (Base de cálculo)</b>	Onyx 360	Onyx	Impregnada
<b>Aumento de la longitud perforada.</b>	280%	150 %	34%
<b>Aumento ROP</b>	21%	162%	79%

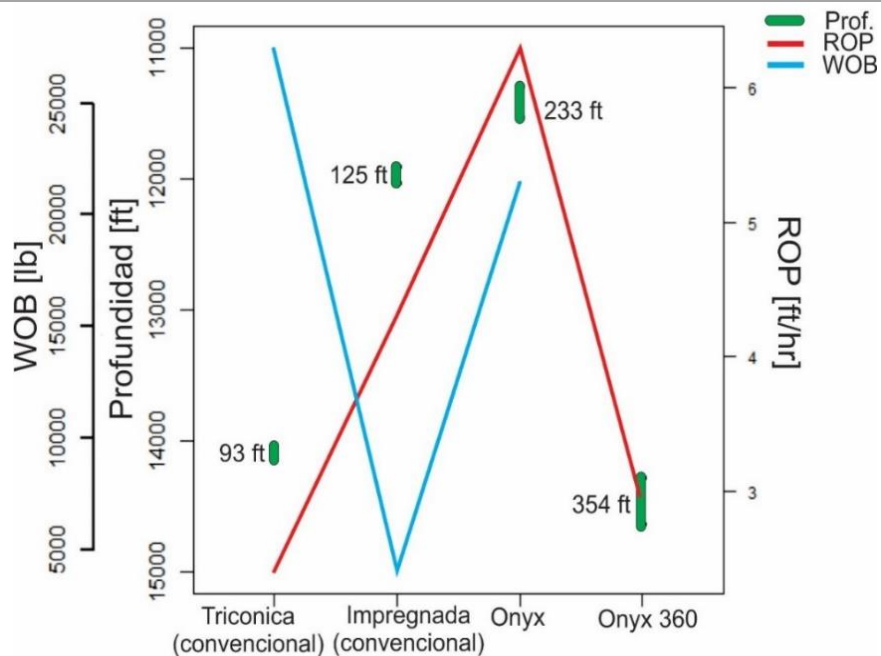


Figura 39. Comparación brocas de diámetro 10 5/8 pulgadas. Tecnologías Onyx, Onyx 360, Impregnada y triconica.

En esta sección la mejor broca es la Sharc con cortadores Onyx 360 con una diferencia de más de 120 ft por encima a la que le sigue en rendimiento, y pudiendo lograr un footage aun superior ya que fue sacada por cambio del BHA y no por rata de penetración o problemas de torque. Además el costo por pie perforado que presenta esta broca a pesar de que no es el menor si es relativamente bajo en comparación con las demás brocas.

Analizando el rendimiento de las brocas PDC podemos observar que a pesar de que la Onyx tiene una mejor ROP que la Onyx 360, esta última perforo en un intervalo considerablemente más profundo lo que pudo influir en este parámetro. La broca triconica convencional presento un rendimiento modesto respecto a las nuevas tecnologías, igualmente la broca con material impregnado también tuvo un rendimiento promedio, pero con un desgaste significativo como lo muestra el dull grade.

### **Consideraciones**

- Se corrieron 4 brocas con cortadores Onyx 360, una sacada por problemas ajenos a la broca. En general las brocas Onyx 360 sacadas por problemas de rata de penetración o torque tuvieron un rendimiento más que satisfactorio, presentando un promedio de footage y ROP de 354 ft y 2.9 ft/h, cabe recordar que estos cortadores no están diseñados principalmente para aumento de ROP, sino para mayores corridas.
- Las brocas Sharc con cortadores convencionales fueron utilizadas en esta sección, con un promedio de footage y ROP de 233 ft y 6.3 ft/h, siendo este último un resultado excelente.
- Se corrieron 4 triconicas convencionales, sufriendo la mayoría un desgaste bastante considerable en sus insertos.
- Fueron empleadas 3 brocas impregnadas convencionales, dos de estas saliendo con un desgaste casi total.

Tabla 11.  
Segunda comparación broca 10.625 pulgadas.

<b>Tecnología</b>	<b>Quantec</b>	<b>Vanguard</b>	<b>Impregnada</b>
<b>Tipo de broca</b>	QD408FX	VMG40CGDXO	HH178G1G5U4
<b>Numero de conos/aletas</b>	8 aletas	3 conos	N/A
<b>Material del cuerpo de la broca</b>	Carbono de tungsteno	Acero	Carbono de tungsteno
<b>Tamaño del cortador [mm]</b>	13	N/A	N/A
<b>Cortadores de Back Up</b>	Si	N/A	N/A
<b>Boquillas</b>	---	2x16 1x15	1.94 TFA
<b>Dull Grade</b>	6-8-RO-S-X-I-BT-PR	4-6-WT/SD-A-B-BT-TQ	8-8-RO-N-X-I-WT-PR
<b>Razón de salida</b>	Rata de penetración	Torque	Rata de penetración
<b>Profundidad de entrada [ft]</b>	12279	11242	13379
<b>Profundidad de salida [ft]</b>	12427	11504	13589
<b>Longitud perforada [ft]</b>	148	262	210
<b>Longitud perf. prom [ft]</b>	102	171	121
<b>Tiempo [horas]</b>	42.7	36.4	54.03
<b>ROP [ft/h]</b>	3.5	7.2	3.9
<b>ROP prom [ft/h]</b>	2.7	2.1	4.3
<b>WOB Min [lb]</b>	---	20000	24000
<b>WOB Max [lb]</b>	---	40000	30000
<b>Costo por pie [\$]</b>	2.841,42	1.357,75	2.304,71

Quantec (base de cálculo)	Vanguard	Impregnada
<b>Aumento de la longitud perforada.</b>	77%	42%
<b>Aumento ROP</b>	106 %	11%

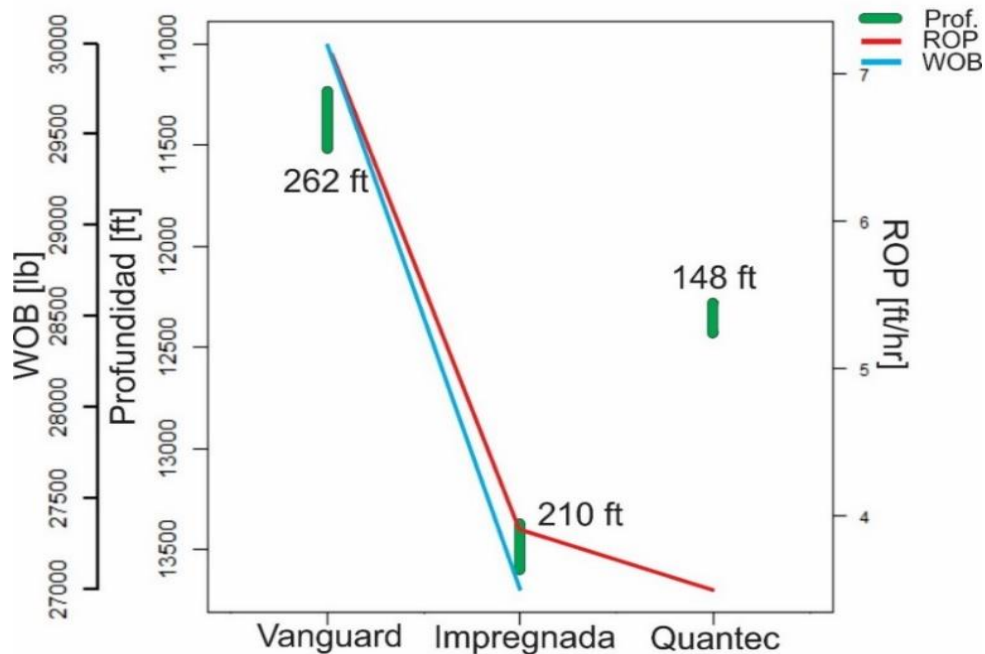


Figura 40. Comparación broca de diámetro 10 5/8pulgadas. Tecnologías Quantec, Vanguard e Impregnada

Al comparar el dull grade de estas brocas podemos observar que todas salen del hueco con desgaste muy significativo lo que da referencia de la dureza y abrasividad de la formación. La broca PDC Quantec presenta sus cortadores internos muy desgastados y anillamiento. La broca triconica Vanguard exhibe un alto y mediano desgaste en los insertos externos e internos respectivamente, por último la broca impregnada perdió todo el material impregnado y presenta anillamiento. Se puede observar de esta sección que la broca Triconica logro el mejor footage con la mejor ROP y un costo por pie perforado bajo a pesar del fuerte desgaste, aunque enfrentándose a un intervalo más somero.

### Consideraciones

- Se corrieron un total de 23 brocas de las cuales 12 fueron triconicas con un promedio de footage y ROP de 171 ft y 2,1 ft/h respectivamente y de ellas 7 salieron por razones propias a su rendimiento como rata de penetración y torque.
- Cabe mencionar que la broca impregnada se corrió en un intervalo de más de 1000 ft por debajo de la broca triconica lo que pudo influenciar en que tuviera un rendimiento menor al que tuvo esta. Se corrieron 6 brocas impregnadas y en general tuvieron un desgaste alto.
- Por último se corrieron 4 brocas Quantec de las cuales solo dos se tuvieron en cuenta para el cálculo del promedio debido a que las demás tuvieron razones de salida ajenas a su rendimiento

### 5.4 Diámetro de la broca: 8<sup>1</sup>/<sub>2</sub> pulgadas.

Tabla 12.

Primera comparación broca 8.5 pulgadas.

Tecnología	Onyx	Onyx 360	Triconica	Impregnada (Convencional)
Tipo de broca	MSi813WUBPX	MDSiR813	GF40YBDOD	K507QSTBPXXC
Numero de aletas	8	8	3 Conos	N/A
Material del cuerpo de la broca	Carbono de tungsteno	Carbono de tungsteno	Acero	Carbono de tungsteno
Tamaño del cortador [mm]	13	13	N/A	N/A
Cortadores de Back Up	No	Si	N/A	N/A
Boquillas	8x12	4x11 4x12	3x14	--

<b>Dull Grade</b>	<b>5-8-RO-S-X-I- WT-PR</b>	<b>2-1-WT-S-X-I- BT-TQ</b>	<b>4-5-WT-A-E- I-NO-TQ</b>	<b>6-1-WT-A-X-I- HC-PR</b>
<b>Razón de salida</b>	Rata de penetración	Torque	Torque	Rata de penetración
<b>Profundidad de entrada [ft]</b>	13955	16271	11791	10791
<b>Profundidad de salida [ft]</b>	14117	16595	11237	10976
<b>Longitud perforada [ft]</b>	162	324	147	185
<b>Longitud perf. prom [ft]</b>	119	226	94	161
<b>Tiempo [horas]</b>	64.2	100.3	32.5	33.3
<b>ROP [ft/h]</b>	2.52	3.23	4.52	5.56
<b>ROP prom [ft/h]</b>	2.6	3.65	3.32	3.9
<b>WOB Min [lb]</b>	5000	4000	35000	8000
<b>WOB Max [lb]</b>	40000	30000	38000	11000
<b>Costo por pie [\$]</b>	3.298,52	2.258,73	2.252,62	1.882,89
<b>Triconica (base de cálculo)</b>	Onyx	Onyx 360	Impregnada	
<b>Aumento de la longitud perforada.</b>	10%	120%	26%	
<b>Aumento ROP</b>	-44%	-28%	23%	

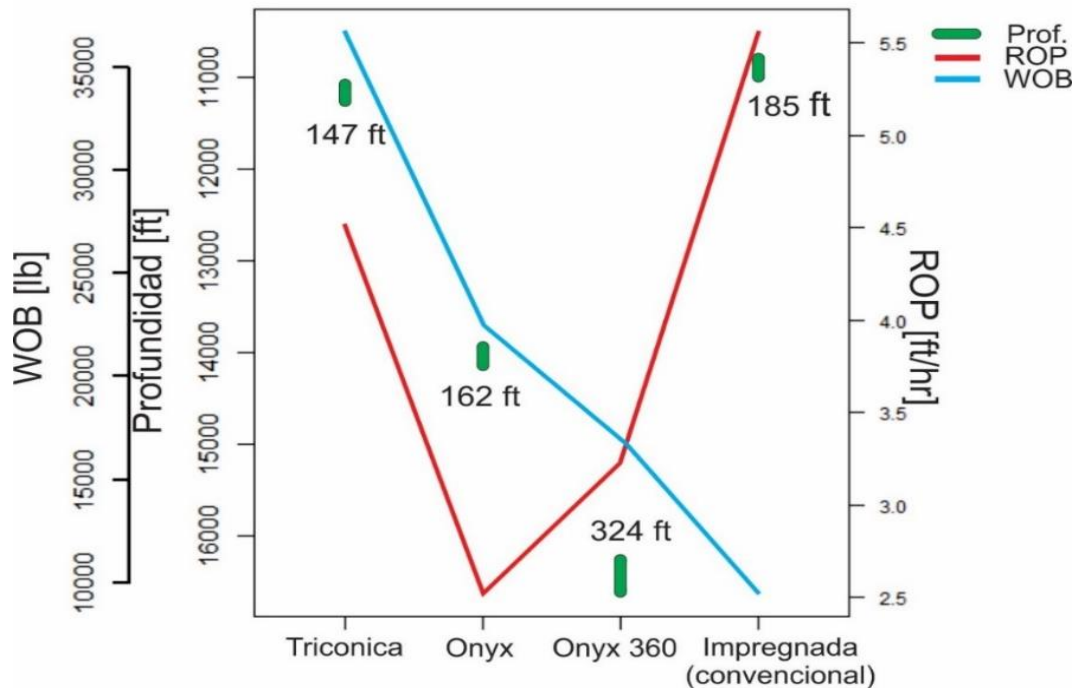


Figura 41. Comparación brocas de diámetro 8 ½ pulgadas. Tecnologías Onyx, Onyx 360, impregnada y triconica.

En esta sección el rendimiento de los cortadores giratorios es más que sobresaliente respecto a tecnologías más conservadoras, sacando una ventaja de más de 139 ft de diferencia a la broca que le sigue en rendimiento, la impregnada convencional. Otro punto importante para tener en cuenta es que, de los cuatro tipos de brocas referenciados en esta sección, fue la Sharc con cortadores Onyx 360 la que perforo el intervalo más profundo de todas las analizadas. Otra Onyx 360 en este mismo intervalo perforo 226 ft, pero a un ROP de 8.9 ft/h, siendo un valor excelente, esta corrida al final se detuvo por problemas en la rata de penetración final. Por su parte la broca Sharc con cortadores Onyx convencionales logro un footage moderado a un bajo ROP, mientras que la triconica tiene un rendimiento similar, pero a una ROP superior. La impregnada presenta un rendimiento bueno sobre todo en el apartado de ROP con un costo por pie perforado bajo, pero siendo en general la Onyx 360 y su tecnología de cortadores giratorios la que logra el mejor rendimiento.

**Consideraciones**

- Trece brocas Sharc con cortadores giratorios fueron corridas, 8 saliendo por problemas de rendimiento como rata de penetración, aunque su rendimiento promedio de estas brocas fue el mayor y con un buen margen respecto a las otras.
- Para la comparación se seleccionó la Sharc con cortadores Onyx convencionales que presento el mayor rendimiento, de estas se corrieron 16 brocas, en su mayoría sacadas por problemas ajenos a su desempeño.
- Las brocas triconicas tuvieron un rendimiento conservador o bajo, ya que de las 7 corridas la evaluada con 147 ft de footage fue la mejor con amplia diferencia, donde de las otras 6 triconicas ninguna llego a 100 ft, y solo 3 pasaron los 50 ft perforados.
- Se utilizaron 9 brocas impregnadas, solo tres salieron por problemas de rata de penetración o torque errático, pero estas últimas presentando un desgaste alto. Presentaron el ROP promedio más alto de toda la seccion.

*Tabla13.**Segunda comparación broca 8.5 pulgadas.*

<b>Tecnología</b>	<b>Genesis</b>	<b>Quantec</b>	<b>Impregnada</b>	<b>Talon</b>	<b>Vanguard</b>
<b>Tipo de broca</b>	---	Q408FX	HHDS132	TD408FX	VMD-DS44CDX2
<b>Numero de aletas</b>	---	8	N/A	8	3 Conos
<b>Material del cuerpo de la broca</b>	Carbono de tungsteno	Carbono de tungsteno	Carbono de tungsteno	Carbono de tungsteno	Acero
<b>Tamaño del cortador [mm]</b>	---	13	N/A	13	N/A
<b>Cortadores de Back Up</b>	---	Si	N/A	Si	N/A

<b>Boquillas</b>	3X10 5X12	3X10 5X12	6X12	8x12	3x16
<b>Dull Grade</b>	1-3-WT-S- X-I-PN- BHA	5-8-RO-A-X-I- BT-PR	7-3-CR-C-X- I-WT-BHA	2-3-WT-A- X-CT/HC- PR	5-8-RO-G- F-16-WT- PP
<b>Razón de salida</b>	Cambio del BHA	Rata de penetración	Cambio de BHA	Rata de penetración	Presión de bomba
<b>Profundidad de entrada [ft]</b>	12834	12115	14998	11663	15819
<b>Profundidad de salida [ft]</b>	13052	12425	15361	11926	16054
<b>Longitud perforada [ft]</b>	218	310	363	263	235
<b>Longitud perf. prom [ft]</b>	218	234	358	161	165
<b>Tiempo [horas]</b>	80.7	84.7	87.7	56.6	41.5
<b>ROP [ft/h]</b>	2.7	3.66	4.03	4.6	5.7
<b>ROP prom [ft/h]</b>	2.7	2.94	3.76	3.9	4.15
<b>WOB Min [lb]</b>	22000	14000	2000	5000	7000
<b>WOB Max [lb]</b>	35000	25000	21000	40000	35000
<b>Costo por pie [\$]</b>	2.747,39	1.974,84	2.053,15	1.752,28	1.805,81

<b>Genesis (base de cálculo)</b>	Quantec	Impregnada	Talon	Vanguard
<b>Aumento de la longitud perforada.</b>	42%	66%	21%	8%
<b>Aumento ROP</b>	35%	49%	70%	111%

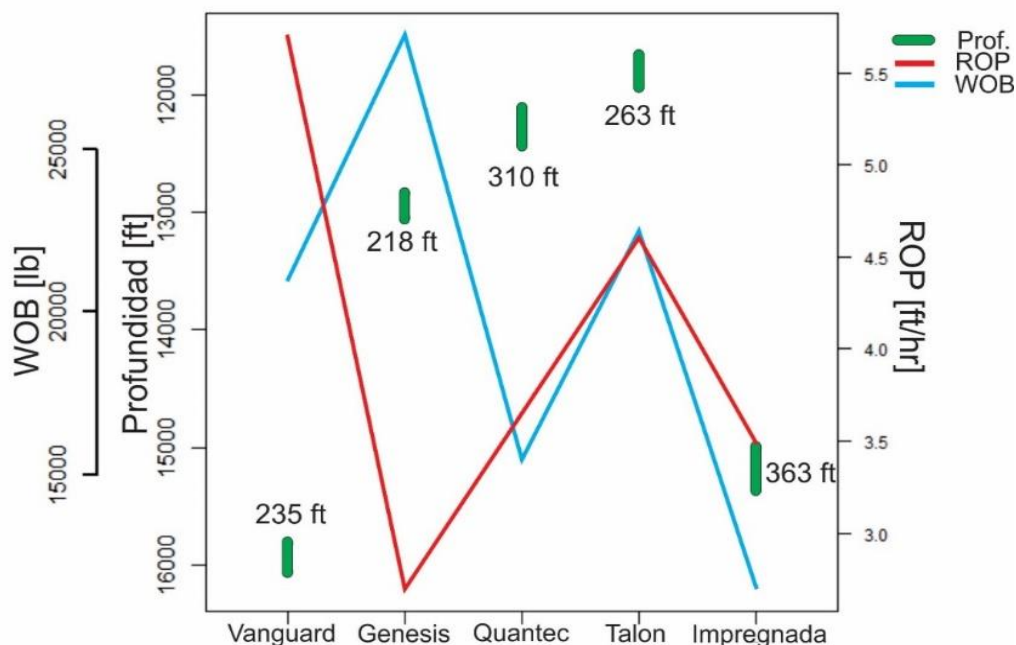


Figura 42. Comparación brocas de diámetro 8 ½ pulgadas. Tecnologías Vanguard, Genesis, Quantec, Impregnada y Talon.

Las brocas PDC Genesis y Talon presentan un desgaste moderado mientras que la Quantec según el dull grade tuvo un desgaste severo con los cortadores internos muy gastados y anillamiento en el cuerpo de la broca. De estas tres brocas la mejor es la Quantec, ya que supero a la Genesis con 42% y a la Talon con 18 % en footage. En cuanto a la broca triconica Vanguard, sufrió un gran desgaste, aun así perforo 235 ft, un poco más que la PDC Genesis y con la mejor ROP de las brocas comparadas en esta sección. Por último, la broca impregnada presenta coronamiento, es decir, pérdida del material impregnado en la parte del cono. Esta broca obtuvo la mejor longitud perforada con 363 ft superando a la mejor PDC en un 17%, a la triconica con 54% y con una ROP de 4.03 ft/h.

### Consideraciones

- Se corrieron 23 brocas de las cuales 9 fueron Quantec, 5 Vanguard, 4 impregnadas, 4 Talon y 1 Genesis por parte de Baker Hughes.

- En general las 4 brocas Talon corridas tuvieron un rendimiento bueno, solo una salió por problemas de presiones.
- La broca impregnada comparada obtuvo el mejor rendimiento a pesar de que perforo en uno de los intervalos más profundos con respecto a las demás brocas de esta sección.
- En cuanto a las brocas triconicas Vanguard, todas tuvieron muy buen rendimiento en un intervalo profundo. Aunque salen con un alto grado de desgaste todas en los insertos externos.

### 5.5 Diámetro de la broca: 6 pulgadas.

Tabla 14.

Primera comparación broca 6 pulgadas.

Tecnología	Onyx	Onyx 360	Triconica	Impregnada (Convencional)
<b>Tipo de broca</b>	MSi613WBPX	MDSiR613WQBPX	XR40YOD1PD	K505
<b>Numero de aletas</b>	6	6	3 Conos	N/A
<b>Material del cuerpo de la broca</b>	Carbono de tungsteno	Carbono de tungsteno	Acero	Carbono de tungsteno
<b>Tamaño del cortador [mm]</b>	13	13	N/A	N/A
<b>Cortadores Back Up de</b>	NO	NO	N/A	N/A
<b>Boquillas</b>	0.77 TFA	0.97 TFA	3x16	0.5 TFA
<b>Dull Grade</b>	1-2-WT-A-X-I-PN-PR	1-5-BT-A-X-I-CT-BHA	3-5-WT-A-E-I-BT-BHA	2-4-WT-A-X-I-PN-PR
<b>Razón de salida</b>	Rata de penetración	Cambio de BHA	Cambio de BHA	Rata de penetración
<b>Profundidad de entrada [ft]</b>	17792	17856	15700	15524

<b>Profundidad de salida [ft]</b>	18072	18099	15784	15777
<b>Longitud perforada [ft]</b>	280	243	84	253
<b>Longitud perf. prom [ft]</b>	152	181	56	253
<b>Tiempo [horas]</b>	91.4	59.27	21.6	73.8
<b>ROP [ft/h]</b>	3.1	4.1	3.9	3.4
<b>ROP prom [ft/h]</b>	2.3	3.19	2.5	3.4
<b>WOB Min [lb]</b>	5000	7000	10000	2000
<b>WOB Max [lb]</b>	13000	9000	15000	7000
<b>Costo por pie [\$]</b>	2.448,29	2.230,97	3.445,48	2.274,72

<b>Triconica (base de cálculo)</b>	Onyx	Onyx 360	Impregnada
<b>Aumento de la longitud perforada.</b>	233%	189%	201%
<b>Aumento ROP</b>	-20%	5%	-13%

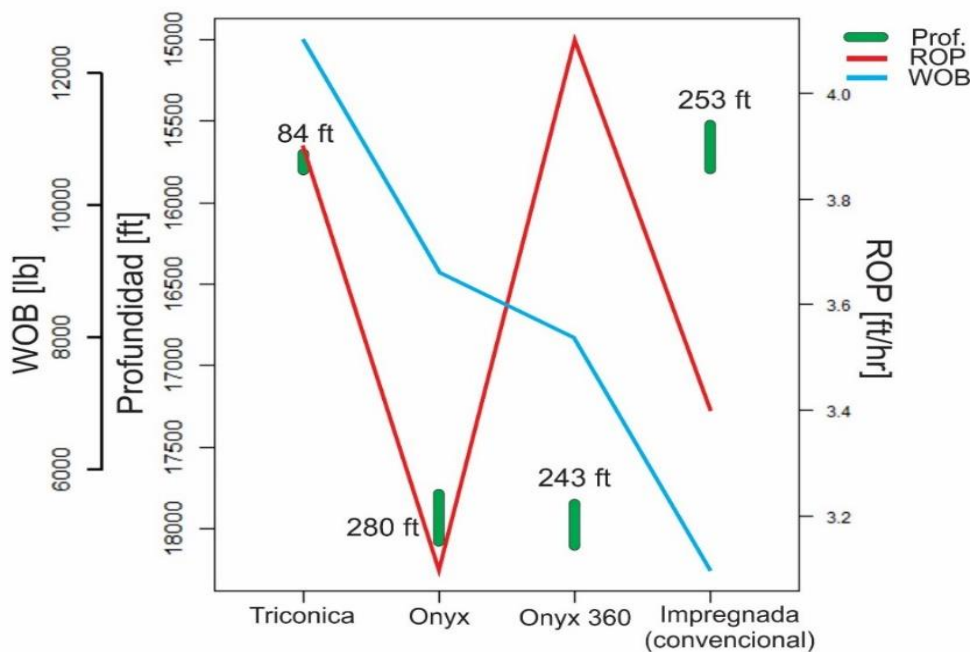


Figura 43. Comparación brocas de diámetro 6 pulgadas. Tecnologías Onyx, Onyx 360, Triconica e impregnada.

En la sección de 6 pulgadas la broca con el mejor desempeño es Sharc con cortadores Onyx convencionales, presentando un footage sobresaliente, aunque un ROP bajo. Al momento de sacarla se evidencia que sus cortadores mostraban un desgaste mínimo. Por su parte la triconica convencional elegida, siendo esta la mejor triconica de la sección, tiene un rendimiento muy modesto y un desgaste moderado, pero una velocidad de perforación elevada, inclusive mayor a la impregnada elegida a comparar. La broca de material impregnado tiene un rendimiento modesto en ROP, algo bajo para lo que se espera de una impregnada, pero un footage bueno y un desgaste bajo. Lo más importante de esta sección es respecto a los cortadores giratorios, ya que aunque queda por debajo del footage de la impregnada y la Sharc con cortadores Onyx convencionales, ninguna de las 5 Onyx 360 corridas en esta sección sale por problemas de rendimiento sino cuestiones externas, en su mayoría problema del BHA, siendo difícil predecir cuanto más pudo haber perforado, ya que la mejor Onyx 360 termina su corrida con 243 ft perforados y el ROP más alto de todas en la sección, 4.1 ft/h siendo además lograda esta velocidad en la mayor profundidad respecto a las otras brocas, sumando un desgaste moderado por lo que se puede inferir que pudo haber perforado mucho más y a una alta tasa de penetración. Además, cuenta con el menor costo por pie perforado de las brocas comparadas.

### **Consideraciones**

- Se empelan 5 Onyx 360, teniendo el mayor rendimiento promedio tanto en footage como ROP (considerando que el promedio de la impregnada se halla con solo una broca corrida), siendo impresionante esto ya que ninguna de las brocas con cortadores Onyx 360 termino su corrida por problemas de rendimiento, sino causas externas a la broca.
- Se corren 5 brocas Sharc con cortadores Onyx convencionales, saliendo 2 de estas por problemas de rata de penetración, presentando un desgaste normal en sus cortadores.

- De las 5 triconicas convenciones corridas solo dos brocas llegaron a los 80 ft perforados, las demás no superaron los 40 ft. El promedio de las triconicas en footage y ROP es de 56 ft y 2.5 ft/h, siendo valores muy modestos pero entendibles para una formación de la dureza de Mirador.
- Solo se dispuso de una broca impregnada en esta sección.

Tabla 15.

Segunda comparación broca 6 pulgadas.

<b>Tecnología</b>	<b>Quantec</b>	<b>Impregnada</b>	<b>Talon</b>
<b>Tipo de broca</b>	Q406HX	HH158	DP406X
<b>Numero de aletas</b>	6	N/A	6
<b>Material del cuerpo de la broca</b>	Carbono de tungsteno	Carbono de tungsteno	Carbono de tungsteno
<b>Tamaño del cortador [mm]</b>	13	N/A	13
<b>Cortadores de Back Up</b>	Si	N/A	SI
<b>Boquillas</b>	2X11 4X16	2x16 1x15	3x15
<b>Dull Grade</b>	2-3-BT-S-X-I-JD-PR	2-4-WT-S-X-I-CT-FM	5-6-CT-A-X-I-LT-PR
<b>Razón de salida</b>	Rata de penetración	Cambio de formación	Rata de penetración
<b>Profundidad de entrada [ft]</b>	15272	16829	15868
<b>Profundidad de salida [ft]</b>	15374	17120	16001
<b>Longitud perforada [ft]</b>	102	291	133
<b>Longitud perf. prom [ft]</b>	98	216	133
<b>Tiempo [horas]</b>	37.2	83.8	62.3
<b>ROP [ft/h]</b>	2.7	3.47	2.1

<b>ROP prom [ft/h]</b>	2.1	3	2.1
<b>WOB Min [lb]</b>	4000	2000	2000
<b>WOB Max [lb]</b>	16000	14000	20000
<b>Costo por pie [\$]</b>	3.766,96	2.195,34	3.937,18

<b>Quantec (base de cálculo)</b>	Impregnada	Talon
<b>Aumento de la longitud perforada.</b>	185 %	30%
<b>Aumento ROP</b>	28%	-22%

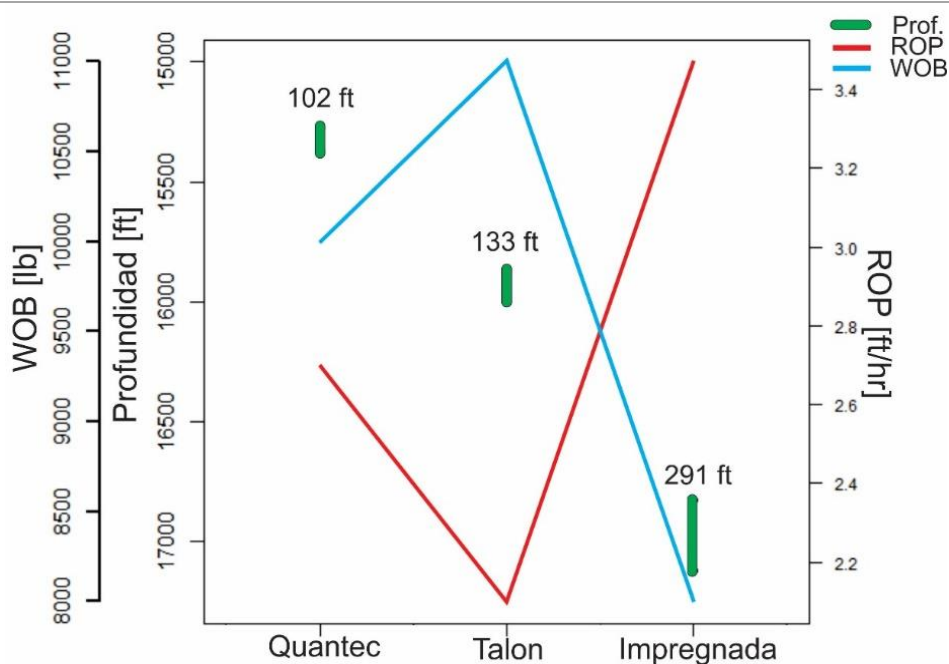


Figura 44. Comparación brocas de diámetro 6". Tecnologías Quantec, Talon e Impregnada.

De la tabla y grafica anterior podemos decir que la mejor broca PDC para esta sección es la Talon, pues supera a la Quantec con 30 % en longitud perforada a pesar de presentar un desgaste significativo en los cortadores internos y alto en los externos; cabe resaltar que la Quantec supera en ROP a la Talon. Al comparar estas dos brocas PDC con la impregna se puede evidenciar una vez más que esta ultima las supera tanto en longitud perforada como en ROP y con el menor costo por pie perforado de las tres brocas.

### Consideraciones

- La broca impregnada fue sacada porque hubo un cambio de formación por lo que podríamos decir que lograría un footage mayor en la misma formación, ya que tenía una ROP aceptable y el desgaste era medio bajo. Asimismo su rendimiento se dio en un ambiente de mayor profundidad respecto a las otras brocas.
- En cuanto a las brocas PDC, se corrieron 2 Talon con razones de salida por rata de penetración, 3 Quantec con un rendimiento muy parejo y desgaste medio en sus cortadores.

### 5.6 Gráficas de valores promedios

En las siguientes gráficas comparamos los promedios de rata de penetración y longitud perforada de cada una de las tecnologías descritas anteriormente, con el fin de evidenciar el comportamiento de estas a través de cada una de las secciones.

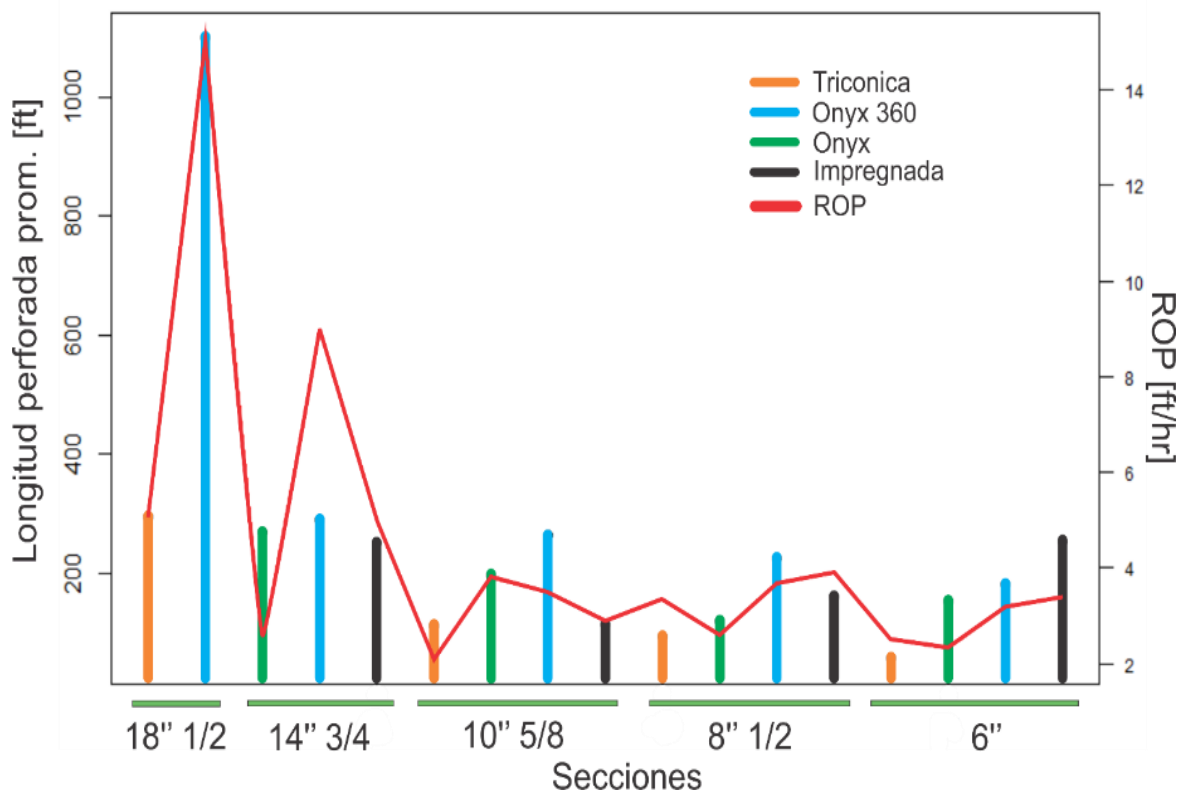


Figura 45. Comparación promedios de Footage y ROP.

De la anterior grafica podemos evidenciar que a medida el diámetro de la broca disminuye, así como con el aumento de la profundidad, el rendimiento de las brocas triconicas es cada vez menor, esto se debe posiblemente a que con mayor profundidad la formación exhibe mayores valores de compresibilidad y debido al mecanismo de corte que presentan este tipo de brocas se dificulta la perforación.

De las brocas PDC podemos observar que su rendimiento en cuanto a longitud perforada es también afectado por el aumento de profundidad, pero no tan drásticamente como sucede con las triconicas. También, es notable como la broca Sharc con cortadores Onyx 360 mantiene un rendimiento alto en cada una de las secciones, rendimiento que no se ven mermado por la mayor profundidad.

Las brocas impregnadas por su parte tienen un comportamiento muy variable a pesar de que en algunas secciones son brocas que logran una buena longitud perforada.

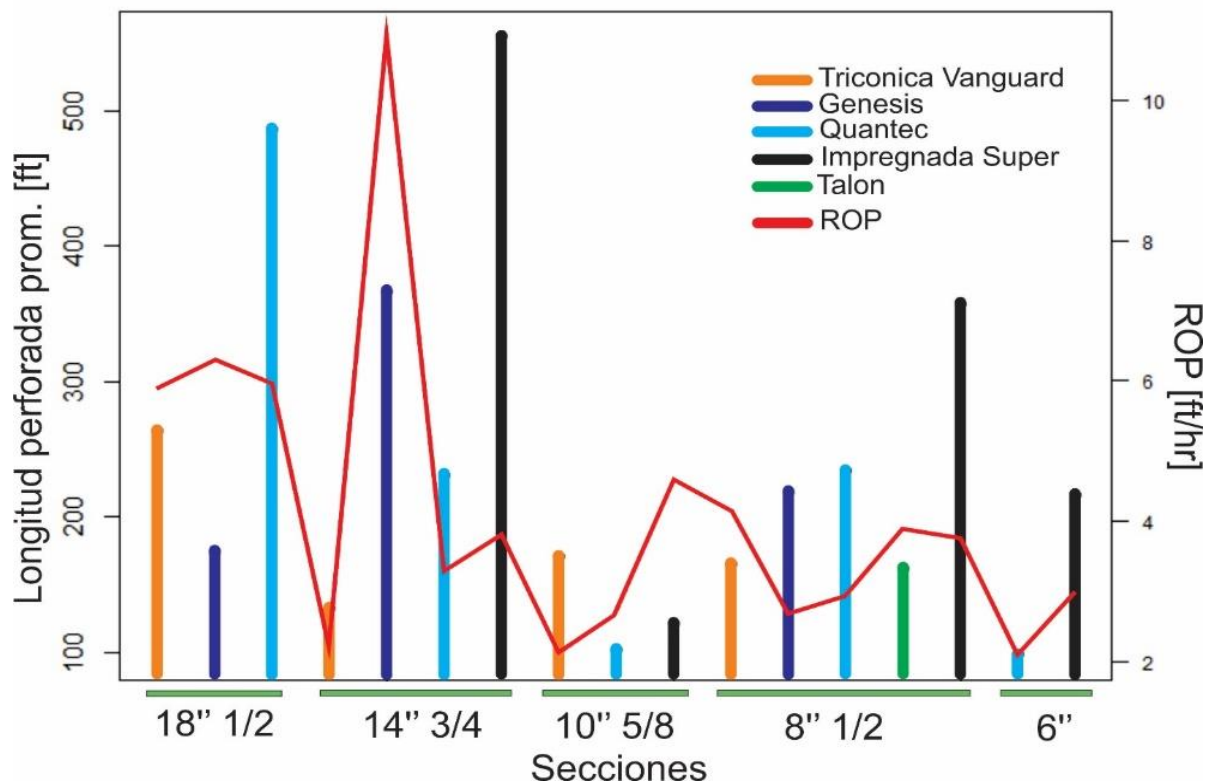


Figura 46. Comparación promedios de Footage y ROP.

Al analizar la gráfica anterior podemos observar que las brocas impregnadas tienen un rendimiento superior en longitud perforada en comparación con los demás tipos de brocas, a pesar de que esto no es una constante en todas las secciones. También, podemos observar como el comportamiento de las brocas PDC es muy variado estando desde los picos más altos hasta los más bajos. En cuanto a las triconicas podemos decir que tienen un buen rendimiento y un poco más estable de lo que lo hacen las demás brocas en las diferentes secciones.

## 6 Conclusiones.

- En este trabajo se puede evidenciar como las nuevas tecnologías en brocas diseñadas para la perforación de formaciones duras y abrasivas comparadas con las tecnologías convencionales han mostrado mejoras significativas en cuanto a rendimiento y vida útil, resultando en corridas más largas y en algunos casos con mayores tasas de penetración. Reduciendo la cantidad de brocas utilizadas y por lo tanto el número de viajes.
- Es importante señalar el avance que han tenido las brocas PDC al incorporar partes móviles en su estructura, contrario a lo que se creía convencionalmente como brocas de cortadores fijos. De acuerdo con las comparaciones hechas en este trabajo es notable la mejora tanto en longitud perforada como en tasa de penetración que presentan estos nuevos diseños con cortadores rotativos.
- El efecto de la dureza y abrasividad de la formación mirador se ve reflejado en algunas brocas comparadas, que tuvieron un desgaste significativo en su calibre. La mayoría de las nuevas tecnologías cuenta con diseños y materiales como el carburo de tungsteno, PDC o

el diamante policristalino térmicamente estables, que permiten soportar mejor las cargas, dureza, abrasividad y calor producido por la fricción para así poder construir un pozo en calibre.

- Se puede apreciar en las descripciones hechas en este trabajo cómo se trata de optimizar cualquier variable posible como cortadores, hidráulica, insertos, materiales del cuerpo de la broca entre otros, en el diseño de la broca, con el fin de permitir al operador desempeñar corridas más largas y si es posible a mayores tasas de penetración, siendo esto de alta importancia sobre todo en secciones de gran profundidad, donde un cambio de broca genera pérdidas considerables en materia de tiempo y costos para la empresa operadora.
- Se puede observar como la industria cada vez se inclina más por incluir brocas de avanzada para enfrentarse a formaciones de alta dureza y abrasividad, donde los tiempos de perforación aumentan drásticamente, esto se evidencia con el número de brocas convencionales corridas respecto al número de brocas de alta tecnología, donde cada vez son más estas últimas las empleadas para encargarse de formaciones como Mirador, especialmente en los intervalos más profundos y complejos.
- Se evidencia la diferencia que hay entre las brocas triconicas y las de cortadores fijos al perforar formaciones duras y abrasivas como Mirador, ya que a pesar de que las brocastriconicas no presentan un mal rendimiento si se ven superadas en la mayoría de secciones por brocas como las PDC o Impregnadas.
- En esta comparación tomando como referencia las dos empresas líderes en brocas a nivel mundial, se ve que en formaciones duras y abrasivas las brocas triconicas han pasado a un segundo plano, y siendo las brocas con cortadores fijos las que mejor desempeño tienen.

Además se puede apreciar que cada empresa prefiere un tipo de broca para enfrentar estas formaciones, una arrojando mejores resultados en brocas PDC y la otra en impregnadas.

- Se puede apreciar que, aunque las brocas con tecnología avanzada tienden a presentar un mayor precio respecto a tecnologías convencionales, su rendimiento superior hace que el costo por pie perforado sea inferior en la mayoría de los casos.

## **7 Recomendaciones.**

Se recomienda hacer un estudio de la factibilidad de crear un grupo orientado a investigar temas relacionados con el diseño y creación de herramientas concernientes a la perforación que permitan darle solución a problemas de nuestra industria colombiana, en el caso de las brocas para perforar formaciones duras y abrasivas como lo es la formación Mirador. Además de obtener conocimiento y desarrollar habilidades de los estudiantes de nuestra alma mater.

**REFERENCIAS**

Atkinson, G., Cline, W., y Cunningham, R. (29 de Enero de 1963). Estados Unidos Patent No. 3075781. Recuperado de:

<https://docs.google.com/viewer?url=patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US3075781.pdf>

Baker Hughes, (2005). *IADC dull grading system for fixed cutter bits*. USA.

Baker Hughes, (2008), Barrenas de diamante – PDC. En *Fundamentos de Barrenas de perforación* (pp. 57 – 94). EEUU: Baker Hughes.

Baker Hughes, (2008). Introducción completa a brocas de perforación. En *Fundamentos de Barrenas de perforación* (pp. 5 – 17). EEUU: Baker Hughes.

Baker Hughes, (2009). Vanguard premium tricone drill bits (Drilling and evaluation). *Baker hughes*. Recuperado de: <https://www.bakerhughes.com/products-and-services/drilling/drill-bit-systems/tricone-roller-cone-drill-bits/vanguard-tricone-roller-cone-drill-bits>

Baker Hughes, (2010). Quantec (Drilling and evaluation). *Baker hughes.com*. Recuperado de: <https://www.bakerhughes.com/news-and-media/resources/brochures/quantec-premium-pdc-drill-bits-brochure>

Baker Hughes, (2012). Talon 3D Vector-Accurate PDC bits (Overview). *Baker hughes*. Recuperado de:

[https://assets.www.bakerhughes.com/system/96599d804d94403e9215de5516d322ef/pdfs/pdf/36358\\_Talon3D\\_Overview\\_0812.pdf](https://assets.www.bakerhughes.com/system/96599d804d94403e9215de5516d322ef/pdfs/pdf/36358_Talon3D_Overview_0812.pdf)

Baker Hughes, (2013). Genesis general-Purpose PDC drill bit (Overview). *Baker hughes*. Recuperado de: <https://www.bakerhughes.com/news-and-media/resources/brochures/genesis-general-purpose-pdc-drill-bit-ov>

Baker Hughes, (2014). Irev impregnated diamond bits (Overview). *Baker hughes*. Recuperado de: [https://assets.www.bakerhughes.com/system/e0/48a5004a6f11e4b8a33385f826f833/38324.IRev\\_Overview\\_HiRes.pdf](https://assets.www.bakerhughes.com/system/e0/48a5004a6f11e4b8a33385f826f833/38324.IRev_Overview_HiRes.pdf)

Baker Hughes, (2014). StaySharp premium polished cutter technology (Overview). *Baker hughes*. Recuperado de: [https://assets.www.bakerhughes.com/system/96599d804d94403e9215de5516d322ef/pdfs/pdf/36359\\_StaySharp\\_Overview.03\\_10\\_.pdf](https://assets.www.bakerhughes.com/system/96599d804d94403e9215de5516d322ef/pdfs/pdf/36359_StaySharp_Overview.03_10_.pdf)

Besson, A., Burr, B., Dillard, S., Drake, e., Ivie, B., Ivie, C., Smith, R. y Watson, G. (2001). Bordes cortantes. *Oilfieldreview*, 38 – 63. Recuperado de: [https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield\\_review/spanish00/win00/p36\\_57.pdf](https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/spanish00/win00/p36_57.pdf)

Centala, P., Challa, V., Durairajan, B., Meehan, R., Páz, L., Partín, U., Segal, S. y Wu, S. (2011). Diseño de las barrenas: desde arriba hasta abajo. *OilfieldReview*, 23(2), 4-19. Recuperado de: [https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield\\_review/spanish11/sum11/01\\_bit\\_de\\_sign.pdf](https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/spanish11/sum11/01_bit_de_sign.pdf)

David R. Hall, D. G. (19 de Abril de 1988). Estados Unidos Patent No. 4738322. Recuperado de:

[https://www.google.com.co/patents/US4738322?dq=4738322yhl=esysa=Xyved=0ahUK  
EwiWmcC886rXAhWOZiYKHaEoDTToQ6AEIJDA](https://www.google.com.co/patents/US4738322?dq=4738322yhl=esysa=Xyved=0ahUKEwiWmcC886rXAhWOZiYKHaEoDTToQ6AEIJDA)

Durairajan, B., Azar, M., Burhsn, Y., Zhan, Y. (2014). Estados Unidos Patent. 20140124270.

Recuperado de: <https://www.google.com/patents/US20140326515>

Gómez, I. (2016). *Daño a las barrenas, su aplicación en la perforación y soluciones propuestas*

(Tesis de pregrado). Universidad nacional autónoma de México. Recuperado de:

<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/10401/Tesis.pdf?sequence=1>

Hedge, C., Daigle, H., Millwater, H., y Gray, K. The University of Texas, (2017), Analysis of Rate of Penetration (ROP). Prediction in Drilling Using Physics-based and Data-driven Models.

Heydarshahy, S., Karekal, S., Petroleum Exploration and Development (2017), Influences of Bit Profiles On Possible Fracture Modes.

Hughes, H. R. (1 de agosto de 1909). Estados Unidos Patent No. 930759. Recuperado de:

<https://docs.google.com/viewer?url=patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US930759.pdf>

International Association of Drilling Contractors (IADC). (2015). BITS (12 ed.). Houston, Texas,

Estados Unidos: (IADC). Recupera de:

<http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kt010SQJ82/iadc-drilling-manual/bi-bits>

Keshavan, M. K. (1992, Octubre 27). Estados Unidos Patent No. 5158148. Recuperado de:

<https://docs.google.com/viewer?url=patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US5158148.pdf>

Liu, S., Han, L., Zou, Y., Zhu, P., Liu, B., Journal of Materials Science y Technology (2016),

Polycrystalline diamond compact with enhanced thermal stability. Recuperado de:

doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmst.2017.03.014>

Lopez, N. (2009). *Obtención de muestras representativas de las rocas de los yacimientos petroleros* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Recuperado de:

<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/1107?show=full>

Richert, V., Brackin, V., Isbell, M., y Bobrosky, D. (2003). Estados Unidos Patent No. 6510906.

Recuperado de: <https://www.google.com/patents/US6510906>

Schlumberger. (2017). Rate of penetration. Recuperado de:

[http://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/r/rate\\_of\\_penetration.aspx](http://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/r/rate_of_penetration.aspx)

Smith, P., Browne, S., Heinz, T., Wise, W. y Baker Hughes. (1996). Drilling fluid design to prevent formation damage in high permeability quartz arenite sandstones. *Annual technical conference and exhibition held*. Society of petroleum engineers. Denver, Colorado.

Recuperado de: <https://doi.org/10.2118/36430-MS>

Scott, D. (2016). A bit of history: Overcoming early setbacks, PDC bits now drill 90%-plus of worldwide footage. *Drilling Contractor Anthology Series: DC DRILLBITS*, 85.

Smith Bits, (2016). ProductCatalog. *Smithbits*. Recuperado de:  
[https://www.slb.com/~media/Files/smith/catalogs/bits\\_catalog.pdf](https://www.slb.com/~media/Files/smith/catalogs/bits_catalog.pdf)

Smith Bits. (2010). *Sharc*. Recuperado de:  
[http://www.slb.com/~media/Files/smith/brochures/drill\\_bits/sharc.pdf](http://www.slb.com/~media/Files/smith/brochures/drill_bits/sharc.pdf)

Upton, R., Hooper, M., Portwood, G., Pyka, J., y Johnston, R. C. (27 de Abril de 1994). Estados Unidos Patent No. 2271794. doi:[https://doi.org/10.1016/1350-4789\(94\)90260-7](https://doi.org/10.1016/1350-4789(94)90260-7)

Whanger, J. R. (15 de Febrero de 1966). Estados Unidos Patent No. 3235316. Recuperado de:  
<https://www.google.com.co/patents/US3235316?hl=esydq=3235316>

William, L. (2016). Standard Handbook of Petroleum and Natural Gas Engineering ((3rd Edition) ed.). (G. L. Plisga, Ed.) Elsevier. Retrieved from  
<http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpSHPNGE09/standard-handbook-petroleum/standard-handbook-petroleum>

Yi, Z., Huang, Z., Li, T., Yachao, M., Chengsong, Q., Fuxiao, Z., Liang, G. (2014, Julio 18). Cone bit bearing seal failure analysis based on the finite element analysis. *Engineering Failure Analysis*, 45, 292 - 299. doi:<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.07.007>