

Efecto fluido dinámico de una nueva configuración de boquillas de una broca PDC sobre el diferencial de presión

Effect Dynamic Fluid of a new configuration of a nozzle of the bit PDC about the pressure differential

Kelly Jiménez¹, Wilson Carreño², Arlex Chaves-Guerreo³, Elizabeth Ayala⁴

¹ Grupo de Modelamiento de Procesos de Hidrocarburos, Universidad Industrial de Santander, Colombia.

Correo electrónico: kelly2208121@correo.uis.edu.co.

² Ecopetrol S.A., Colombia. Correo electrónico wilsonraul@gmail.com

³ Grupo de Investigación en Fenómenos Interfaciales, Reología y Simulación de Transporte, Universidad Industrial de Santander, Colombia.

⁴ Discovery&Watch Solutions

Recibido: 06 de abril, 2022. **Aceptado:** 06 de abril, 2022. **Versión final:** 01 de junio, 2022.

Resumen

Los costos operacionales asociados a la extracción de petróleo han tenido un aumento significativo durante los últimos 10 años. Sumado a lo anterior, se ha evidenciado una fluctuación en los precios de venta del crudo que ha representado un reto para las compañías al tener que buscar estrategias para mejorar el desempeño de todos los procesos involucrados en la explotación de hidrocarburos, entre los que se incluyen aspectos como la planeación y perforación del pozo (Amer *et al.*, 2017). Las investigaciones en materia de este campo tienen como principal objetivo reducir los tiempos de trabajo. Para esto, es necesario optimizar distintos parámetros de la operación de perforación como lo son el comportamiento del lodo, la integridad del pozo y el comportamiento de la broca para mejorar las tasas de penetración (ROP) (Mohammed *et al.*, 2018).

El desempeño de la broca es un factor clave en la mejora de la perforación y la reducción de los costos asociados. A través de modificaciones en el cuerpo, los cortadores o las boquillas con relación a las brocas convencionales, pueden alcanzarse comportamientos que bien podrían ser provechosos desde el punto de vista técnico y financiero. El presente estudio se centra en analizar el efecto de la modificación del ángulo de las boquillas de una broca PDC a través de la simulación del comportamiento del lodo utilizando dinámica computacional de fluidos. Los resultados arrojan que modificaciones de 90° en el ángulo de las boquillas logran reducir las presiones de salida de la broca al punto que se generan diferenciales de hasta 1200 psi entre la formación y la salida de las boquillas, permitiendo un estado de bajo balance entre la broca y las paredes del pozo contribuyendo al aumento de la ROP mediante la disminución en las restricciones que el lodo aporta al paso de la broca.

Palabras clave: dinámica computacional de fluidos; brocas; perforación; fluido no newtoniano; perforación sobrebalance; perforación bajo balance; perforación bajo balance dinámica.

Como citar: Jiménez, K., Carreño, W., Chaves, A., & Ayala, E. (2022). Efecto fluidodinámico de una nueva configuración de boquillas de una broca PDC sobre el diferencial de presión. *Revista Fuentes: El Reventón Energético*, 20(1), 7-19. <https://doi.org/10.18273/revfue.v20n1-2022002> 

Abstract

Operational costs associated with oil extraction have risen significantly over the past 10 years. In addition, it has been shown that oil price fluctuations have represented a challenge for oil companies that have to search for strategies to improve the performance of each process associated with hydrocarbon exploration, such as well planning and drilling (Amer et al., 2017). Research in this field aims to reduce drilling time. To achieve this goal the optimization of drilling parameters is necessary including mud behavior, well integrity, and bit performance to improve the rate of penetration (ROP). (Mohammed *et al.*, 2018).

Bit performance represents a key factor in drilling improvement and reduction of associated costs. Through modifications in the body, cutters, or nozzles, about conventional bits, better performance can be achieved from a technical and financial point of view. This study focuses on analyzing the effect of the modification of the nozzle angle for a PDC drill bit through the simulation of the mud behavior using Computational Fluid Dynamics. Results show that modifications of ninety degrees in nozzle angle manage to reduce the output pressures from the drill bit to differentials of up to 1200 psi; this has been generated between the formation and the outlet of the nozzles, allowing a low balance state between the drill bit and the well, which contributes to the increase of the ROP.

Keywords: Computational Fluid Dynamics, Drill Bit, Drilling, Non-Newtonian Fluid, Overbalanced Drilling, Underbalanced Drilling, Dynamic Underbalanced Drilling.

1. Introducción

La volatilidad de precios de los hidrocarburos demanda mejoras por parte de las compañías en los procesos asociados a la explotación, por lo tanto, se deben investigar alternativas para optimizar la operación en cualquiera de sus etapas. Para el caso concreto de la perforación, uno de los elementos más importantes en una sarta es la broca, debido a que es la encargada de causar la falla de la roca. Cualquier optimización de esta herramienta puede representar una disminución significativa de costos en todo el plan de perforación (Ayala *et al.*, 2017; Hamme, 2014).

La presión hidrostática de un pozo se define como la fuerza por unidad de área que ejerce la columna de lodo sobre sus paredes. Esta contribuye tanto a dar estabilidad al mismo, evitando que formaciones inconsolidadas o sobre presionadas colapsen, como a evitar patadas de pozo y reventones. Si la presión hidrostática de la columna de lodo es igual a la presión de la formación, el pozo se encuentra balanceado, si la presión de la formación es mayor que la presión generada por la columna del fluido de perforación, el pozo se encuentra en un estado de bajo balance, y si, por el contrario, la presión hidrostática generada por el lodo es mayor a la presión de formación, se habla de estado de sobrebalance (Lozano *et al.*, 2011; Robinson, 2010).

La perforación sobrebalance es conocida por ser económica y simple, sin embargo, presenta desventajas

como el alto daño a la formación y la reducida ROP (Rate Of Penetration) (Petitjean & Couet, 1994). En contraste, la perforación bajo balance minimiza el daño a la formación y logra una mayor ROP, aunque es costosa, compleja y no puede ser aplicada en muchos casos (Aadnoy *et al.*, 2009).

En la búsqueda de una nueva técnica que incorpore las ventajas y soslaye las desventajas de las técnicas actuales de perforación, Neiri *et al.* (2016) proponen la perforación bajo balance dinámica (DUBD por sus siglas en inglés). Los postulados afirman que, al modificar la orientación y el ángulo de las boquillas de una broca a un ángulo cercano a los 90 grados, en las zonas de alrededor y debajo de la broca, se presenta una caída de presión significativa, en comparación con casos de boquillas apuntando a la formación, dando como resultado que en la cara baja de la broca se presente una condición bajo balance. Luego, el fluido revierte su dirección y empieza a ascender por el anular, perdiendo velocidad e incrementando la presión, y, como consecuencia, el resto del pozo se mantiene en condiciones de sobrebalance.

En estudios previos de la técnica DUBD, Jiménez De la Ossa *et al.*, (2019) sin embargo, el alto daño a la formación y la reducida ROP (Rate Of Penetration) modificaron los ángulos de las boquillas (31.94° a 75.14°) respecto al flujo de una broca PDC. Los resultados de las simulaciones, mostrados en la figura 1 permiten concluir que, en una perforación

convencional, con esta broca en específico, el comportamiento observado fue similar al obtenido en la perforación del tipo sobrebalance, es decir, cuando el fluido de perforación choca con la formación, la velocidad del fluido disminuye abruptamente hasta cero. Sin embargo, en esta geometría, en la zona anular la velocidad no se pierde completamente, lo cual discrepa de un comportamiento sobre balance y podría ser un avance en pro a los postulados de la técnica DUBD.

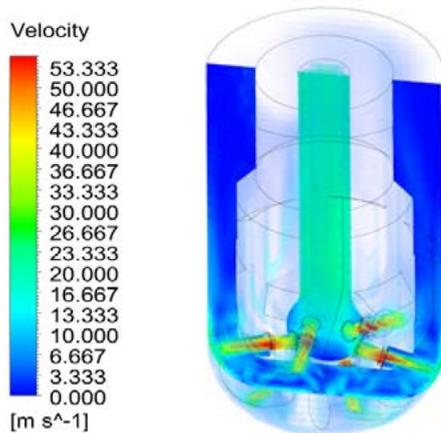
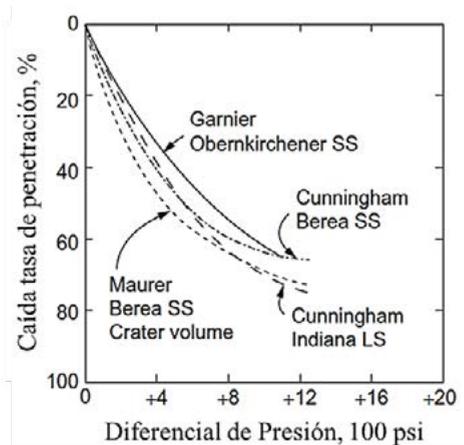
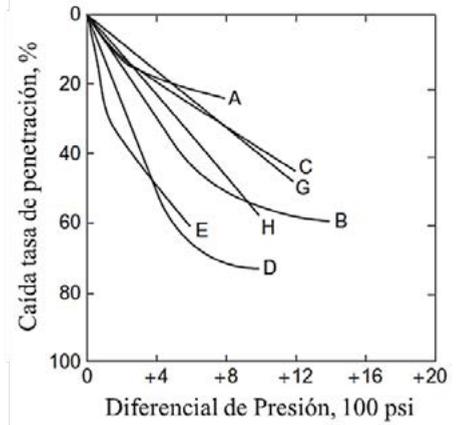


Figura 1. Resultados de velocidad para una broca PDC con ángulos de 75,14° en tres dimensiones. (Jiménez De la Ossa *et al.*, 2019)

Uno de los indicadores claves de la eficiencia del desarrollo de un plan de perforación es la velocidad a la que se perfora, por lo tanto, la tasa de penetración (ROP) ha sido una fuente de gran interés en los proyectos de I+D+i (Investigación, desarrollo e innovación) (Montes *et al.*, 2018). Para determinar el efecto del diferencial de presión sobre la tasa de penetración Murray & Cunningham (1955) realizaron estudios a escala de laboratorio, mientras que Vidrine & Benit (1968) realizaron investigaciones en campo concluyendo que la ROP es afectada significativamente por los cambios en el diferencial de presión generado por la interacción del lodo y la formación en fondo de pozo, teniendo esta un efecto inverso respecto al diferencial de presión: la ROP se ve reducida a medida que el diferencial de presión aumenta, dichos resultados se evidencian en la figura 2.



(a)



(b)

Figura 2. Efecto del diferencial de presión en la ROP. (a) Estudios de Laboratorio. (b) Estudios de Campo. (Caenn *et al.*, 2017).

MODELO MATEMÁTICO

Leyes de conservación

Los principios que rigen la dinámica de fluidos son las leyes de conservación de masa, momento y energía, las cuales se tratan a continuación:

Conservación de masa: establece que la tasa de cambio dentro de un volumen de control debe ser igual a la tasa neta de flujo de fluido a través de las superficies de un volumen de control de tamaño diferencial.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (2)$$

En la anterior ecuación, ρ es la densidad del fluido, \vec{v} es el vector velocidad y t representa el tiempo.

Siendo válida para ser utilizada en fluidos compresibles e incompresibles (ANSYS, Inc., 2009).

Conservación de momento: los cambios en el momento de un fluido en un volumen de control se deben al flujo neto en el volumen y la acción de fuerzas externas en el fluido. La conservación del momento se describe como:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = \\ -\vec{\nabla} P + \vec{\nabla} \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \end{aligned} \quad (3)$$

Donde P es la presión estática, $\vec{\tau}$ el tensor de esfuerzos, $\rho \vec{g}$ son las fuerzas gravitacionales y \vec{F} representa las fuerzas de cuerpo externas que interactúan con el cuerpo (Batchelor, 2000).

Conservación de energía: afirma que la energía total de un sistema cerrado permanece constante, del modo siguiente:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \vec{\nabla} \cdot (\vec{v} (\rho E + p)) = \\ -\vec{\nabla} \cdot \left(\sum_j h_j \vec{j}_j \right) + S_h \end{aligned} \quad (4)$$

Siendo E la energía específica interna, h la entalpía, el flujo de difusión y S_h la fuente térmica volumétrica (Hamne, 2014).

Modelo de turbulencia

La turbulencia es el movimiento inestable e irregular del fluido en el que las cantidades transportadas como masa y cantidad de movimiento fluctúan en el espacio y el tiempo. Cabe resaltar que las propiedades de un fluido homogéneo como su densidad y velocidad presentan variaciones aleatorias en donde es posible identificar la formación de remolinos. Teóricamente, todos los flujos turbulentos pueden simularse mediante la resolución numérica de las ecuaciones de transporte. El modelo de turbulencia implementado en las simulaciones del

presente trabajo es el *standard k - ε* el cual funciona resolviendo un modelo de dos ecuaciones de transporte que determina una longitud turbulenta para una escala de tiempo (Rodi, 2017).

Tratamiento mejorado de pared

El tratamiento mejorado de pared es un método de modelado cercano a la pared para la ecuación ϵ ($EWT - \epsilon$) que combina el desarrollo de un modelo de doble capa con las funciones de mejoramiento de pared. Si el mallado cercano a la pared es lo suficientemente fino como para que este pueda resolver la subcapa viscosa, entonces el tratamiento mejorado de pared se desarrollará de manera correcta (Sagaut, 2006). En el modelo de doble capa, la viscosidad en la región cercana a la pared es completamente resuelta por la subcapa viscosa. La aproximación de doble capa es una parte integral para el tratamiento mejorado de pared y es usado para especificar tanto ϵ como la viscosidad turbulenta en las celdas cercanas a la pared (Batchelor, 2000).

Modelo de doble capa para el tratamiento mejorado de pared:

en el modelo de doble capa, la viscosidad en la región cercana a la pared se resuelve completamente por la subcapa viscosa. La aproximación de doble capa es una parte integral para el tratamiento mejorado de pared y es usado para especificar tanto ϵ como la viscosidad turbulenta en las celdas cercanas a la pared.

Modelo numérico

La solución de las ecuaciones del modelo matemático ha sido implementada en ANSYS Fluent 18.2 por la aplicación del método de volúmenes finitos. El objetivo de este método es obtener un sistema de ecuaciones algebraicas por cada volumen de control del sistema. En el desarrollo de la solución, las variables se conservan a través de cada uno de los elementos. Así, cuando una cantidad sale de un volumen de control, la misma cantidad entra al siguiente volumen de control adyacente (Ochoa *et al.*, 2009; Xamán, 2016).

GEOMETRÍAS

Debido a la alta confidencialidad en los planos de las brocas de perforación por parte de las empresas fabricantes de estas, se recurre al uso de la librería GrabCAD, la cual es un entorno de colaboración gratuito donde diseñadores e ingenieros del mundo pueden compartir sus diseños asistidos por computadora (CAD). La geometría compartida por

Ekawira K. Napitupulu (2014) de 6 aletas y 6 boquillas se modificó a 9 aletas y 3 boquillas, esto para generar una geometría propicia a través de la cual el fluido pueda desplazarse por el cuerpo de esta cuando las boquillas tengan una inclinación de 90 grados (como se evidencia en la figura 3), esta broca tiene como finalidad ser la base para las simulaciones. En lo sucesivo, esta broca se referenciará como Base.

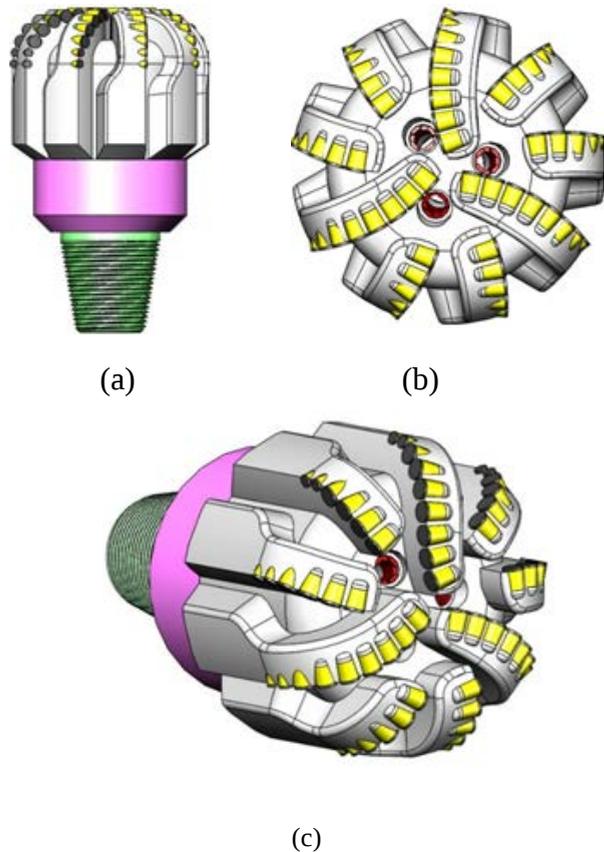


Figura 3. Vistas (a)frontal, (b)superior y (c)3D geometría Base

Para la generación del primer diseño, con la finalidad de generar un ángulo de noventa grados en el área de las boquillas, la salida de estas se desplazó hacia los lados. Las tres boquillas de la broca Base se modificaron como se muestra en la figura 4 y la geometría resultante puede ser observada en la figura 5. En adelante, esta broca será referenciada como BON.

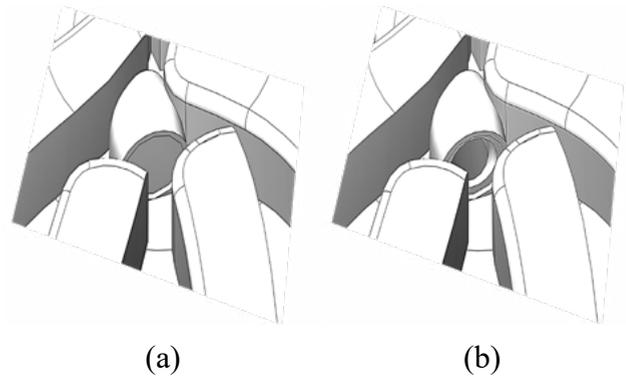


Figura 4. Creación boquillas de 90 grados (a) en la estructura (b) boquillas finalizadas.

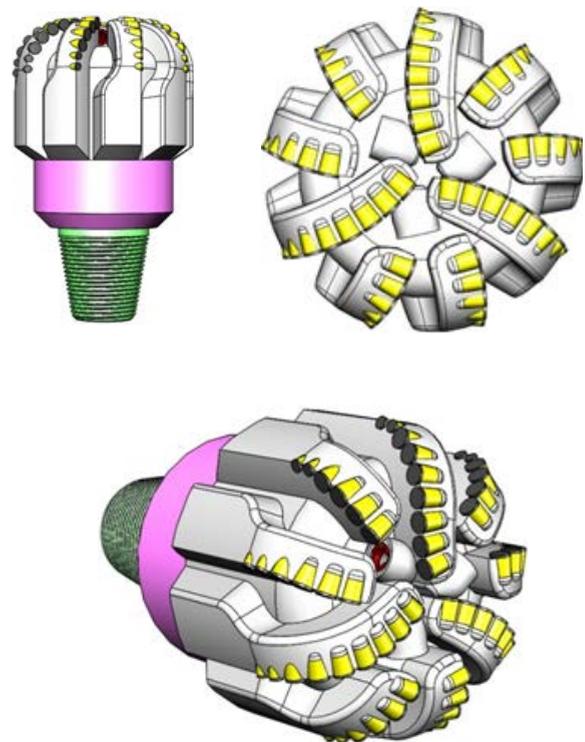


Figura 5. Vistas (a) frontal, (b) superior y (c) 3D geometría BON

Con la finalidad de garantizar la limpieza del pozo, se creó un nuevo diseño, en el cual se adicionaron tres boquillas apuntando directamente a la formación, como puede verse en la figura 6. En lo sucesivo, esta broca se referenciará como BONAT.

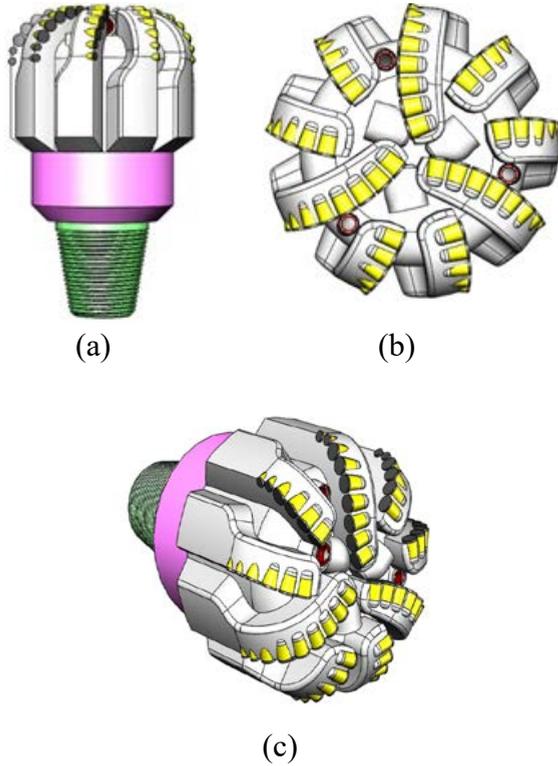


Figura 6. Vistas (a)frontal, (b)superior y (c)3D geometría BONAT

FLUIDO DE PERFORACIÓN

En este estudio, se utilizaron los datos de laboratorio de un lodo base agua con una densidad de 1340 kg/m^3 con las propiedades viscosas observadas en la figura 7.

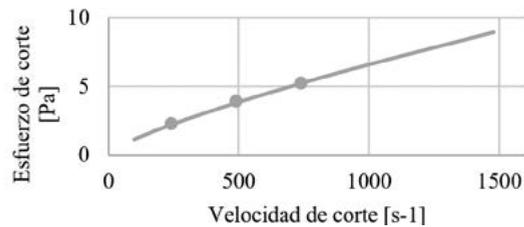


Figura 7. Gráfica Esfuerzo de corte vs. Velocidad de corte para el lodo de perforación utilizado para el estudio. (Welahettige *et al.*, 2020)

Asimismo, en la tabla 1 se observan con mayor claridad los datos obtenidos por Welahettige *et al.*, (2020) we model the 1-D Saint-Venant system of shallow water equations for water-based drilling mud (non-Newtonian), los cuales se tomaron a una temperatura constante de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ donde el valor crítico de la velocidad de corte fue 100 s^{-1} .

Tabla 1. Mediciones en laboratorio de Esfuerzo Velocidad de corte para el lodo de estudio.

Velocidad de corte (s^{-1})	Esfuerzo de corte (Pa)
245,2492933	2,2487959
492,9824051	3,8255985
741,5276956	5,2397349

Para el desarrollo de la simulación, el lodo de perforación, siendo un fluido no newtoniano, se modelará utilizando el modelo de Herschel-Bulkley, ya que este es el que más puede aproximarse al comportamiento reológico de la mayoría de los fluidos de perforación (American Petroleum Institute, 2001; Cárdenas *et al.*, 2013). Matemáticamente, este modelo es el siguiente:

$$\tau = \tau_0 + k\gamma^n \quad (5)$$

Donde τ simboliza el esfuerzo de corte, τ_0 el esfuerzo de cedencia necesario para iniciar el flujo, k el índice de consistencia, γ la velocidad de corte y n el índice de ley exponencial.

Al tomar los datos de τ y γ de la tabla 1 se puede crear un sistema de tres ecuaciones y tres incógnitas, como sigue:

$$245,2492933 = \tau_0 + k \cdot (2,2487959)^n \quad [1]$$

$$492,9824051 = \tau_0 + k \cdot (3,8255985)^n \quad [2]$$

$$741,5276956 = \tau_0 + k \cdot (5,2397349)^n \quad [3]$$

Cuya solución arroja como valores de $\tau_0=0,1 \text{ Pa}$; $k=0,0281$; $n=0,7882$; por lo tanto, el fluido de perforación de este estudio se puede modelar mediante la ecuación:

$$\tau = 0,1 + 0,0281 \cdot \gamma^{0,7882} \quad (6)$$

Las propiedades del fluido introducidos en el desarrollo de las simulaciones se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Características no newtonianas del fluido utilizadas en las simulaciones

Densidad (kg/m^3)	1340
Índice de consistencia, k	0,0281
Índice de ley exponencial, n	0,7882
Esfuerzo de cedencia, τ_0 (Pa)	0,1
Velocidad crítica de corte (1/s)	100

ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación, se presenta la prueba de independencia de malla, realizada para comprobar el número de volúmenes de control suficientes para correr las simulaciones y obtener una respuesta asertiva.

Prueba de independencia de malla

La variable escogida para realizar la prueba de independencia de malla fue el diferencial de presión, el cual fue medido en una recta ubicada a una altura de 65,79 cm con respecto al origen y separada simétricamente 3.30 cm del centro (ver figura 8). Se realizaron 7 mallas, empezando con un número de elementos de 1'286.843 (A) hasta llegar a 9'725.637 elementos (G), dicho refinado se muestra con mayor detalle en la tabla 3. El resultado de la prueba arroja que los valores de presión se estabilizan a partir de la malla E con 5'841.269 elementos tal como lo muestra la figura 10.

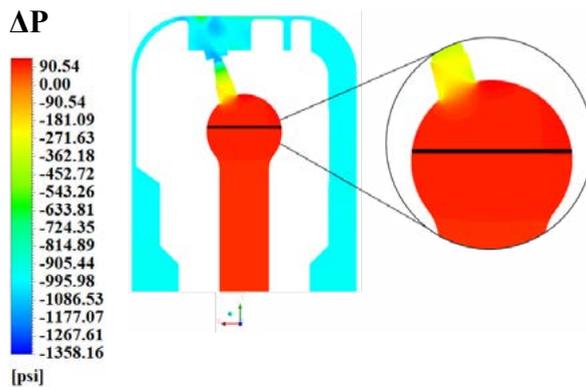


Figura 8. Variable y línea seleccionada para la prueba de malla

Tabla 3. Número de elementos de cada malla generada para la prueba

Malla	Número de elementos
A	1'286.843
B	2'003.471
C	2'820.589
D	4'027.085
E	5'841.269
F	8'241.085
G	9'725.637

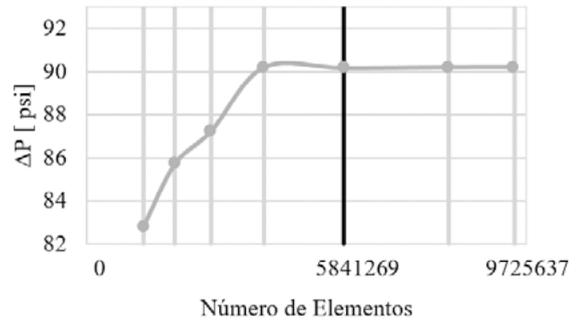


Figura 9. Prueba de malla

Para la simulación de la broca Base, se generó una malla tetraédrica con 5'841.269 elementos cuyos valores de ortogonalidad y oblicuidad promedios son 0,78358 y 0,21474, respectivamente (figura 8). Así mismo, para la broca BON se generó una malla tetraédrica con valores de 0,78131 y 0,21697 de ortogonalidad y oblicuidad, respectivamente, para una totalidad de 6'033.632 elementos, mostrada en la figura 9. Por otra parte, para la broca BONAT la malla tetraédrica generada cuenta con 6'213.835 elementos y los valores de ortogonalidad y oblicuidad promedios son 0,78070 y 0,21759, respectivamente figura 10. En los tres casos, se obtuvieron valores de una buena calidad en el enmallado de las brocas.

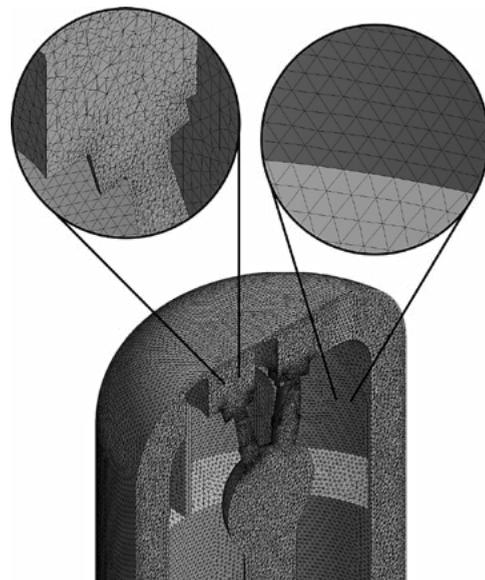


Figura 10. Malla tetraédrica para la geometría Base

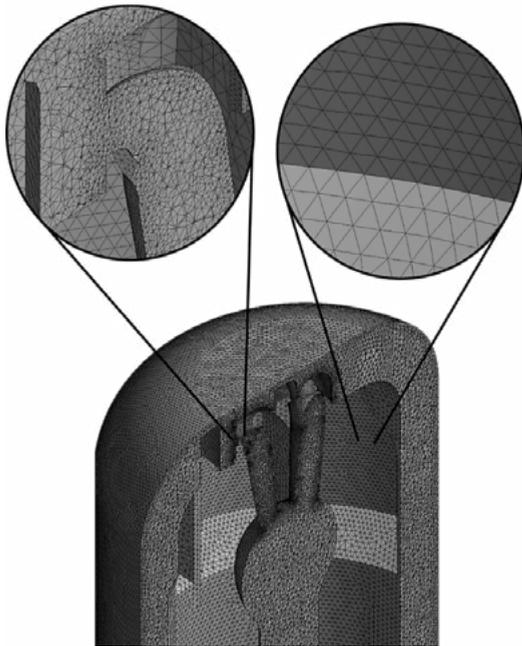


Figura 11. Malla tetraédrica para la geometría BON

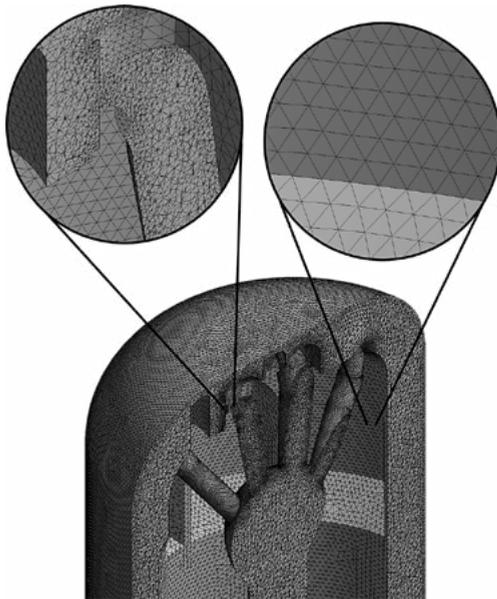


Figura 12. Malla tetraédrica para la geometría BONAT

Análisis comparativo de resultados

Seguidamente, se analiza el diferencial de presión y el patrón de flujo de la velocidad para los casos de estudio; los contornos observados en las siguientes gráficas se realizaron utilizando la herramienta CFD-

Post. Estos resultados corresponden a las simulaciones para cada una de las geometrías propuestas.

Broca Base: como se observa en la figura 13, la presión a lo largo de la tubería es constante, a medida que el fluido atraviesa las boquillas, ocurre una caída de presión significativa, debido a la disminución del diámetro por el cual atraviesa el fluido, siendo las boquillas un lugar donde se generan tres caídas de presión: Al entrar a las boquillas, al atravesarlas y en la salida. Al salir de estas, el fluido de perforación choca con la formación y la velocidad queda reducida a cero. Como resultado, la presión aumenta, justo como ocurre en una condición de sobrebalance.

En la figura 14, se observa con mayor claridad el diferencial de presión a diferentes alturas: la entrada de las boquillas se evidencia a una altura de 27 in, donde se ve la primera caída de presión (90 psi respecto a la presión del fluido en la tubería). A la altura de 29 pulgadas, cuando el fluido se encuentra atravesando las boquillas, se puede observar una segunda caída de presión de alrededor de 500 psi y, a una altura de 30 pulgadas, el fluido sale de las boquillas con una tercera caída de presión de aproximadamente 500 psi. Hasta este punto la caída de presión total del fluido es de alrededor 1100 psi.

Después, cuando el fluido de perforación choca con la formación a una altura de 31 pulgadas, se puede observar al lodo progresivamente recuperando toda la presión perdida y la caída de presión volviendo nuevamente a valores de 0 psi.

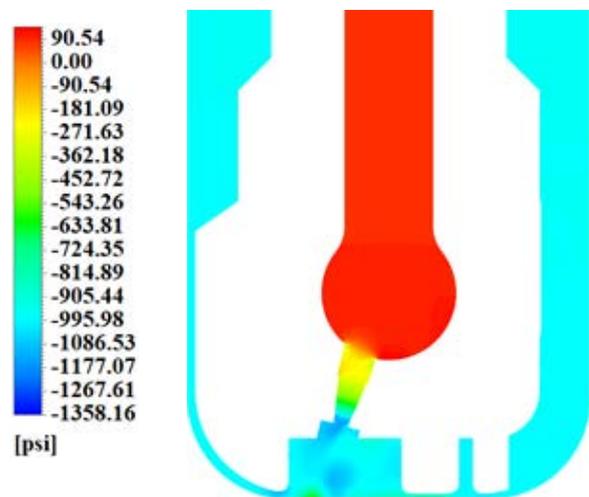


Figura 13. Diferencial de presión para la broca Base

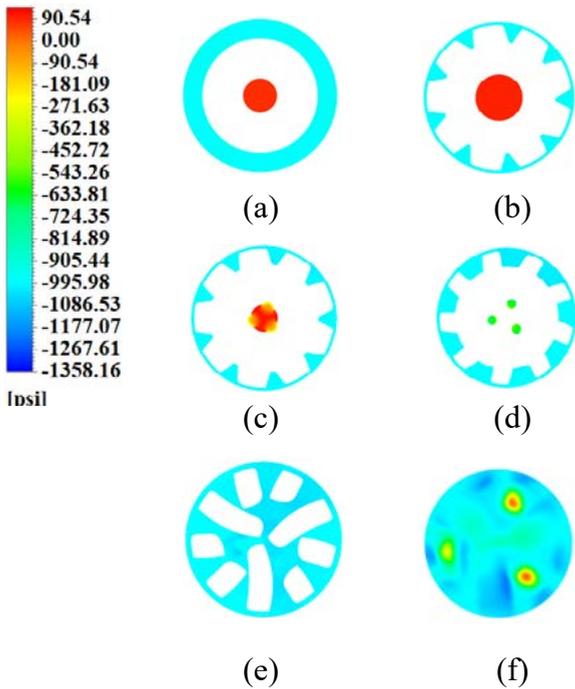


Figura 14. Diferencial de presión medido a (a) 23 in, (b) 25 in, (c) 27 in, (d) 29 in, (e) 30 in y (f) 31 in para la broca Base.

En la figura 15 se muestra con mayor claridad el patrón de velocidad que presenta el fluido donde se observa cómo la velocidad se pierde completamente en el área donde choca con la formación reduciéndose a cero a medida que el lodo sube por las paredes del pozo con un comportamiento lineal.

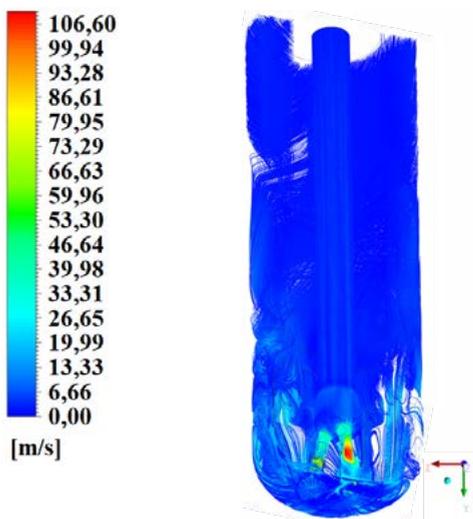


Figura 15. Velocidad para la broca Base

Broca BON: el comportamiento del diferencial de presión es presentado en la figura 16, donde se observa que la presión a lo largo del tramo de la tubería observado es casi constante. Cuando el diámetro disminuye, debido al recorrido del fluido hacia las boquillas, aparece una caída de presión. Al llegar a las boquillas, tres importantes caídas de presión tienen lugar: cuando el fluido entra, atraviesa y sale de las mismas, en este último punto, la caída de presión alcanza valores de 2000 psi. Al chocar con la formación, el lodo de perforación presenta un aumento en la presión, pero no es suficiente para que la caída de presión tome valores de 0 psi.

Para observar con mayor detalle el diferencial de presión se presenta la figura 17, cuyo comportamiento a diferentes alturas es el siguiente: la entrada de las boquillas se evidencia a una altura de 27 pulgadas, donde se observa una caída de presión de 130 psi respecto a la presión del fluido en la tubería. A la altura de 30 pulgadas, cuando el fluido se encuentra atravesando las boquillas, se puede observar una segunda caída de presión de alrededor de 400 psi y, a esa misma altura, debido a las boquillas tienen una inclinación de noventa grados, se evidencia una tercera caída de presión en la salida de estas de 1500 psi. En este punto, la caída de presión total del fluido es de aproximadamente 2000 psi. Después, cuando el fluido de perforación choca con la formación a una altura de 31 pulgadas, se puede observar que el fluido recupera cerca de 800 psi, por tanto, el diferencial de presión total cae hasta los 1200 psi.

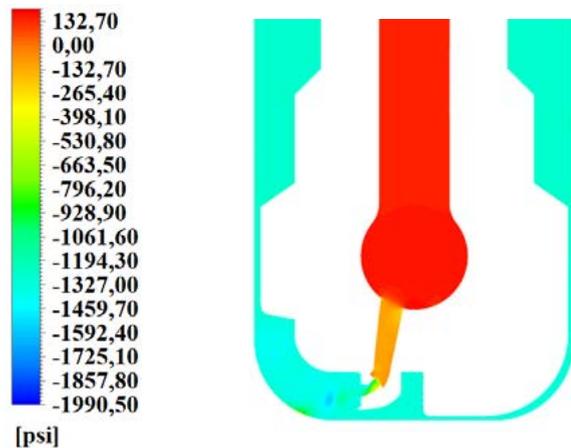


Figura 16. Diferencial de Presión para la broca BON.

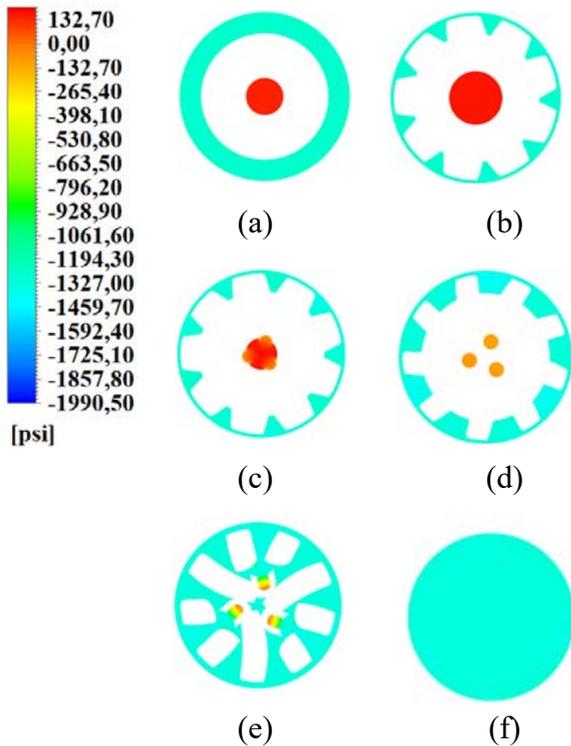


Figura 17. Diferencial de Presión medido a (a) 23 in, (b) 25 in, (c) 27 in, (d) 29 in, (e) 30 in y (f) 31 in para la broca BON.

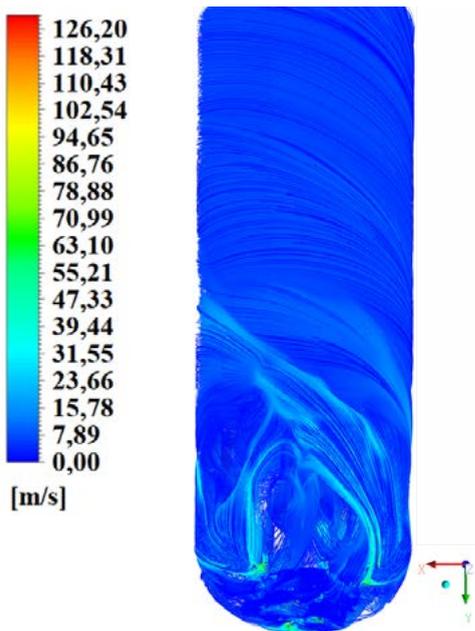


Figura 18. Velocidad para la broca BON

El patrón de velocidad para esa geometría difiere del comportamiento convencional: la velocidad no queda reducida a cero al chocar con la formación y

al subir por las paredes del pozo su velocidad se reduce parcialmente. Cabe resaltar que esta geometría presenta un patrón de flujo radial, el cual se observa en la figura 18.

Broca BONAT: Puede observarse en la figura 19 que la presión a lo largo del tramo de la tubería observado es casi constante. Al igual que con las anteriores, ocurre una caída de presión cuando llega a las boquillas. Igualmente, en esta broca también se observan las 3 caídas de presión cuando el fluido entra a las boquillas, cuando las cruza y a la salida, donde se alcanzan valores de 750 psi. Cuando el fluido choca con la formación, la presión aumenta, aunque, tal como en el caso de la broca BON, el diferencial no alcanza valores de 0 psi.

La figura 20 discretiza el diferencial de presión a diferentes alturas: el fluido entra a las boquillas a una altura de 27 pulgadas donde se observa la primera caída de presión de 50 psi. La segunda caída de presión para las boquillas que apuntan a la formación se ve a una altura de 29 pulgadas, con valores de 150 psi, mientras que, para las boquillas con inclinación de 90 grados, ocurre a una altura de 30 pulgadas donde hay caídas de 200 psi. A esta misma altura se encuentra la salida tanto de las boquillas inclinadas como de las convencionales, donde el diferencial de presión ronda valores de 750 psi. En este punto, el diferencial de presión total es aproximadamente 800 psi. A la altura de 31 pulgadas, el lodo choca con la formación y el fluido gana 300 psi, por tanto, el diferencial total de presión cae hasta 500 psi.

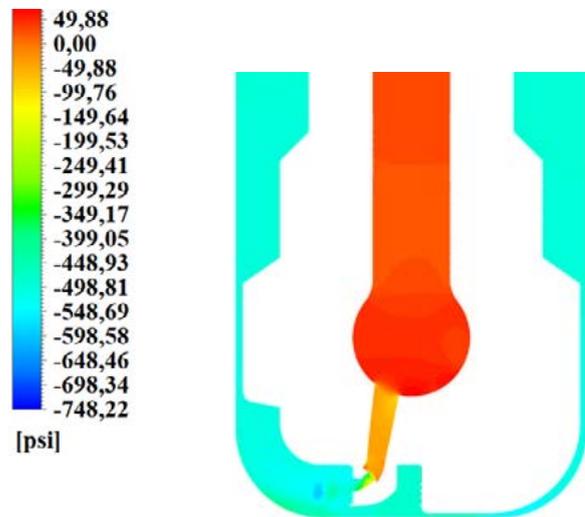


Figura 19. Diferencial de Presión para la broca BONAT

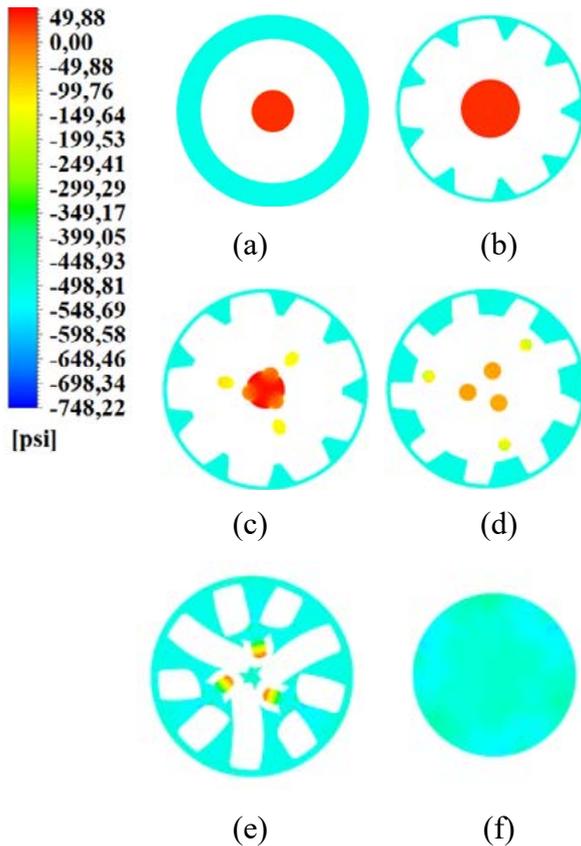


Figura 20. Diferencial de Presión medido a (a) 23 in, (b) 25 in, (c) 27 in, (d) 29 in, (e) 30 in y (f) 31 in para la broca BONAT.

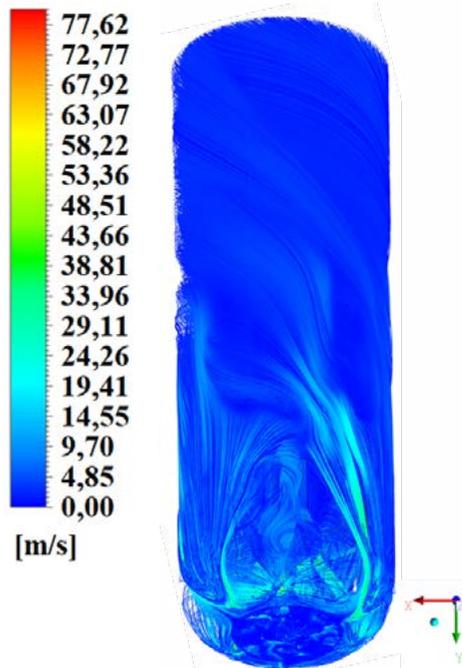


Figura 21. Velocidad para la broca BONAT

Debido a la adición de las tres boquillas apuntando a la formación, esta geometría presenta un comportamiento híbrido, con relación a los resultados mostrados anteriormente, tal como se muestra en la figura 21. Cuando el lodo choca con la formación su velocidad disminuye, pero no llega hasta 0 m/s. Al recorrer las paredes del pozo, presenta un comportamiento lineal en la zona alrededor de la broca, pero a medida que sube va tomando el comportamiento radial generado por la inclinación de noventa grados de las boquillas.

2. Conclusiones

Se describen las ventajas en términos de diferencial de presión, mejora en la ROP y velocidad de la adición de boquillas con ángulo de noventa grados a una broca PDC. Se plantean modificaciones en el diseño, mediante el uso de una herramienta CAD y el estudio de estos utilizando dinámica computacional de fluidos para una broca con 3 boquillas a 90° (BON), 6 boquillas de las cuales 3 apuntan a la formación y 3 a 90° (BONAT). Se observa que, cuando el fluido choca con la formación, en la broca Base el diferencial de presión vuelve a cero, siendo este un comportamiento sobrebalance, mientras que el diferencial de presión de la broca BON ronda los 1200 psi, lo cual replica los postulados de la técnica DUBD. Al añadir tres boquillas apuntando a la formación, tal como en la broca BONAT, se observa un comportamiento híbrido, entre perforación sobrebalance y DUBD, donde el diferencial de presión total presenta valores de 500 psi.

Aunque en las brocas BON y BONAT la caída de presión no aumenta al chocar con la formación, es importante resaltar que la presión diferencial permanece en valores alrededor de 1200 y 500 psi, respectivamente, lo cual conlleva a un aumento en la tasa de penetración.

Los postulados de la técnica DUBD afirman que el diferencial de presión alrededor y bajo la broca presentará valores 1000 psi por debajo de la presión que normalmente se genera en condiciones típicas de sobrebalance, al tener un ángulo de boquillas de noventa grados. Esto puede observarse al comparar las brocas Base y BON, donde ambos valores de diferencial distan entre sí unos 1200 psi.

Se recomienda continuar investigando en la técnica DUBD, alcanzable mediante el diseño de brocas, especialmente en la ubicación y ángulo de las boquillas. Adicionalmente, analizar los efectos posibles adversos

de la perforación bajo balance dinámica, tales como, eficiencia de limpieza de pozo, la posibilidad de aplicar la técnica en formaciones blandas y el control de la posible intrusión de fluidos al anular desde la formación perforada.

3. REFERENCIAS

- Aadnoy, B., Cooper, I., Miska, S., Mitchell, R. F., & Payne, M. L. (2009). *Advanced Drilling and Well Technology*. Society of Petroleum Engineers.
- Amer, M. M., Dahab, A. S., & El-Sayed, A.-A. H. (2017, abril 24). *An ROP Predictive Model in Nile Delta Area Using Artificial Neural Networks*. SPE Kingdom of Saudi Arabia Annual Technical Symposium and Exhibition. <https://doi.org/10.2118/187969-MS>
- American Petroleum Institute. (2001). *Manual de fluidos de perforación*. Dallas, Texas.
- ANSYS, Inc. (2009, enero 29). *ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide—8.4.5 Viscosity for Non-Newtonian Fluids*. ANSYS FLUENT User's Guide. <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node297.htm#fig-nn-hb>
- Ayala, D., Benítez, A., & Valencia, R. (2017). Optimización de la Tasa de Penetración mediante el análisis de las vibraciones al perforar, caso de estudio Ecuador. *Revista Fuentes, el reventón energético*, 15(1), 27-40. <https://doi.org/10.18273/revfue.v15n1-2017003>
- Batchelor, G. K. (2000). *An Introduction to Fluid Dynamics* (Cambridge Univ.Press). <http://adsabs.harvard.edu/abs/2000ifd..book.....B>
- Caenn, R., Darley, H. C. H., & Gray, G. R. (2017). Chapter 10—Drilling Problems Related to Drilling Fluids. En R. Caenn, H. C. H. Darley, & G. R. Gray (Eds.), *Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids (Seventh Edition)* (pp. 367-460). Gulf Professional Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804751-4.00010-9>
- Cárdenas, C. A., Sánchez Martínez, J. J., Ariza León, E., & Machuca Boada, W. (2013). Análisis reológico para predecir y mejorar el comportamiento hidráulico durante la perforación de un pozo. *Revista Fuentes, el reventón energético*, 11(1), Article 1. <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistafuentes/article/view/3613>
- Hamme, J. (2014). *CFD Modeling of Mud Flow around Drill Bit* [Lulea University of Technology]. http://www.academia.edu/15789875/MASTERS_THESIS_CFD_Modeling_of_Mud_Flow_around_Drill_Bit
- Hamne, J. (2014). *CFD Modeling of Mud Flow around Drill Bit*. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ltu:diva-49453>
- Jiménez De la Ossa, K. J., González Silva, G., Prieto Jiménez, N., & Saavedra, N. (2019a). *Análisis del efecto de una modificación en el ángulo de boquillas para una Broca PDC aplicando Dinámica de Fluidos Computacional*. Universidad Industrial de Santander.
- Jiménez De la Ossa, K. J., González Silva, G., Prieto Jiménez, N., & Saavedra, N. (2019b). *Análisis del efecto de una modificación en el ángulo de boquillas para una Broca PDC aplicando Dinámica de Fluidos Computacional*. Universidad Industrial de Santander.
- Lozano, V., Rivas Hoyos, D., Loza, J., Suárez, D., & Calderón, Z. (2011). METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE POZOS CANDIDATOS A PERFORAR EN CONDICIONES DE BAJO BALANCE. APLICACIÓN AL CAMPO CASTILLA DE ECOPEPETROL S.A. *Revista Fuentes, el reventón energético*, 9(2), Article 2. <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistafuentes/article/view/2615>
- Montes, A., Carreño, W., & Guío, M. (2018). Aspectos de la perforación de pozos complejos en piedemonte en tiempos de crisis. *Revista Fuentes, el reventón energético*, 16(1), 87-97. <https://doi.org/10.18273/revfue.v16n1-2018008>
- Murray, A. S., & Cunningham, R. A. (1955). Effect of Mud Column Pressure on Drilling Rates. *Transactions of the AIME*, 204(01), 196-204. <https://doi.org/10.2118/505-G>

- Neiri, E., H. M., Dahab, A. S. A., & Abdulaziz, A. M. (2016, enero 26). *The Dynamic Underbalanced Drilling: A New Drilling Technique*. SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition. <https://doi.org/10.2118/178153-MS>
- Ochoa, D. M., Vivas, J., & Santafé Rangel, E. R. (2009). USO DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF) PARA LA DETERMINACIÓN DE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES EN UN MODELO DE POZO. *Revista Fuentes, el reventón energético*, 7(1), Article 1. <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistafuentes/article/view/360>
- Petitjean, L., & Couet, B. (1994, enero 1). *Modeling of fracture propagation during overbalanced perforating*. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. <https://doi.org/10.2118/28560-MS>
- Robinson, L. (2010). Drill Bit Nozzle Pressure Loss. *AADE-10-DF-HO-26*. AADE Fluids Conference and Exhibition, Houston, Texas.
- Rodi, W. (2017). *Turbulence Models and Their Application in Hydraulics*. Routledge. <https://doi.org/10.1201/9780203734896>
- Sagaut, P. (2006). *Large Eddy Simulation for Incompressible Flows: An Introduction*. Springer Science & Business Media.
- Vidrine, D. J., & Benit, E. J. (1968). Field Verification of the Effect of Differential Pressure on Drilling Rate. *Journal of Petroleum Technology*, 20(07), 676-682. <https://doi.org/10.2118/1859-PA>
- Welahettige, P., Lundberg, J., Bjerketvedt, D., Lie, B., & Vaagsaether, K. (2020). One-dimensional model of turbulent flow of non-Newtonian drilling mud in non-prismatic channels. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 10(2), 847-857. <https://doi.org/10.1007/s13202-019-00772-9>
- Xamán, J. (2016). *Dinámica De Fluidos Computacional Para Ingenieros*. Palibrio.