

Análisis fluidodinámico del efecto de una modificación en el ángulo de boquillas para una broca de perforación sobre su velocidad de penetración

Kelly Jhoanna Jiménez De la Ossa

Ingeniera de Petróleos

Trabajo de grado para optar por el título de Magíster en Ingeniería de Hidrocarburos

Director

Wilson Raul Carreño Velasco

Magister en Diseño, Gestión y Dirección

Co-director

Arlex Chaves Guerrero

Ph.D. en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Maestría en Ingeniería de Hidrocarburos

Bucaramanga

2022

Dedicatoria

A Dios.

A Clifford, mi compañerito de vida, por estos 11 años de amor incondicional.

A mis padres: Carlos y Luz Mila, por su amor, trabajo y sacrificio todos estos años, por ser los principales promotores de mis sueños, por sus consejos y palabras de ánimo, es un orgullo y un privilegio ser su hija.

A mi mamita y mis abuelos, por todo su cariño, en ustedes siempre he podido encontrar tranquilidad e inspiración para luchar por cada uno de mis sueños y metas.

Sin su apoyo y afecto, nada de esto sería posible.

Agradecimientos

A Dios, por ser mi motor, fuerza y refugio cada día de mi vida.

A mis padres, Luz Mila y Carlos, no existen palabras para expresar toda la gratitud que siento hacia ustedes, han sido mi inspiración para despertarme cada día con ganas de alcanzar mis metas, gracias por amarme tanto y por brindarme la oportunidad de luchar por mis sueños, son los mejores padres que alguien pudiera tener, los amo con todo mi corazón.

A la familia Jiménez y a la familia De la Ossa, a mi Mamita y abuelito Phillips por su incondicional cariño y estar pendientes de mí en todo momento.

Al Ingeniero Wilson Carreño, por su orientación durante todo el desarrollo de esta investigación, gracias por creer en este proyecto y en mí.

A Juan Diego, gracias por estos años de sincera ayuda, por compartir conmigo alegrías, tristezas y nuevas experiencias, por tu apoyo académico y personal, saranghae.

A mis amigos Luis, Marco, Karen y Ángel, por animarme cuando no veía salida, gracias por estar disponibles siempre que los necesito, tienen un lugar muy especial en mi corazón.

A Luis Alejandro, por acompañarme durante esta travesía.

A cada persona que conocí en estos años y sería imposible mencionar en este apartado, gracias por estar presente en esta maravillosa etapa de mi vida.

A la Universidad Industrial de Santander, a la Escuela de Ingeniería de Petróleos, a todos mis docentes por contribuir en mi formación profesional y personal.

Tabla de Contenido

Introducción	15
1. Marco Teórico.....	17
1.1 Brocas de perforación utilizadas en la actualidad	17
1.1.1 Broca de conos rotantes.....	18
1.1.1.1 Brocas PDC.....	19
1.2 Técnicas de perforación en la industria petrolera.....	22
1.2.1 <i>Overbalanced Drilling</i> (OBD)	23
1.2.1.1 Comportamiento conceptual de la presión en una perforación sobrebalance	24
1.2.2 <i>Underbalanced Drilling</i> (UBD).....	24
1.2.3 <i>Dynamic Underbalanced Drilling</i> (DUBD).....	25
1.2.3.1 Comportamiento conceptual de la presión en una perforación bajo balance dinámica.....	28
1.3 Relación entre la Tasa de penetración y el Diferencial de presión	28
2. Modelo Matemático	32
2.1 Leyes de conservación	34
2.1.1 Ecuación de conservación de masa	34
2.1.2 Ecuación de conservación de momento	34
2.1.3 Ecuación de conservación de energía.....	35
2.2 Modelo de turbulencia.....	35

2.2.1	Ecuaciones de transporte para el modelo <i>standard k - ε</i>	36
2.3	Tratamiento mejorado de pared.....	37
2.3.1	Modelamiento de doble capa para el tratamiento mejorado de pared.....	37
2.4	Modelo numérico	37
2.4.1	Discretización Espacial	38
2.4.1.1	First-Order Upwind.	38
2.4.1.2	Second-Order Upwind.....	38
3.	Metodología	39
3.1	Identificación del problema.....	40
3.2	Preprocesamiento	40
3.2.1	Geometría	40
3.2.2	Mallado.....	47
3.2.3	Modelos físicos	54
3.2.4	Sustancias	54
3.3	Solver	56
3.4	Post-procesamiento	56
4.	Análisis de Resultados	56
4.1	Prueba de Independencia de Malla.....	57
4.2	Análisis comparativo de resultados.....	59
4.2.1	Broca Base.....	59

MODIFICACIÓN DE ÁNGULO DE BOQUILLAS PARA BROCA PDC	6
4.2.1.1 Diferencial de Presión	59
4.2.1.2 Velocidad	62
4.2.2 Broca BON	63
4.2.2.1 Diferencial de Presión	63
4.2.2.2 Velocidad	66
4.2.3 Broca BONAT.....	67
4.2.3.1 Diferencial de Presión	67
4.2.3.2 Velocidad	69
4.2.4 Broca BOMIX.....	71
4.2.4.1 Diferencial de Presión	71
4.2.4.2 Velocidad	74
5. Conclusiones.....	76
6. Recomendaciones	77
Referencias Bibliográficas	78

Lista de Tablas

Tabla 1. Calidad de elementos de la malla respecto a la Ortogonalidad y Oblicuidad, broca Base.	48
Tabla 2. Calidad de elementos de la malla respecto a la Ortogonalidad y Oblicuidad, broca BON.	48
Tabla 3. Calidad de elementos de la malla respecto a la Ortogonalidad y Oblicuidad, broca BONAT.....	48
Tabla 4. Calidad de elementos de la malla respecto a la Ortogonalidad y Oblicuidad, broca BOMIX.	49
Tabla 5. Mediciones en laboratorio de Esfuerzo Velocidad de corte para el lodo de estudio.	54
Tabla 6. Características no newtonianas del fluido utilizadas en las simulaciones	55
Tabla 7. Número de elementos de cada malla generada para la prueba	58

Lista de Figuras

<i>Figura 1.</i> Broca de conos rotantes y broca de cortadores fijos. Adaptado de Advanced Drilling and Well Technology. Richardson, TX: Society of Petroleum Engineers. Aadnoy, B., Cooper, I., Miska, S., Mitchell, R. F., & Payne, M. L. (2009).	17
<i>Figura 2.</i> Broca PDC. Adaptado de Advanced Drilling and Well Technology. Richardson, TX: Society of Petroleum Engineers. Aadnoy, B., Cooper, I., Miska, S., Mitchell, R. F., & Payne, M. L. (2009).....	19
<i>Figura 3.</i> ONYX 360, Cortadores que rotan 360° sobre su propio eje. Adaptado de Smith Bits Product Catalog. Schlumberger. (2018). Recuperado 11 de marzo de 2018, de https://www.slb.com/services/drilling/drill_bits/bits_catalog.aspx	20
<i>Figura 4.</i> Brocas impregnadas. Adaptado de Baker Hughes Drill Bits Catalog. Baker Hughes. (2014). Recuperado de https://books.apple.com/mx/book/baker-hughes-drill-bits-catalog/id926514651	21
<i>Figura 5.</i> (a) <i>Overbalanced Drilling</i> (b) <i>Underbalanced Drilling</i> . Adaptado de: (Oilfield Team, s. f.)	22
<i>Figura 6.</i> <i>Dynamic Underbalanced Drilling</i> . Adaptado de: (Oilfield Team, s. f.).....	26
<i>Figura 7.</i> Modificación propuesta. (a) Dirección convencional de las boquillas. (b) Orientación propuesta de las boquillas para redireccionar el flujo. Adaptado de El Neiri et al., (2016).....	26
<i>Figura 8.</i> Resultados de velocidad para una broca PDC con ángulos de 75,14° en (a) dos dimensiones (b) tres dimensiones. Adaptado de Jiménez De la Ossa et al., (2019).....	27
<i>Figura 9.</i> Estudios de laboratorio sobre el efecto del diferencial de presión en la ROP. Adaptado de (Caenn et al., 2017).....	29

<i>Figura 10.</i> Estudios de campo del efecto del diferencial de presión en la ROP. Tomado de (Caenn et al., 2017).....	30
<i>Figura 11.</i> Análisis del flujo de un fluido de perforación en una broca tricónica y PDC. Adaptado de Fundamentals of Drilling Engineering. Society of Petroleum Engineers. Mitchell, R. F., & Miska, S. (2011).	33
<i>Figura 12.</i> Metodología computacional. Adaptado de Simulación numérica de un separador gas-líquido tipo ciclón cilíndrico utilizando Dinámica De Fluidos Computacional. Cornejo Cáceres, J. S. Universidad Industrial de Santander. (2018).....	39
<i>Figura 13.</i> Vistas (a) frontal y (b) superior de la geometría creada por Napitupulu (2014)	41
<i>Figura 14.</i> Modificación propuesta por El Neiri et al., (2016). (a) Dirección convencional de las boquillas. (b) Orientación propuesta de las boquillas para redireccionar el flujo.	41
<i>Figura 15.</i> Primer paso: adaptación del número de aletas de (a) seis a (b) nueve.....	42
<i>Figura 16.</i> Segundo paso: modificación del número de boquillas de (a) seis a (b) tres... ..	42
<i>Figura 17.</i> Vistas (a)frontal, (b)superior y (c)3D geometría Base.	44
<i>Figura 18.</i> Creación boquillas de 90 grados (a) en la estructura (b) boquillas finalizadas.	44
<i>Figura 19.</i> Vistas (a)frontal, (b)superior y (c)3D geometría BON.	45
<i>Figura 20.</i> Vistas (a)frontal, (b)superior y (c)3D geometría BONAT.	46
<i>Figura 21.</i> Vistas (a)frontal, (b)superior y (c)3D geometría BOMIX.....	47
<i>Figura 22.</i> Malla tetraédrica de la geometría Base.....	50
<i>Figura 23.</i> Malla tetraédrica de la geometría BON.	51
<i>Figura 24.</i> Malla tetraédrica de la geometría BONAT.....	52

<i>Figura 25.</i> Malla tetraédrica de la geometría BOMIX.	53
<i>Figura 26.</i> Gráfica Esfuerzo de corte vs. Velocidad de corte para el lodo de perforación utilizado para el estudio. Adaptado de: 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. Welahettige, et al., (2020).	54
<i>Figura 27.</i> Variable y línea seleccionada para la prueba de malla	58
<i>Figura 28.</i> Resultados de velocidad a lo largo de la línea a evaluar, para las mallas — 3 mm; — 3.3 mm; — 3.5 mm; — 4 mm; — 4.5 mm; — 5 mm y — 6 mm	58
<i>Figura 29.</i> Prueba de malla	59
<i>Figura 30.</i> Resultados de Diferencial de Presión para broca Base en (a) dos dimensiones (b) tres dimensiones.	60
<i>Figura 31.</i> Diferencial de Presión a diferentes alturas de la broca Base.....	60
<i>Figura 32.</i> 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.....	61
<i>Figura 33.</i> Evolución del diferencial de presión al pasar por tres caídas de presión (1-3) y chocar con la formación (4) para la broca Base.....	62
<i>Figura 34.</i> Velocidad para la broca Base	62
<i>Figura 35.</i> Resultados de Diferencial de Presión para broca BON en (a) dos dimensiones (b) tres dimensiones.	63
<i>Figura 36.</i> Diferencial de Presión a diferentes alturas de la broca BON.	64
<i>Figura 37.</i> 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.	65

Figura 38. Evolución del diferencial de presión al pasar por tres caídas de presión (1-3) y chocar con la formación (4) para la broca BON.	65
Figura 39. Velocidad para la broca BON con vistas al (a) interior (b) anular.	66
Figura 40. Diferencial de Presión para la broca BONAT.	67
Figura 41. Diferencial de Presión a diferentes alturas de la broca BONAT.	68
Figura 42. 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.	68
Figura 43. Evolución del diferencial de presión al pasar por tres caídas de presión (1-3) y chocar con la formación (4) para la broca BONAT.	69
Figura 44. Velocidad para la broca BONAT con vistas al (a) interior (b) anular.	70
Figura 45. Diferencial de Presión para la broca BOMIX.	71
Figura 46. Diferencial de Presión a diferentes alturas de la broca BOMIX.	72
Figura 47. Diferencial de presión medido a (a) 23 in, (b) 25 in, (c) 27.5 in, (d) 28 in, (e) 29 in y (f) 31 in para la broca BOMIX.	72
Figura 48. Evolución del diferencial de presión al pasar por tres caídas de presión (1-3) y chocar con la formación (4) para la broca BOMIX.	73
Figura 49. Velocidad para la broca BOMIX con vistas al (a) interior (b) anular.	74
Figura 50. Evolución del diferencial de presión al pasar por tres caídas de presión (1-3) y chocar con la formación (4) para las brocas — Base; — BON; — BONAT y — BOMIX.	75

Nomenclatura

Símbolos	Nombre	Unidades
\vec{A}	Vector del área superficial	m^2
ε	Disipación de la energía cinética turbulenta	-
g	Gravedad	m/s^2
$Gk, Gb, YM,$ $C_2, C_{1\varepsilon}$	Constantes del modelo Estándar k- ε	-
I	Unidad tensor	-
k	Energía cinética turbulenta	m^2/s^2
ρ	Densidad	kg/m^3
\vec{r}	Vector desplazamiento	m
S	Fuente de cantidad de transporte por unidad de volumen	-
t	Tiempo	s
$\vec{\tau}$	Tensor de estrés	-
Γ	Coefficiente de difusión	-
μ	Viscosidad	-
∇	Operador diferencial vectorial	-
ν	Viscosidad cinemática	$Pa * s$
ν^T	Dilatación volumétrica	-
\vec{V}	Vector velocidad	m/s

Resumen

TÍTULO: Análisis fluidodinámico del efecto de una modificación en el ángulo de boquillas para una broca de perforación sobre su velocidad de penetración*

AUTOR: Kelly Jhoanna Jiménez De la Ossa**

PALABRAS CLAVES: Broca, PDC, Perforación, Sobrebalance (OBD), Bajo balance (UBD), Dynamic Underbalanced Drilling (DUBD), Dinámica de Fluidos Computacional (CFD).

DESCRIPCIÓN:

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. 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).

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 entonces 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 de fluidos computacional. 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 que contribuye al aumento de las ROP mediante la disminución en las restricciones que el lodo aporta al paso de la broca.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Wilson Raul Carreño Velasco, MSc. Codirector: Arlex Chaves Guerrero, PhD.

Abstract

TÍTULO: Fluid Dynamic analysis of the effect of a change in nozzle angle for a drill bit and the effect on the penetration rate *

AUTHORS: Kelly Jhoanna Jiménez De la Ossa **

KEYWORDS: Bit, PDC, Drilling, Overbalanced (OBD), Underbalanced (UBD), Dynamic Underbalanced Drilling (DUBD), Computational Fluid Dynamics (CFD).

OVERVIEW:

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. 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 rate of penetration (ROP).

Bit performance represents a key factor in drilling improvement and reduction of associated costs. Through modifications in the body, cutters or nozzles, in relation to conventional bits, a 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.

* Degree Project

** Physicochemical Engineering Faculty. Petroleum Engineering School. Director: Wilson Raul Carreño Velasco, MSc. Codirectors: Arlex Chaves Guerrero, PhD.

Introducción

Los costos operacionales asociados a la extracción de petróleo han tenido un aumento significativo durante los últimos 10 años, asimismo, la fluctuación del precio de este ha obligado a las compañías petroleras a buscar estrategias para mejorar el desempeño de cada proceso asociado al desarrollo de la perforación (Amer et al., 2017). Por este motivo, la investigación en este campo tiene como mayor objetivo reducir el tiempo de perforación del pozo y evitar costos innecesarios. La optimización de estos procesos es de gran importancia debido a que influyen en la duración del plan de trabajo, la productividad del mismo y, en consecuencia, podrían aumentar la rentabilidad de los proyectos de petróleo y gas (Mohammed et al., 2018).

Uno de los elementos más importantes en una sarta de perforación es la broca, debido a que es la encargada de romper la formación. En los costos totales de la perforación de un pozo representa alrededor del 5% y tiene un gran impacto en la ejecución del proyecto, por lo tanto, cualquier optimización de esta herramienta que permita mejorar la tasa de penetración, la cantidad de pies perforados en una corrida, la vida útil de la misma, entre otros, puede representar una significativa disminución de costos en todo el plan de perforación. (Hamme, 2014).

Cabe resaltar que, en el proceso de perforación, uno de los indicadores claves de la eficiencia en el desarrollo de este es la velocidad a la que se perfora, por lo tanto, la tasa de penetración (ROP) ha sido una fuente de gran interés en este campo. Un ROP más alto implica una perforación más rápida, lo cual representa un aumento significativamente positivo en la productividad de la creación del pozo y un mejor rendimiento del equipo de perforación (Hegde et al., 2017).

Gran parte del éxito de la perforación de un pozo petrolero depende del manejo de los fluidos de perforación los cuales se encuentran relacionados con la tasa de penetración, la integridad del pozo y la vida útil de la broca. El comportamiento fluidodinámico del lodo de perforación se puede estudiar mediante la Dinámica de Fluidos Computacional, CFD por sus siglas en inglés (*Computational Fluid Dynamics*), siendo una de las herramientas utilizadas para optimización de equipos más eficiente que permite el estudio del funcionamiento de sistemas relacionados con el flujo de fluidos, transferencia de calor y otros procesos físicos afines mediante simulación; trabaja solucionando ecuaciones de flujo de fluidos a través de una zona de interés, con condiciones específicas en una región definida. (Akhshik & Rajabi, 2018)

CFD es utilizado para disminuir tiempo y costos en experimentos complejos simulando los distintos escenarios posibles y permitiendo el análisis de todos los procesos fluidodinámicos envueltos en el mismo. En la Industria del Petróleo y Gas, CFD es empleado para simular la hidráulica de la broca en una perforación, optimizar la producción y transporte de hidrocarburos, predecir fallas de equipos, así como también el movimiento de plataformas *offshore* a causa de ondas irregulares del mar. (ANSYS Advantage Staff, 2018)

En este trabajo se analiza el comportamiento fluidodinámico de cuatro brocas PDC, cuyos ángulos de las boquillas fueron modificados por medio de una herramienta de diseño CAD, con la finalidad de determinar el efecto de la velocidad y el diferencial de presión del lodo de perforación en dichas variaciones y si estas configuraciones pueden generar un aumento en la tasa de penetración en fondo de pozo.

1. Marco Teórico

1.1 Brocas de perforación utilizadas en la actualidad

Uno de los elementos más importantes en una sarta de perforación es la broca, debido a que es la encargada de romper la formación. Cualquier optimización de esta herramienta que permita mejorar la tasa de penetración, la cantidad de pies perforados en una corrida, la vida útil de la misma, entre otros, puede representar una significativa disminución de costos en todo el plan de perforación (Hamme, 2014).

La perforación rotaria usa dos tipos de brocas: brocas de conos rotantes y brocas de cortadores fijos, tal como se muestra en la Figura 1. Las brocas de conos rotantes poseen uno o más conos que contienen cortadores, usualmente referidos como insertos, los cuales rotan alrededor del eje del cono a medida que la broca rota en el fondo del pozo. Las brocas de dientes de acero son típicamente usadas para perforaciones relativamente suaves, las brocas de inserto de carburo de tungsteno son usadas en un rango más amplio de formaciones, incluyendo las más duras y abrasivas (Mitchell & Miska, 2011).

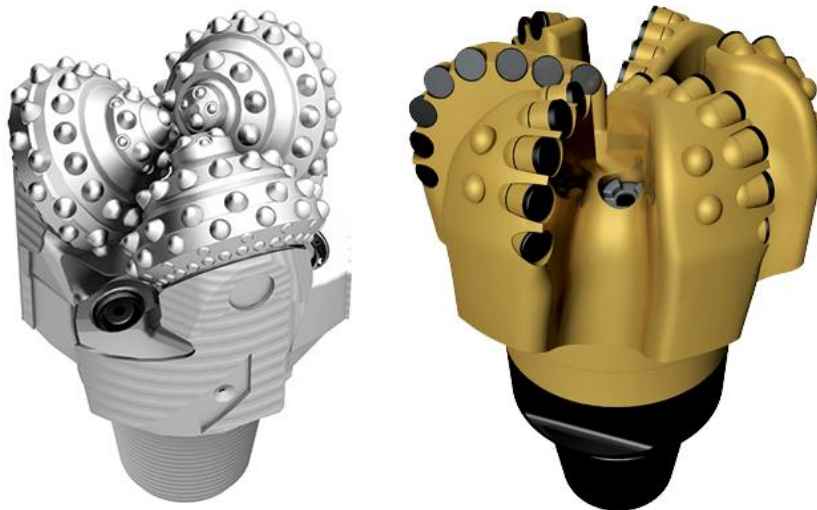


Figura 1. Broca de conos rotantes y broca de cortadores fijos. Adaptado de Advanced Drilling and Well Technology. Richardson, TX: Society of Petroleum Engineers. Aadnoy, B., Cooper, I., Miska, S., Mitchell, R. F., & Payne, M. L. (2009).

1.1.1 Broca de conos rotantes: Están clasificadas en brocas de diente fijo y brocas de insertos. En las brocas de dientes fijos, la estructura de los cortadores está fundida de acero en el cono; en cambio en las brocas con insertos, la estructura de cortadores son una serie de insertos presionados contra los conos. Estas brocas tienen una gran variedad de diseños y tipos de rodamientos con la finalidad de ser utilizadas para atravesar diferentes de tipos de formaciones.

La forma de los dientes de la broca también tiene un gran efecto en la perforación de una broca de conos rotantes así: dientes largos y espaciados uno de otro, son usados para perforaciones de formaciones blandas, a medida que la dureza de la formación aumenta, el tamaño y el espaciamiento de los dientes disminuye, esto principalmente para evitar romper los dientes (Ghosh et al., 2016; Hareland et al., 2009).

La mayor diferencia entre las brocas de cortadores fijos y las de conos rotantes radica en que las primeras no presentan partes móviles, lo cual es una ventaja, especialmente en pozos pequeños donde el espacio no está disponible para los conos o sistemas de rodamiento con la estructura de dientes apropiada.

1.1.2 Broca de cortadores fijos: Están categorizadas bajo dos grandes grupos: brocas PDC (*Polycrystalline Diamond Compact*), las cuales rompen la roca a través de un proceso de corte y las brocas de diamante hechas de material impregnado y diamante natural que rompen la roca a través de un proceso de tritura (Jaffar et al., 2005). Las brocas de cortadores fijos, incluyendo PDC, impregnadas, y brocas de diamante, pueden perforar una extensa gama de diferentes formaciones a diferentes profundidades. Todas las brocas con cortadores fijos consisten en hojas integradas al cuerpo de la broca que rotan como una sola unidad.

1.1.1.1 *Brocas PDC*: Las brocas PDC convencionales, como la mostrada en la Figura 2, no tienen partes móviles, es decir, no están formadas por rodamientos. El mecanismo de perforación de la roca de una broca PDC es de corte. Romper la roca por acción de corte requiere menos energía que otros mecanismos como el de conos rotantes donde la roca es triturada, por lo tanto, menos WOB puede ser aplicado, aunque mayores velocidades de rotación son requeridas (Bybee, 2005).



Figura 2. Broca PDC. Adaptado de Advanced Drilling and Well Technology. Richardson, TX: Society of Petroleum Engineers. Aadnoy, B., Cooper, I., Miska, S., Mitchell, R. F., & Payne, M. L. (2009).

Las brocas PDC emplean un gran número de cortadores, llamados “cortadores PDC”. El cortador de una broca PDC se construye uniendo una capa de diamante artificial policristalino a un compuesto cementado de carburo de tungsteno bajo muy alta presión y temperatura. La capa de diamante está usualmente compuesta de numerosas partículas de diamante puestas en una orientación al azar para de esta manera lograr la máxima fuerza y resistencia a la fricción (Yahiaoui et al., 2013).

La aplicación de las brocas PDC se ha ido expandiendo a la perforación de entornos difíciles gracias a la introducción de nuevos diseños de dicha herramienta, tal como la inclusión de cortadores que rotan 360° sobre su propio eje, conocidos como ONYX 360 presentados en la Figura 3, los cuales han ayudado a mejorar la eficiencia de la perforación y extender la vida de la broca.



Figura 3. ONYX 360, Cortadores que rotan 360° sobre su propio eje. Adaptado de Smith Bits Product Catalog. Schlumberger. (2018). Recuperado 11 de marzo de 2018, de https://www.slb.com/services/drilling/drill_bits/bits_catalog.aspx

Las brocas con los cortadores ONYX 360, permiten que todo el borde de diamante sea utilizado en la perforación de la formación, a diferencia de la porción de circunferencia que es utilizada en las brocas PDC convencionales. La acción de rotación de los cortadores de diamante permiten que estos permanezcan mucho más tiempo afilados respecto a una broca PDC con cortadores fijos, de hecho, al hacer la comparación entre éstas, las brocas que incluyen los cortadores ONYX 360 han aumentado los pies perforados en un 57%, lo cual resulta en menos corridas de brocas y la disminución de los costos de perforación (Schlumberger, 2014).

1.1.1.2 Brocas Impregnadas: Las brocas impregnadas, como las mostradas en la Figura 4, están conformadas por una matriz de carburo de tungsteno donde están incorporados diamantes sintéticos. Estas brocas actúan esmerilando la broca, es decir, los diamantes de corte están contenidos en la matriz que opera a velocidades periféricas muy altas, por lo que la matriz tiene que desgastarse ante la abrasividad de la roca para exponer nuevos cristales de diamante (Baker Hughes, 2014).



Figura 4. Brocas impregnadas. Adaptado de Baker Hughes Drill Bits Catalog. Baker Hughes. (2014). Recuperado de <https://books.apple.com/mx/book/baker-hughes-drill-bits-catalog/id926514651>

Debido a su mecanismo de perforación, estas requieren altas revoluciones para compensar la pequeña profundidad de corte y generar ROPs económicas. El número y tamaño de los diamantes impregnados en la broca dependen de la dureza de la formación a ser perforada: para formaciones duras, se utilizan brocas con muchos cortadores pequeños, mientras que, para formaciones blandas las brocas presentan pocos cortadores de mayor tamaño.

El mecanismo de corte generado por las brocas impregnadas es por fricción o abrasión mecánica, por este motivo son utilizadas en formaciones muy abrasivas y con alta dureza y son poco eficientes en formaciones plásticas. (Smith International, 2002)

Las características y constitución del diseño de una broca de insertos fijos incluyen el número y forma de las hojas y el tipo estructural del cuerpo de la broca. En adición, estas brocas son caracterizadas por la forma y el tamaño de sus cortadores, la metalúrgica y los tamaños y ubicaciones de las boquillas (Karpushin, 2005).

1.2 Técnicas de perforación en la industria petrolera

La presión hidrostática de un pozo es la presión que ejerce la columna de lodo sobre las paredes de este, dando estabilidad al hueco, evitando que formaciones poco consolidadas o sobre presionadas caigan dentro del pozo, así como ayuda a evitar patadas de pozo y reventones. Si la presión hidrostática es igual a la presión de la formación el pozo se encuentra balanceado, para que exista un sobrebalance, la presión hidrostática que genera el lodo de perforación debe ser mayor a la presión de la formación. Ahora bien, siendo el caso contrario, donde la presión de la formación es mayor que la presión generada por la columna del fluido de perforación el pozo se encuentra bajo balance lo que permite que haya influjo de los fluidos de la formación al pozo, tal como en la Figura 5.

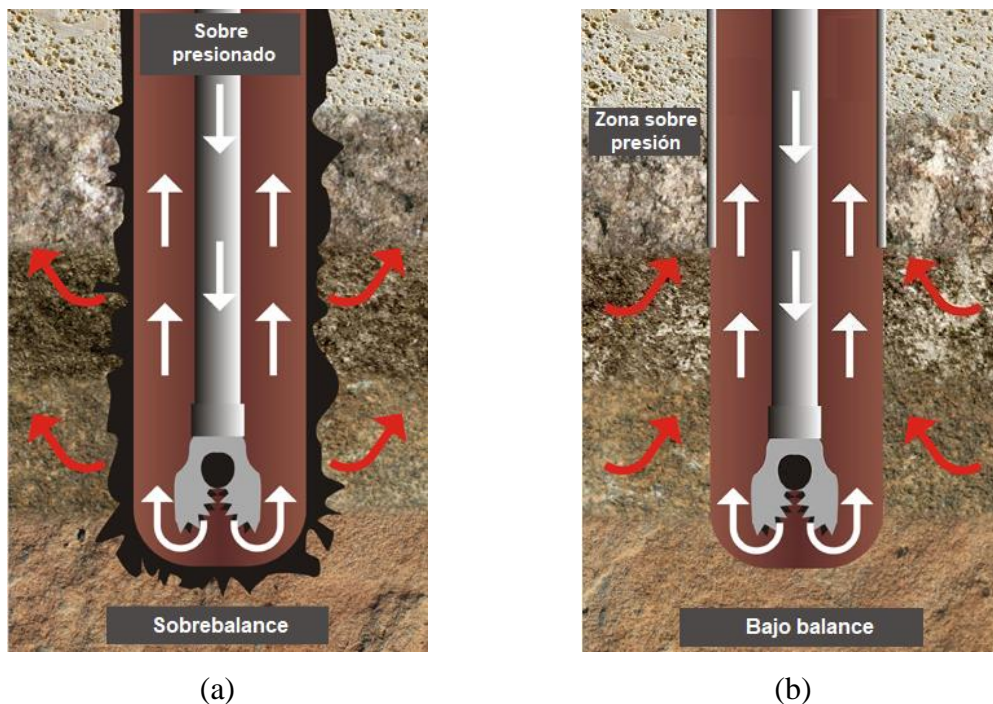


Figura 5. (a) *Overbalanced Drilling* (b) *Underbalanced Drilling*. Adaptado de: (Oilfield Team, s. f.)

Las primeras perforaciones fueron realizadas usando herramientas de percusión, por lo que las primeras torres fueron bajo balance; con esta técnica sólo se llegaba a yacimientos someros. En 1895, la perforación rotaria fue introducida, y con esto el fluido tuvo que ser circulado para desplazar los recortes fuera del pozo; a comienzos de 1920, el primer sistema de lodo fue introducido para proveer viscosidad con la finalidad de mejorar el transporte de recortes y, posteriormente, en 1928, la primera BOP (*Blowout Preventor*) fue usada para controlar reventones y para cerrar pozos. Desde entonces, los pozos han sido perforados sobrebalance (Aadnoy et al., 2009).

1.2.1 *Overbalanced Drilling (OBD)*: La perforación sobrebalance es conocida por ser económica y simple, sin embargo, el alto daño a la formación y la reducida ROP (*Rate Of Penetration*) son algunas de sus principales desventajas. 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.

El sobrebalance excesivo, puede retardar considerablemente el proceso de perforación a través del fortalecimiento efectivo de la roca de la región vecina al pozo y la limitación de la remoción de los recortes perforados por debajo de la broca. Por otra parte, las presiones altas de sobrebalance, sumadas a las propiedades pobres del lodo, pueden producir problemas de pega diferencial. Dado que las presiones de yacimiento varían entre una formación y otra y que el lodo mantiene una densidad relativamente constante, la condición de sobrebalance varía entre zonas. Adicionalmente, este diferencial de presión influye en el proceso de invasión del filtrado de lodo a la formación virgen lo que lleva a una disminución de su permeabilidad y consecuente disminución en la producción del pozo (Petitjean & Couet, 1994).

1.2.1.1 *Comportamiento conceptual de la presión en una perforación sobrebalance*: En la perforación sobrebalance, la presión a 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. En el momento de salir de estas, el fluido de perforación choca con la formación, reduciendo la velocidad a cero, como consecuencia, la presión aumenta generándose así, la condición de sobrebalance (Robinson, 2010).

1.2.2 Underbalanced Drilling (UBD): El yacimiento es el principal objetivo para la tecnología bajo balance, una vez los beneficios para el yacimiento han sido determinados, el tipo de pozo puede ser analizado para la idoneidad. UBD puede ser aplicado a nuevas perforaciones, pozos existentes a los cuales se les está aplicando *sidetrack*, puede ser *onshore* u *offshore*; pozos multilaterales pueden ser perforados bajo balance, y la tecnología está siendo implementada en torres flotantes (Xiong & Shan, 2003).

La perforación bajo balance de un candidato apropiadamente seleccionado puede resultar en la entrega de pozos de muy buena producción debido a que elimina el efecto daño-producción de un lodo de perforación. Es bien sabido que los procesos de perforación, completamiento y trabajos de *workover*, generalmente, causan daño a la formación debido al uso de fluidos incompatibles y sucios en el yacimiento, el acto de perforación es, con certeza, el proceso más dañino para la vida productiva de un pozo.

Un problema importante en las operaciones UBD es la estabilidad de pozo debido a que los intervalos de carbón y *shale* representan un alto riesgo debido a que estos estratos suelen estar a una presión significativamente más alta que la formación objetivo a ser perforada. El diferencial

bajo balance creado en una formación *shale* puede ser lo suficiente para causar problemas de desprendimiento de la cara del pozo (Aadnoy et al., 2009).

La base económica para escoger UBD es más compleja que la sola idea de sugerir mayor productividad en el pozo. Una operación de perforación bajo balance va ligada a altos costos de construcción debido al incremento de la cantidad de equipos, personal y servicios requeridos para estos pozos los cuales necesitan compensarse con ganancias potenciales de producción y altas tasas de recobro a largo plazo del yacimiento. (Ghobadpouri et al., 2017; JPT staff, 1998).

1.2.3 *Dynamic Underbalanced Drilling (DUBD): Dynamic Underbalanced Drilling*, propuesto por Neiri et al., (2016), surge como resultado de la búsqueda de una nueva técnica que incorpore las ventajas y evite las desventajas de OBD y UBD, como se muestra en la Figura 6. Los postulados de la perforación bajo balance dinámica plantean una técnica híbrida en la cual la zona alrededor de la broca se mantiene en condiciones bajo balance mientras que el resto de la sarta permanece en sobrebalance. Por lo tanto, se espera que DUBD provea mayor ROP incluso más que UBD en algunos casos, salvando tiempo, reduciendo el daño a la formación, ahorrando dinero y permitiendo la entrega de información del yacimiento mientras se perfora. Se plantea que la caída de presión generada alrededor y debajo de la broca es nuevamente restaurada a valores normales por encima de la misma debido a fenómenos involucrados en el fluido de perforación y estas condiciones requieren de ligeras modificaciones en el diseño de la broca tal como se muestra en la Figura 7.

Teóricamente, esta técnica afirma que, para evitar la pérdida de velocidad, la orientación y el ángulo de las boquillas debe ser modificado para ajustar la trayectoria del flujo y evitar crear el área de estancamiento por debajo de la broca. El impacto de estas modificaciones se evidencia en

que el fluido al contactar las paredes del pozo conserva la velocidad, por lo que, en esta área seguiría generándose una caída de presión, a diferencia de una perforación sobrebalance donde la presión empieza a incrementar en este punto.

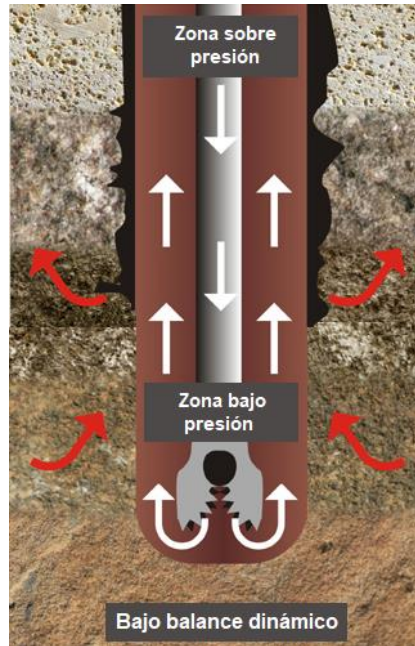


Figura 6. *Dynamic Underbalanced Drilling*. Adaptado de: (Oilfield Team, s. f.)

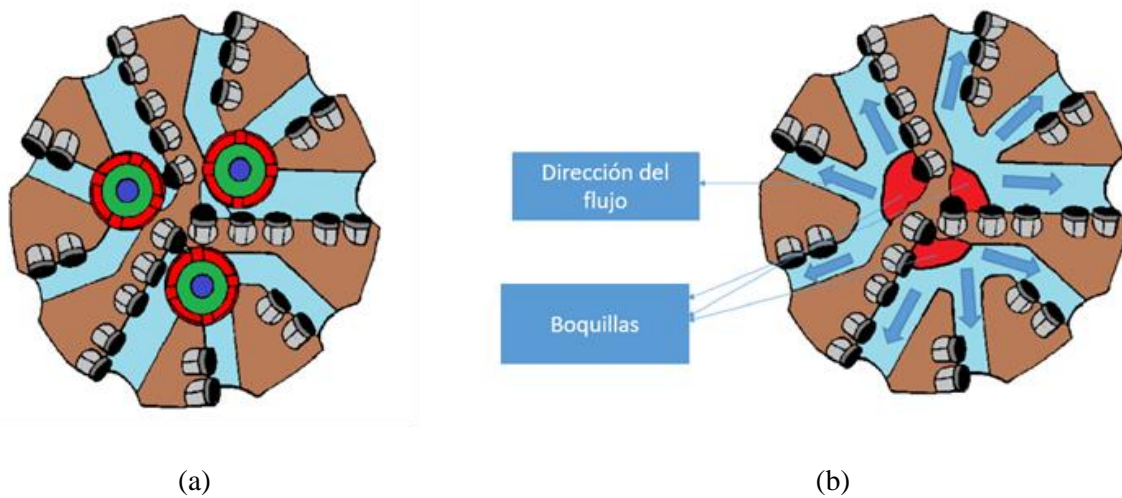


Figura 7. Modificación propuesta. (a) Dirección convencional de las boquillas. (b) Orientación propuesta de las boquillas para redirigir el flujo. Adaptado de El Neiri et al., (2016)

En búsqueda de la técnica DUBD, Jiménez De la Ossa et al., (2019) modificaron los ángulos de las boquillas de una broca PDC, respecto al flujo, siendo estos cambiados de 31.94° a 75.14° . Los resultados de las simulaciones, mostrados en la Figura 8, concluyen que al realizar una perforación convencional, con esta broca en específico, el comportamiento observado fue muy similar al obtenido en la perforación sobrebalance: al chocar con la formación, los valores de velocidad disminuyen abruptamente hasta cero, aunque es de resaltar que, en esta geometría, en el anular la velocidad no se pierde completamente, lo cual discrepa de un comportamiento sobrebalance y podría ser un avance en pro a los postulados de la técnica.

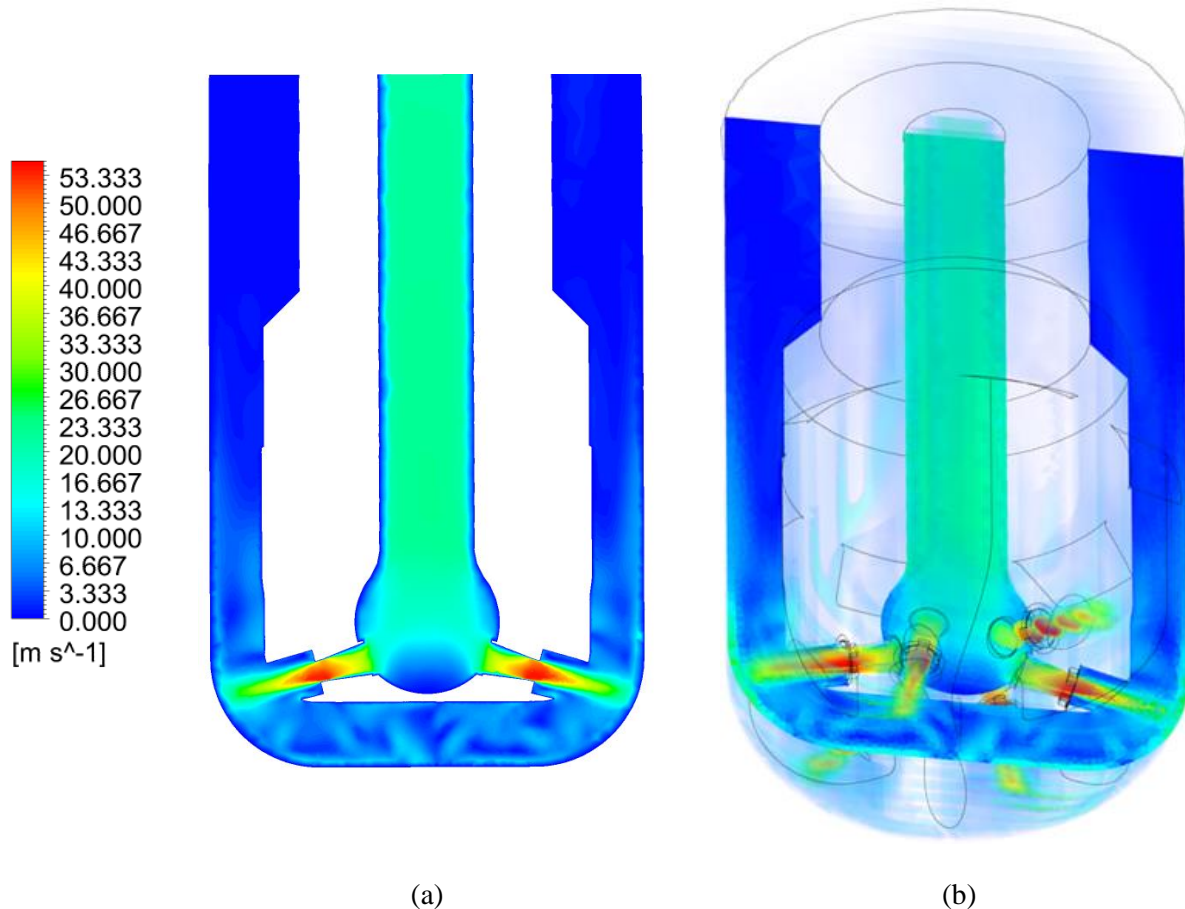


Figura 8. Resultados de velocidad para una broca PDC con ángulos de $75,14^\circ$ en (a) dos dimensiones (b) tres dimensiones. Adaptado de Jiménez De la Ossa et al., (2019).

1.2.3.1 Comportamiento conceptual de la presión en una perforación bajo balance dinámica: Teóricamente, esta técnica afirma que, para evitar la pérdida de velocidad, la orientación y el ángulo de las boquillas debe ser modificado para ajustar la trayectoria del flujo y evitar crear el área de estancamiento por debajo de la broca. El impacto de estas modificaciones se evidencia en que el fluido al contactar las paredes del pozo conserva la velocidad, por lo que, en esta área seguiría generándose una caída de presión, a diferencia de una perforación sobrebalance donde la presión empieza a incrementar en este punto.

Los postulados afirman que en la zona alrededor y debajo de la broca la presión presentaría valores de 1000 psi por debajo de los valores de la presión que se genera en un ambiente sobrebalance, dando como resultado una zona de bajo balance en esta área. Luego, cuando el fluido revierte su dirección y empieza a fluir hacia arriba por el anular, perdiendo velocidad lo que generaría un incremento de la presión y como consecuencia, el resto del pozo se mantiene en condiciones de sobrebalance (El Neiri et al., 2016).

1.3 Relación entre la Tasa de penetración y el Diferencial de presión

Para determinar el efecto del diferencial de presión sobre la tasa de penetración Cunningham y Eenink (1959) realizaron estudios de laboratorio utilizando núcleos de arenisca Berea, arenisca Obernkirchener y caliza Indiana en los cuales notaron que cuando la presión hidrostática del lodo era mayor a la presión de la formación, la tasa de penetración disminuía, en algunos casos, la broca perdía tanta fuerza que era incapaz de continuar perforando. En contraste, cuando el fluido de la formación irrumpía en el pozo, puesto que la presión de la formación era mayor a la presión hidrostática, la ROP aumentaba. Debido a esto, concluyeron que la tasa de penetración es dependiente de la diferencia entre la presión hidrostática de la columna del lodo de perforación y

la presión de la formación, por lo tanto, el incremento de este diferencial de presión resulta en la disminución de la ROP, como se muestra en la Figura 9.

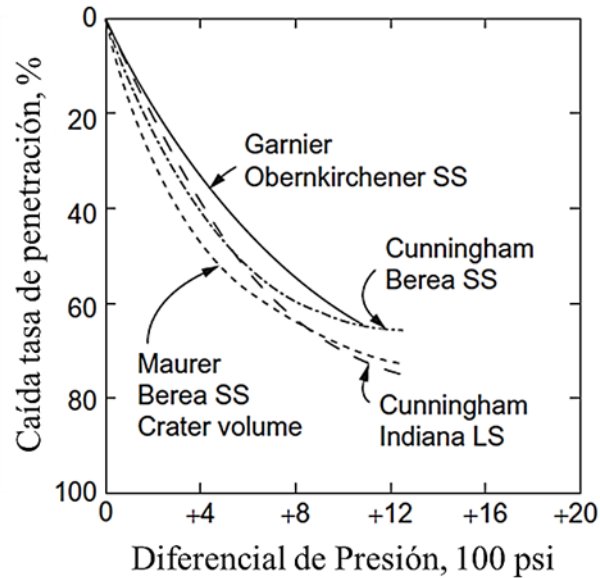


Figura 9. Estudios de laboratorio sobre el efecto del diferencial de presión en la ROP. Adaptado de (Caenn et al., 2017)

Asimismo, en investigaciones realizadas en campo por Vidrine y Benit (1968), llegaron a la conclusión que la tasa de penetración es afectada, significativamente, por los cambios en el diferencial de presión generado por la interacción entre el lodo y la formación en fondo de pozo. Aunque algunos pozos mostraban un decrecimiento lineal y otros un decaimiento exponencial, la tasa de penetración de los pozos estudiados se redujo hasta en un 70% a medida que el diferencial de presión aumentó de 0 a 1000 psi, dichos resultados son evidenciados en la Figura 10.

La optimización de los procesos de perforación es el enfoque principal de las investigaciones debido al valor económico que puede llegar a representar en proyectos de petróleo y gas. En el transcurso de las últimas décadas se ha evidenciado un aumento significativo en el estudio de las métricas que pueden aumentar o disminuir el costo de la perforación, siendo una de estas la tasa de penetración (ROP).

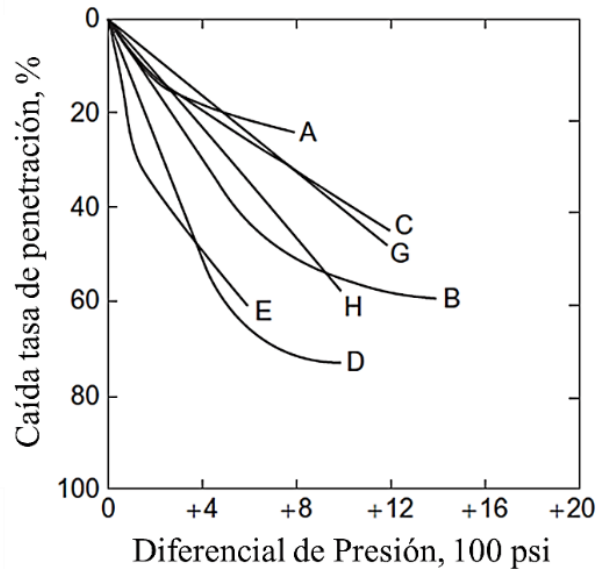


Figura 10. Estudios de campo del efecto del diferencial de presión en la ROP. Tomado de (Caenn et al., 2017).

Los procesos para mejorar la eficiencia de la perforación incluyen la implementación de motores de desplazamiento positivo (PDMs) los cuales están teniendo una alta aplicabilidad en la perforación direccional y horizontal. En una PDM la sección de poder convierte la energía hidráulica del flujo de lodo en energía mecánica que potencia la rotación de la broca (Nelik & Brennan, 2005). El lodo fluyendo entra en la cavidad formada por el espacio entre el estator y el rotor y con la presión que aplica este último, que gira de manera excéntrica dentro del estator, permite que el fluido se extienda dentro del PDM, por lo tanto, al incrementar el número de etapas del motor el diferencial de presión para cada etapa será menor y, en consecuencia, el PDM puede mantener torques más altos. Motahhari (2008) demostró como una selección inapropiada del motor o de los parámetros operacionales puede afectar la eficiencia de la perforación y como al optimizar el conjunto de parámetros del peso sobre la broca (WOB) y las revoluciones por minuto (RPM) se obtienen ROPs más altas que las promedio alcanzadas por una bomba de cavidades progresivas.

Así también, con la finalidad de mejorar la ROP, Fu et al., (2012) diseñaron un mecanismo llamado pulso hidráulico de cavitación emitido en chorro (HPCJG) y cuando el lodo fluye por esta herramienta, el fluido recibe un pulso aplicado por los propulsores entrando así a una cámara auto resonante donde gracias a un pulso de cavitación se genera un chorro en la salida de las boquillas de la broca y así se consigue un aumento de la ROP. Las pruebas de laboratorio y campo indicaron que la salida de este fluido presionado por el pulso y la caída de presión del generador incrementaba con el flujo del fluido. Este generador fue aplicado en más de 100 pozos en 8 campos alrededor de China y los resultados mostraron que el promedio de ROP fue incrementado en un rango desde 16,7% hasta 104.4%.

La mayoría de los modelos de mejora de ROP no consideran el efecto de la vibración de la sarta de perforación, por lo tanto, Hegde et al. (2019) crearon un modelo que determinaba los parámetros óptimos de perforación para incrementar la ROP y mitigar las excesivas vibraciones utilizando *machine learning* aplicando el algoritmo en regiones de bajas vibraciones se concluyó que la ROP aumentó un 14.1% en promedio a lo largo de dichas formaciones, así mismo, evidenciaron que la infravaloración de la selección del modelo de ROP da como resultado disminuciones en el desempeño de la misma.

Los ingenieros encargados del diseño de brocas siempre indagan la forma de optimizar los parámetros de perforación con la finalidad de disminuir los costos, por ende su mayor enfoque es en generar cambios orientados a incrementar la tasa de penetración, perforando intervalos de formación más largos (Hafez et al., 2019), cabe resaltar que el rendimiento de las brocas es normalmente medido por las ROP siendo este un indicador de cuán rápida la perforación del pozo está avanzando en términos de la longitud de hueco perforado por unidad de tiempo (Soares et al., 2016).

Sivagnanam (2014) enfocó su estudio en entender la influencia del tamaño, ubicación e inclinación de las boquillas sobre la formación debido a que esto podría influir en el desempeño de la broca. Los parámetros relacionados con la geometría de la broca fueron modificados utilizando una serie de simulaciones computacionales para examinar y caracterizar su rendimiento, los resultados obtenidos como las distribuciones de flujo fueron analizados en términos de velocidad, vorticidad y caída de presión. En el desarrollo de la simulación, diseñaron diferentes configuraciones de broca al variar 15 factores y se concluyó que el diámetro de boquilla es el factor más significativo en la caída de presión e influencia la velocidad y la vorticidad en todos los patrones de flujo.

La única alternativa viable hasta el momento para tener un diferencial de presión negativo alrededor de la broca mientras se opera es perforar bajo balance, la ROP aumenta cuando la presión de la formación excede la presión hidrostática de la columna del lodo de perforación (Vidrine & Benit, 1968). Ciertamente, esta condición genera un aumento en la rata de penetración sin embargo, una operación de perforación bajo balance va ligada a una alta complejidad operacional y altos costos de construcción debido al incremento de la cantidad de equipos, personal y servicios requeridos razón por la cual estos proyectos tienen baja implementación (Bennion et al., 1998).

2. Modelo Matemático

Los ingenieros de diseño de brocas usan CFD para modelar la interacción de los fluidos de perforación con la broca y el pozo, así como se muestra en la Figura 11. Algoritmos complejos hacen posible la simulación de una gran variedad de condiciones en el fondo de pozo, permitiendo a los ingenieros evaluar diferentes configuraciones de hojas y boquillas para optimizar los patrones de flujo para la remoción de recortes. El amplio uso de esta sofisticada técnica para maximizar la

energía hidráulica disponible provee brocas que perforarán al menor costo posible por pie perforado.



Figura 11. Análisis del flujo de un fluido de perforación en una broca tricónica y PDC. Adaptado de Fundamentals of Drilling Engineering. Society of Petroleum Engineers. Mitchell, R. F., & Miska, S. (2011).

Para hacer uso de La Dinámica de Fluidos Computacional con el fin de estudiar la interacción del fluido de perforación a través de la broca y entre el espacio anular es necesario el uso de la herramienta computacional *ANSYS Fluent*. Este software describe el comportamiento fluidodinámico de la sustancia generada a partir de propiedades ya conocidas del fluido de perforación por medio de ecuaciones diferenciales parciales de gran complejidad las cuales son resueltas por medio de métodos numéricos en cada uno de los volúmenes de control, en este capítulo se muestran las ecuaciones que hacen parte del modelo matemático y los métodos numéricos aplicados para su resolución. Las ecuaciones de conservación, usadas en CFD, para flujo continuo e incompresible, se basan en las leyes universales de conservación de masa o continuidad, conservación de momento y conservación de energía (Prieto Jiménez et al., 2018).

2.1 Leyes de conservación

Los principios que rigen la dinámica de fluidos son las leyes de conservación de masa, momento y energía (Kundu et al., 2012), las cuales se tratan a continuación:

2.1.1 Ecuación de 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.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

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).

2.1.2 Ecuación de conservación de momento: Algún cambio en el momento de un fluido en un volumen de control será debido al flujo neto en el volumen y la acción de fuerzas externas en el fluido. La conservación del momento en un sistema estático se describe como:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla P + \nabla \cdot (\overline{\overline{\tau}}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

Donde P es la presión estática, $\overline{\overline{\tau}}$ es el tensor de esfuerzos, el cual se especificará más adelante, $\rho \vec{g}$ son las fuerzas gravitacionales y \vec{F} representa las fuerzas de cuerpo externas que interactúan con el cuerpo.

El tensor de estrés $\overline{\overline{\tau}}$ está dado por:

$$\overline{(\tau)} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (3)$$

Donde μ es la viscosidad molecular, I es la unidad tensor, y el segundo término al costado derecho es el efecto de la dilatación volumétrica (Batchelor, 2000).

2.1.3 Ecuación de conservación de energía: Afirma que la energía total de un sistema cerrado permanece constante, del modo siguiente:

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

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

2.2 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 ser simulados mediante la resolución numérica de las ecuaciones de transporte. Sin embargo, esto requiere de un costo computacional extremadamente elevado el cual no es práctico para flujos a escala industrial. Para disminuir el costo computacional, los campos de flujo turbulentos pueden ser calculados con los sistemas de ecuaciones de conservación promediadas en el espacio y tiempo. Cuando se hace esto, el sistema de ecuaciones resultante contendrá más incógnitas que ecuaciones. Este inconveniente puede ser solucionado mediante la adición de los modelos de turbulencia, los cuales, están diseñados para aproximar el comportamiento físico de ésta.

Estos modelos pueden ser clasificados por el número de ecuaciones que utilizan. 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).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (5)$$

2.2.1 Ecuaciones de transporte para el modelo *standard k – ε*: La energía cinética turbulenta, k , y su tasa de disipación ε , son obtenidas de las siguientes ecuaciones de transporte:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \\ \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b \end{aligned} \quad (6)$$

Donde,

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (7)$$

En estas ecuaciones, G_k representa la generación de la energía cinética turbulenta debido a la media de gradientes de velocidad, G_b es la generación de energía cinética turbulenta debido a la flotabilidad. Y_M representa la contribución de la dilatación fluctuante en la turbulencia compresiva a la tasa general de disipación, C_2 y $C_{1\varepsilon}$ son constantes, σ_k y σ_ε son los números de turbulencia Prandtl para k y ε , respectivamente. (Tu et al., 2018).

2.3 Tratamiento mejorado de pared

El tratamiento mejorado de pared es un método de modelamiento cercano a la pared para la ecuación ε ($EWT - \varepsilon$) 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 será desarrollado de manera correcta (Sagaut, 2006).

2.3.1 Modelamiento de doble capa para el tratamiento mejorado de pared: 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.

2.4 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. Una de las ventajas del método de volúmenes finitos es el mantenimiento del significado físico de las ecuaciones de transporte luego de su discretización. Además, es efectivo computacionalmente ya que el cálculo de alguna cantidad transportada para dos volúmenes de control adyacentes es el mismo, pero con signo contrario. La discretización de las ecuaciones de transporte se puede ver más fácilmente considerando la ecuación de la conservación no estacionaria para una cantidad de

transporte determinada φ , escrita en forma integral para un volumen de control arbitrario V , mostrada a continuación (Xamán, 2016):

$$\int_V \frac{\partial \rho \varphi}{\partial t} dV + \oint \rho \varphi \vec{V} \cdot d\vec{A} = \oint \Gamma_\varphi \nabla \varphi \cdot d\vec{A} + \int_V S_\varphi dV \quad (8)$$

2.4.1 Discretización Espacial: Variado número de métodos y enfoques se han desarrollado con la intención de discretizar espacialmente el sistema de ecuaciones diferenciales parciales.

2.4.1.1 First-Order Upwind: Cuando se desea precisión de primer orden, las cantidades en las caras de las celdas se determinan suponiendo que los valores del centro de la celda de cualquier variable de campo representan un valor promedio de la celda y se mantienen en toda la celda; Las cantidades de cara son idénticas a las cantidades de celda. Por lo tanto, cuando se selecciona el retroceso de primer orden, el valor facial φ_f se establece igual al valor del centro de la celda φ en la celda ascendente.

2.4.1.2 Second-Order Upwind: Cuando se desea una precisión de segundo orden, las cantidades en las caras de las celdas se calculan utilizando un enfoque de reconstrucción lineal multidimensional. En este enfoque, la precisión de orden superior se logra en las caras de las celdas a través de una expansión de la serie centrada en las celdas de Taylor sobre el centroide de las celdas. Por lo tanto, cuando se selecciona el retroceso de segundo orden, el valor de la cara $\varphi_{f,SOU}$ se calcula utilizando la siguiente expresión:

$$\varphi_{f,SOU} = \varphi + \nabla \varphi \cdot \vec{r} \quad (9)$$

Donde φ y $\nabla\varphi$ son el valor centrado en la celda y su gradiente en la celda corriente arriba, y \vec{r} es el vector de desplazamiento desde el centroide de la celda corriente arriba hasta el centroide de la cara. Esta formulación requiere la determinación del gradiente $\nabla\varphi$ en cada celda. Finalmente, el gradiente $\nabla\varphi$ está limitado para que no se introduzcan nuevos máximos o mínimos (Hopkins, 2015).

3. Metodología

En el presente capítulo se muestra la metodología utilizada para hacer la simulación de una perforación sobrebalance y bajo balance dinámica. La primera etapa consiste en la identificación del problema, donde se define cuál será el dominio de simulación. Seguidamente, se lleva a cabo el preprocesamiento, donde se realiza la adaptación de la geometría, generación de la malla y la inserción de los modelos físicos que representan el comportamiento de los fluidos del dominio de estudio. Dando paso a la tercera etapa, se configuran los ajustes del *solver*, tales como el tipo de discretización espacial, y temporal, así como los criterios de convergencia. Finalmente, en la etapa de postprocesamiento se validan los resultados obtenidos mediante la observación de perfiles de las variables de respuesta. Serán utilizados paquetes del software comercial ANSYS®. La metodología propuesta se presenta en la Figura 12.

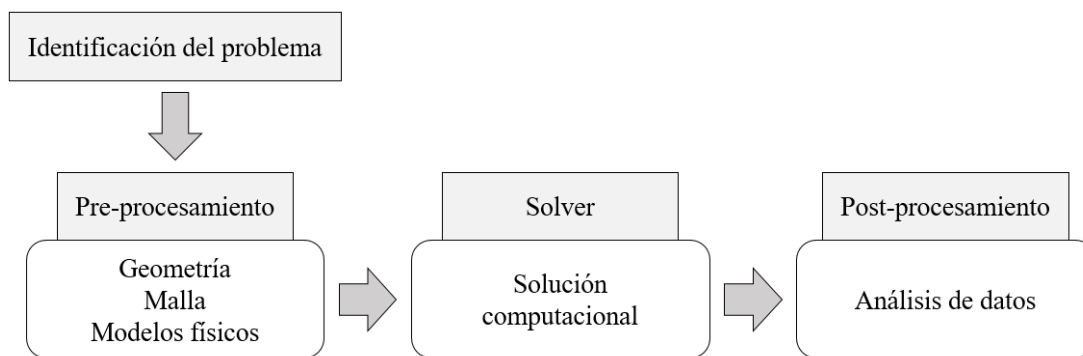


Figura 12. Metodología computacional. Adaptado de Simulación numérica de un separador gas-líquido tipo ciclón cilíndrico utilizando Dinámica De Fluidos Computacional. Cornejo Cáceres, J. S. Universidad Industrial de Santander. (2018).

3.1 Identificación del problema

En el presente trabajo, se analiza conceptualmente el efecto que genera en el fluido de perforación realizar modificaciones en la dirección y el ángulo de boquillas de una broca PDC. Inicialmente, es necesario trabajar con una broca base para las simulaciones, sobre esta geometría inicial serán realizadas las alteraciones de ángulo con la finalidad de determinar si la nueva configuración genera un aumento en la ROP en fondo de pozo. Para el desarrollo de las simulaciones la sustancia a utilizar será un lodo base agua modelado como un fluido no newtoniano. La verificación de resultados se realizará por medio de la comparación de los resultados del comportamiento dinámico del lodo en la geometría sin modificar y en las modificadas.

3.2 Preprocesamiento

El preprocesamiento define el dominio de investigación mediante la creación de la geometría. Posterior a esto, se hace necesaria la discretización mediante la creación de una malla. En este momento se definen los modelos físicos y las condiciones de frontera para cada caso de simulación.

3.2.1 Geometría: 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* siendo este un entorno de colaboración gratuito donde diseñadores e ingenieros de todo el mundo pueden compartir sus diseños asistidos por computadora (CAD). En la Figura 13 se presenta la geometría compartida por Ekawira K Napitupulu (2014) constituyendo esta un pilar fundamental para la broca base de las simulaciones de este trabajo de investigación.

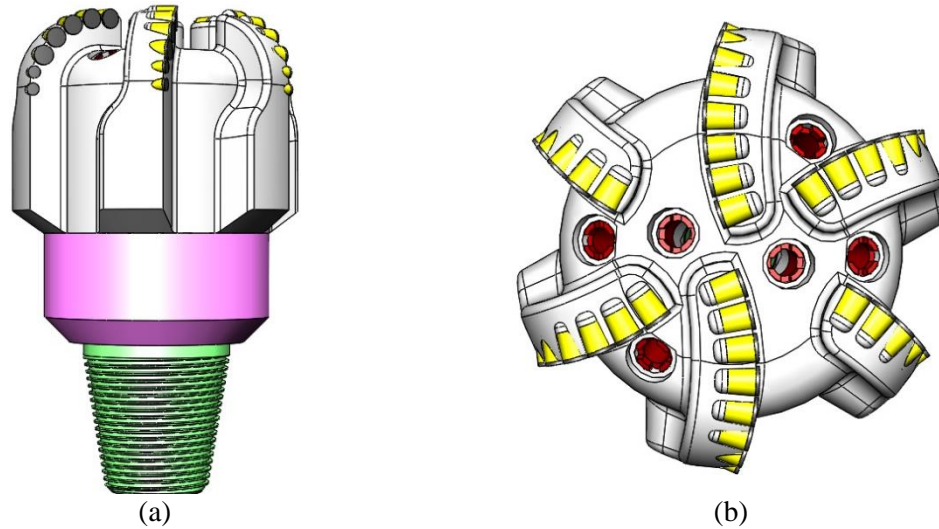


Figura 13. Vistas (a) frontal y (b) superior de la geometría creada por Napitupulu (2014)

Con la finalidad de simular con una broca que se ajuste a los requerimientos postulados en la técnica *Dynamic Underbalanced Drilling* se decide optar por una broca con 9 aletas y 3 boquillas, tal como se muestra en la Figura 14.

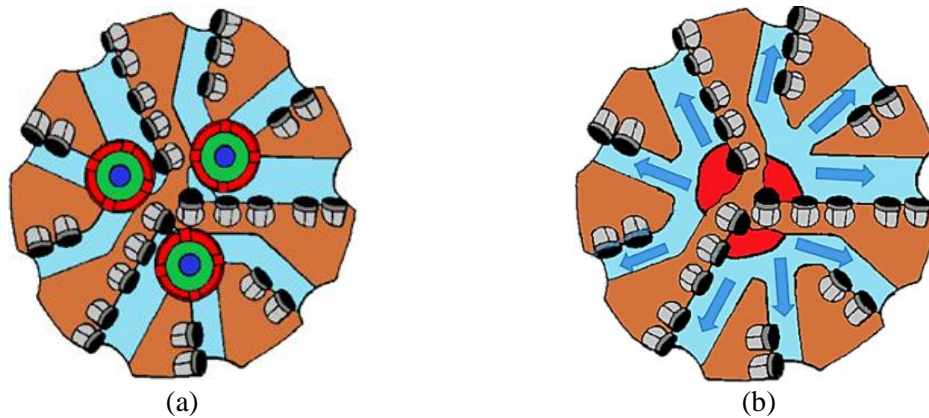


Figura 14. Modificación propuesta por El Neiri et al., (2016). (a) Dirección convencional de las boquillas. (b) Orientación propuesta de las boquillas para redireccionar el flujo.

A continuación, se describe el proceso de adaptación realizado a la broca de 6 aletas y 6 boquillas, compartida por Napitupulu (2014), con la finalidad de obtener las geometrías a utilizar en este trabajo de investigación.

1. Adaptación del cuerpo de la broca: Con el objetivo de crear un flujo radial alrededor de la broca es necesario tener una configuración de 9 aletas, por lo tanto, el primer paso

para lograr las modificaciones deseadas será cambiar la configuración del número de aletas, este fue realizado de seis a nueve, tal como se muestra en la Figura 15.

2. Modificación del número de boquillas: Al aumentar el número de aletas y conservar el número de boquillas y su posición, fue observado un traslape, por lo tanto, fue necesario disminuir el número de boquillas a tres y cambiar su ubicación al centro de la geometría, como en la Figura 16.

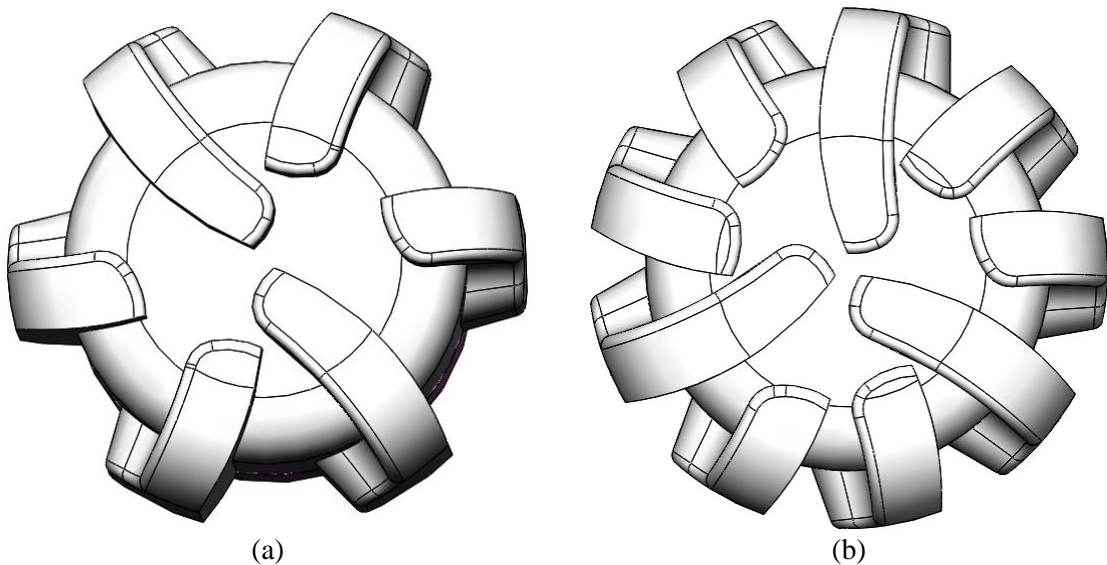


Figura 15. Primer paso: adaptación del número de aletas de (a) seis a (b) nueve.

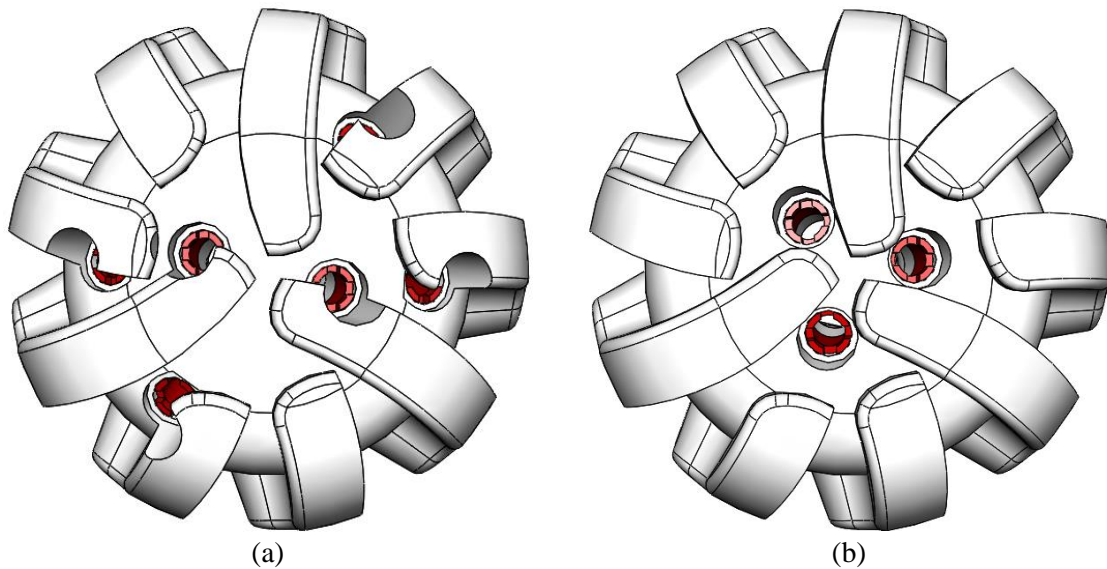
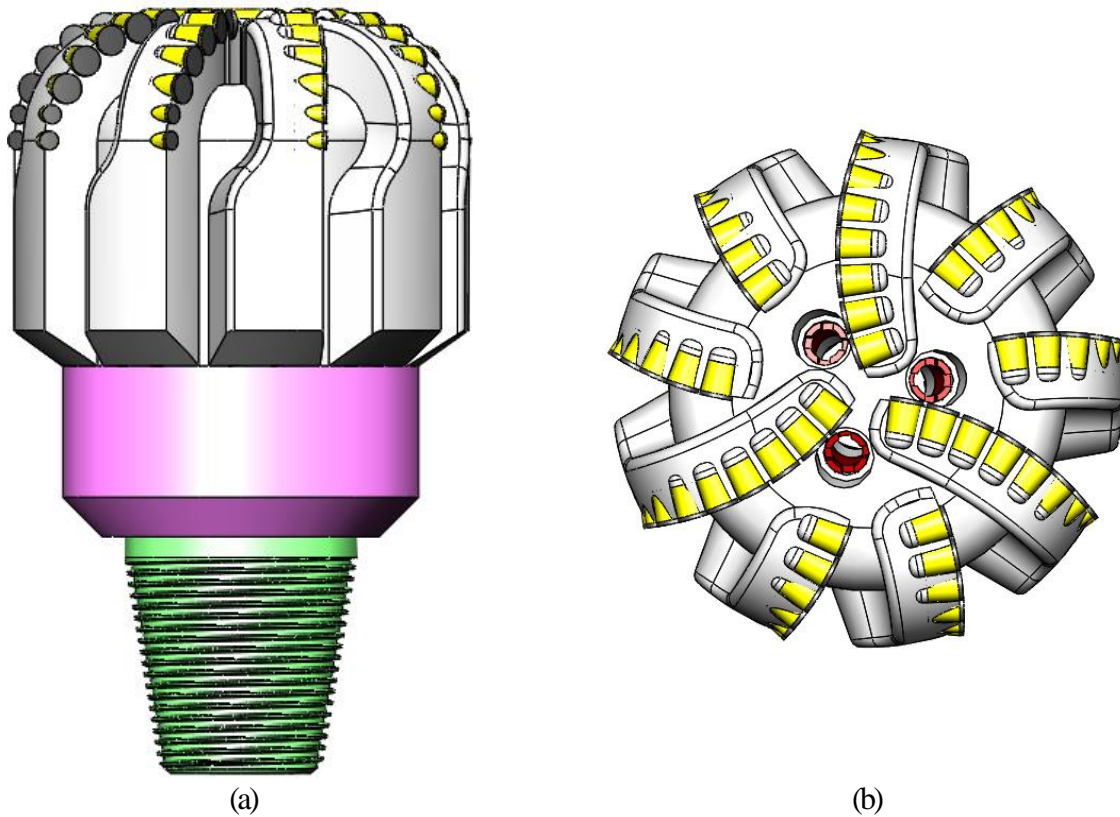
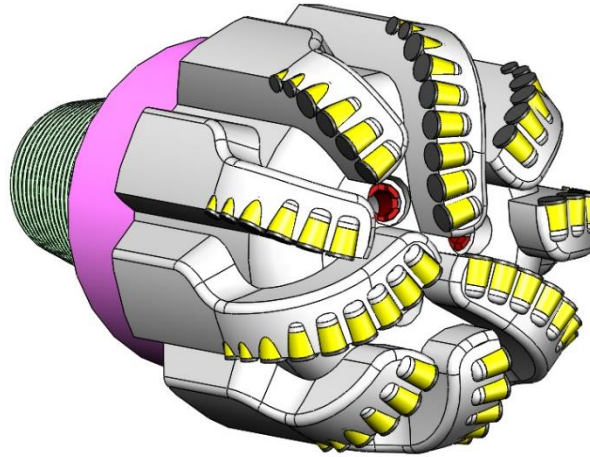


Figura 16. Segundo paso: modificación del número de boquillas de (a) seis a (b) tres

- Selección de ángulo final para la geometría base: El ángulo obtenido al disminuir el número de boquillas fue de $14,89^\circ$, con el objetivo de manejar el mayor ángulo posible para dicha configuración, este fue modificado hasta llegar al máximo permitido de $18,89^\circ$.

En la Figura 17 se presenta con mayor detalle la geometría de 9 aletas y 3 boquillas resultante, siendo esta la base a utilizar en el desarrollo de las simulaciones. En adelante, se hará referencia a esta como broca Base.





(c)

Figura 17. 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 18.

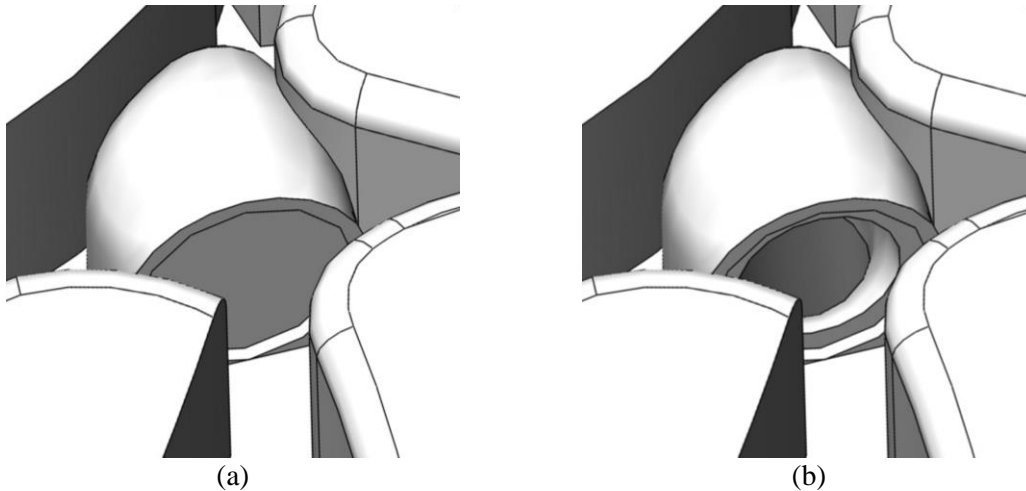


Figura 18. Creación boquillas de 90 grados (a) en la estructura (b) boquillas finalizadas.

En la Figura 19 se presenta con mayor detalle la geometría de 3 boquillas de noventa grados resultante, siendo esta la base a utilizar en el desarrollo de las simulaciones. En adelante, esta broca será referenciada como BON.

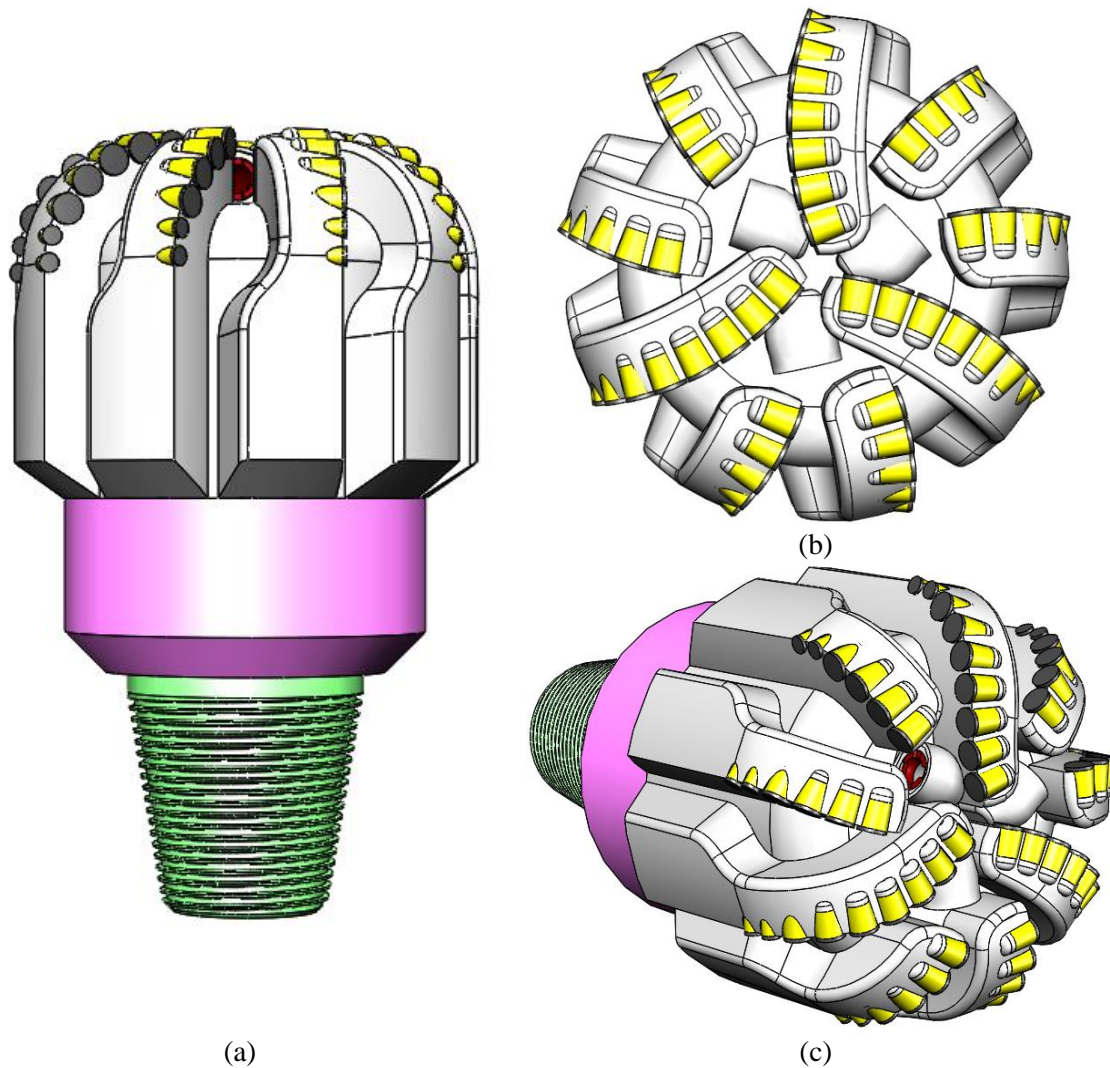
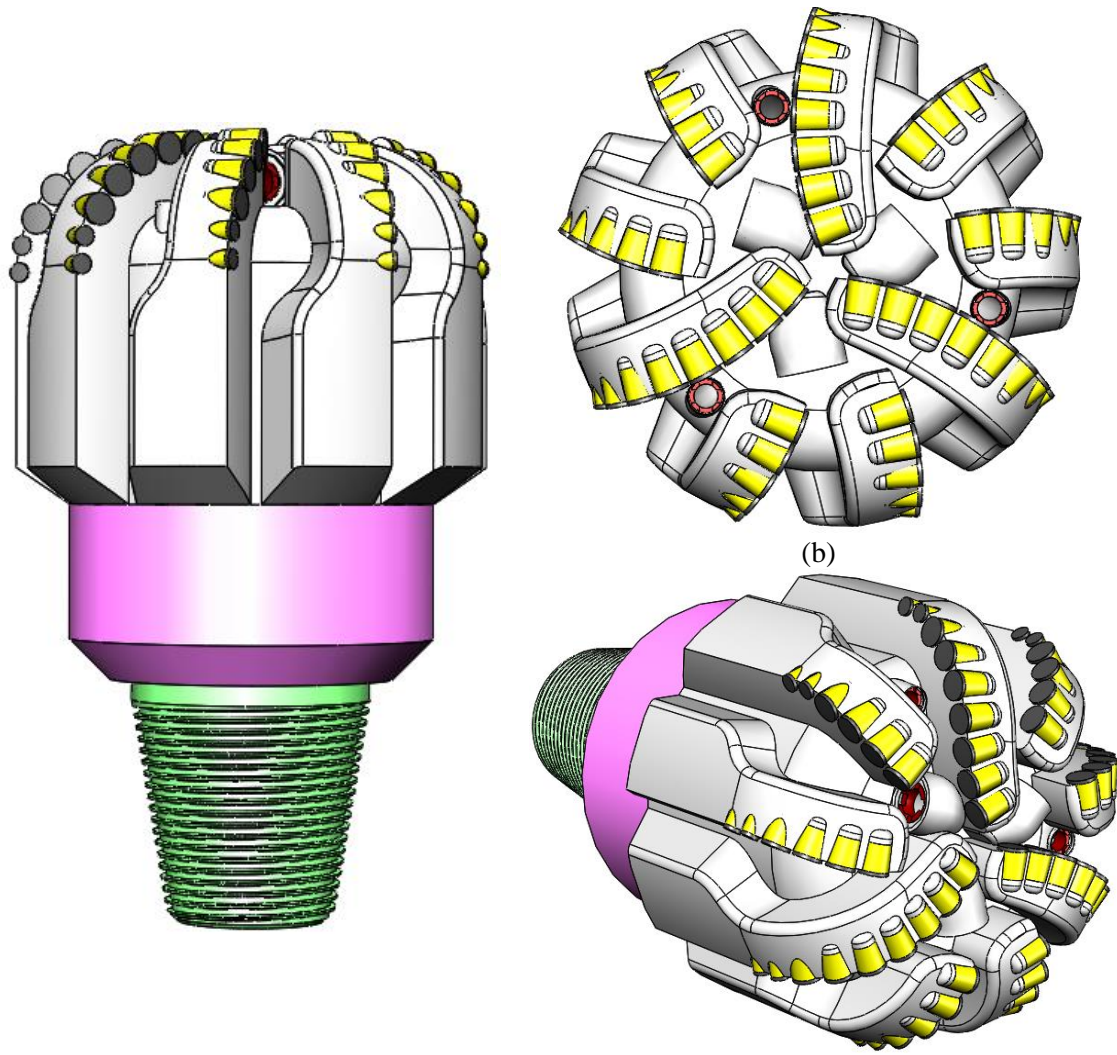


Figura 19. Vistas (a)frontal, (b)superior y (c)3D geometría BON.

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 20. En lo sucesivo, esta broca se referenciará como BONAT.

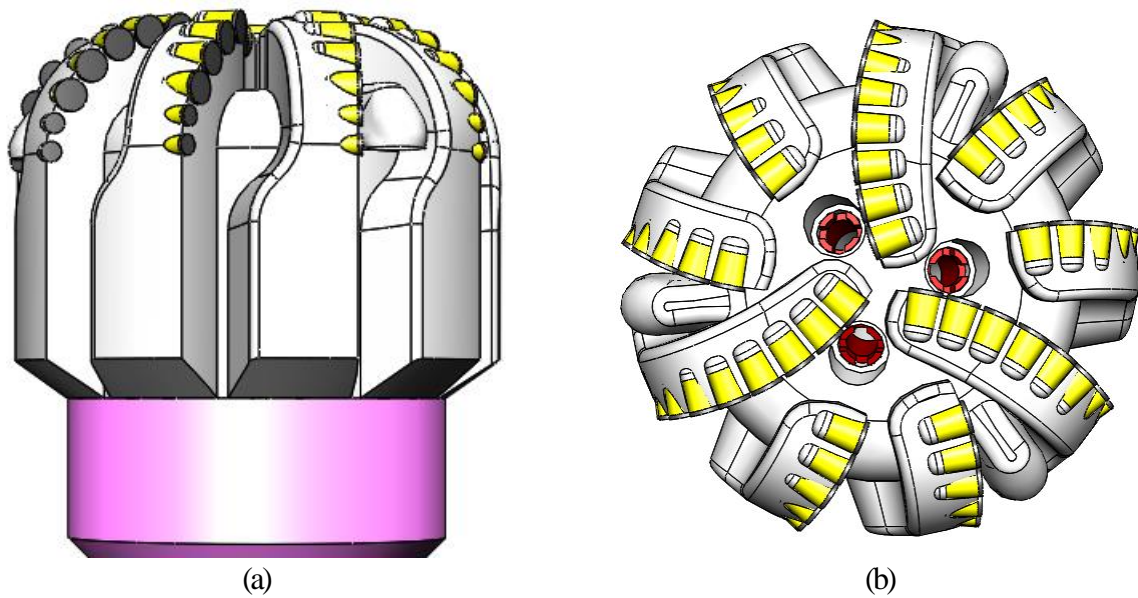
Teniendo el propósito de garantizar que el fluido de salida de al menos 3 boquillas no chocara directamente con la cara del pozo, a la broca Base se le ubicaron 3 boquillas con 90 grados en dirección contraria a la formación, como se presenta en la Figura 21. De ahora en más, esta broca será referenciada como BOMIX.



(a)

(c)

Figura 20. Vistas (a)frontal, (b)superior y (c)3D geometría BONAT.



(a)

(b)

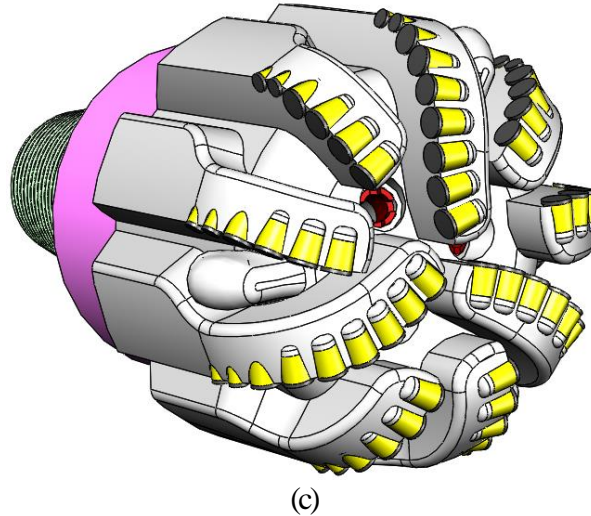


Figura 21. Vistas (a)frontal, (b)superior y (c)3D geometría BOMIX.

3.2.2 Mallado: La discretización del dominio se realiza en *Ansys Meshing* mediante la generación de una malla tetraédrica. Usar una calidad de malla adecuada es una parte importante en el proceso de simulación, debido a que esta juega un rol significativo en la precisión de la computación numérica. Para comprobar la calidad de la malla, se revisan los valores de Ortogonalidad y Oblicuidad y se continúa refinando hasta llegar a valores adecuados.

El concepto de ortogonalidad se relaciona con qué tan cerrados están los ángulos entre elementos o qué tan adyacentes están las caras en comparación con el ángulo óptimo: 90° para caras cuadriláteras y 60° para caras triangulares. Por otro lado, la oblicuidad determina que tan ideal o equilátero una cara o celda es. De acuerdo con la definición de oblicuidad, un valor de 1 indica una celda equilátera y un valor de 0 indica una celda completamente pésima.

Los valores de ortogonalidad y oblicuidad promedios de la geometría Base son 0,78358 y 0,21474, respectivamente, lo que representa una muy buena calidad de malla; la Tabla 1 desglosa los valores de calidad de cada elemento en la malla. El mallado tetraédrico generado es presentado en la Figura 22, cuenta con 5'841.269 elementos y ha sido seleccionado para simular el primer escenario: perforación sobrebalance.

Tabla 1. Calidad de elementos de la malla respecto a la Ortogonalidad y Oblicuidad, broca Base.

Ortogonalidad			Oblicuidad		
Calidad de celda	Elementos	Porcentaje	Calidad de celda	Elementos	Porcentaje
Aceptable (0,15 – 0,20)	42	0,001%	Malo (1 – 0,75)	212	0,004%
Bueno (0,20 – 0,69)	1'268.248	21,712%	Suficiente (0,75 – 0,5)	83.276	1,426%
Muy bueno (0,70 – 0,95)	4'353.556	74,531%	Bueno (0,5 – 0,25)	2'036.535	34,865%
Excelente (0,95 – 1)	219.423	3,756%	Excelente (0,25 – 0)	3'721.247	63,706%

El mallado tetraédrico generado para la geometría BON es presentado en la Figura 23, cuenta con 6'033.632 elementos y ha sido seleccionado para simular el segundo escenario: perforación bajo balance dinámica. Los valores de ortogonalidad y oblicuidad promedios son 0,78131 y 0,21697, respectivamente, lo que representa una muy buena calidad de malla; la Tabla 2 desglosa los valores de calidad de cada elemento en la malla.

Tabla 2. Calidad de elementos de la malla respecto a la Ortogonalidad y Oblicuidad, broca BON.

Ortogonalidad			Oblicuidad		
Calidad de celda	Elementos	Porcentaje	Calidad de celda	Elementos	Porcentaje
Aceptable (0,15 – 0,20)	358	0,006%	Malo (1 – 0,75)	873	0,014%
Bueno (0,20 – 0,69)	1'346.510	22,317%	Suficiente (0,75 – 0,5)	96.585	1,601%
Muy bueno (0,70 – 0,95)	4'464.830	73,999%	Bueno (0,5 – 0,25)	2'134.319	35,374%
Excelente (0,95 – 1)	221.934	3,678%	Excelente (0,25 – 0)	3'801.855	63,011%

Los valores de ortogonalidad y oblicuidad promedios de la geometría BONAT son 0,78070 y 0,21759, respectivamente, lo que representa una muy buena calidad de malla; la

Tabla 3 desglosa los valores de calidad de cada elemento en la malla. El mallado tetraédrico generado cuenta con 6'213.835 elementos y es presentado en la Figura 24.

Tabla 3. Calidad de elementos de la malla respecto a la Ortogonalidad y Oblicuidad, broca BONAT.

Ortogonalidad			Oblicuidad		
Calidad de celda	Elementos	Porcentaje	Calidad de celda	Elementos	Porcentaje
Aceptable (0,15 – 0,20)	437	0,007%	Malo (1 – 0,75)	1051	0,017%
Bueno (0,20 – 0,69)	1'396.626	22,476%	Suficiente (0,75 – 0,5)	101.995	1,641%
Muy bueno (0,70 – 0,95)	4'590.251	73,871%	Bueno (0,5 – 0,25)	2'204.157	35,472%
Excelente (0,95 – 1)	226.521	3,645%	Excelente (0,25 – 0)	3'906.632	62,870%

El mallado tetraédrico generado para la geometría BOMIX es presentado en la Figura 25 y cuenta con 7'879.797 elementos. Los valores de ortogonalidad y oblicuidad promedios son 0,77643 y 0,22181, respectivamente, lo que representa una muy buena calidad de malla; la Tabla 4 desglosa los valores de calidad de cada elemento en la malla.

Tabla 4. Calidad de elementos de la malla respecto a la Ortogonalidad y Oblicuidad, broca BOMIX.

Ortogonalidad			Oblicuidad		
Calidad de celda	Elementos	Porcentaje	Calidad de celda	Elementos	Porcentaje
Aceptable (0,15 – 0,20)	385	0,005%	Malo (1 – 0,75)	943	0,012%
Bueno (0,20 – 0,69)	1'869.911	23,730%	Suficiente (0,75 – 0,5)	132.360	1,680%
Muy bueno (0,70 – 0,95)	5'747.882	72,945%	Bueno (0,5 – 0,25)	2'922.560	37,089%
Excelente (0,95 – 1)	261.619	3,320%	Excelente (0,25 – 0)	4'823.934	61,219%

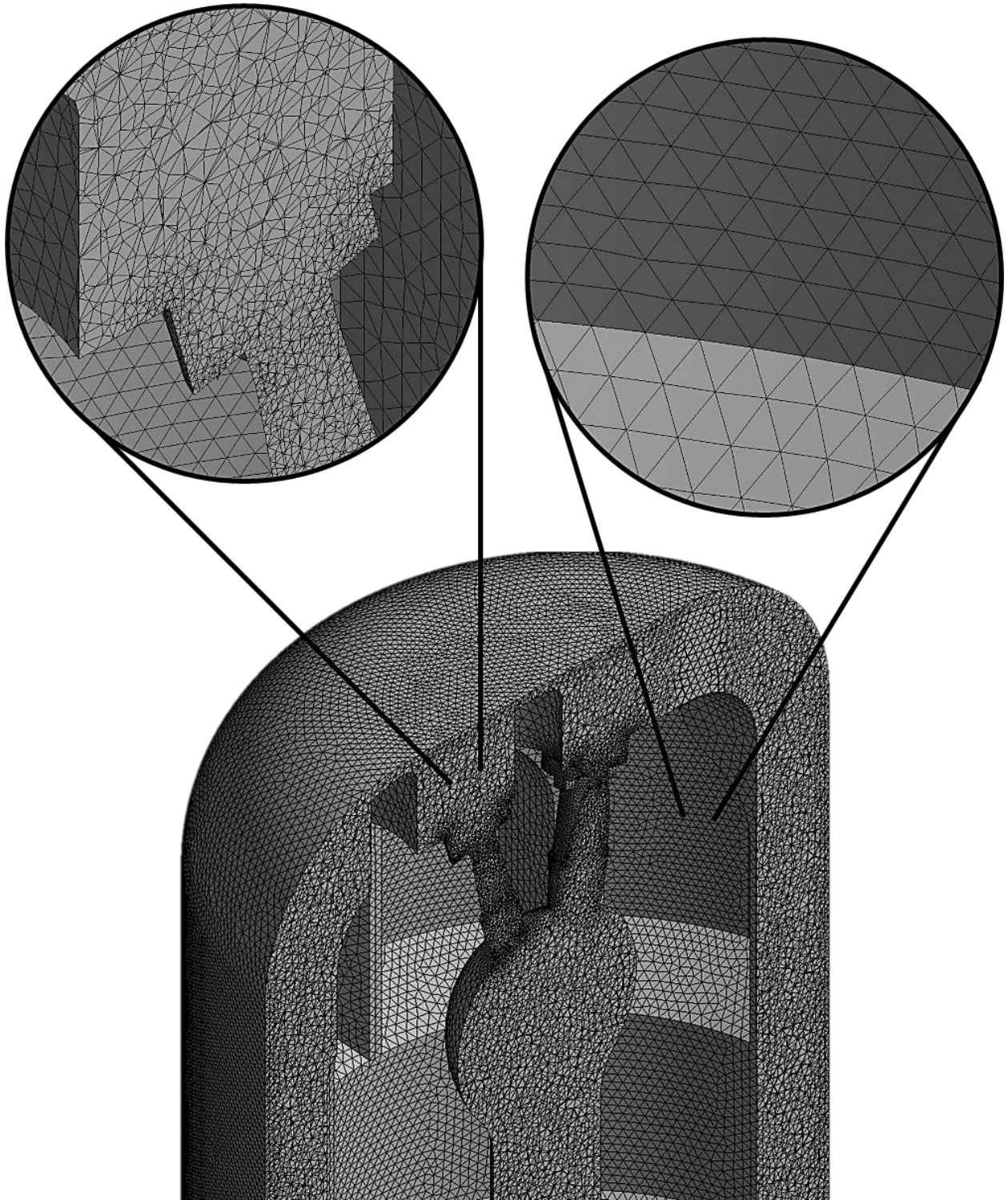


Figura 22. Malla tetraédrica de la geometría Base.

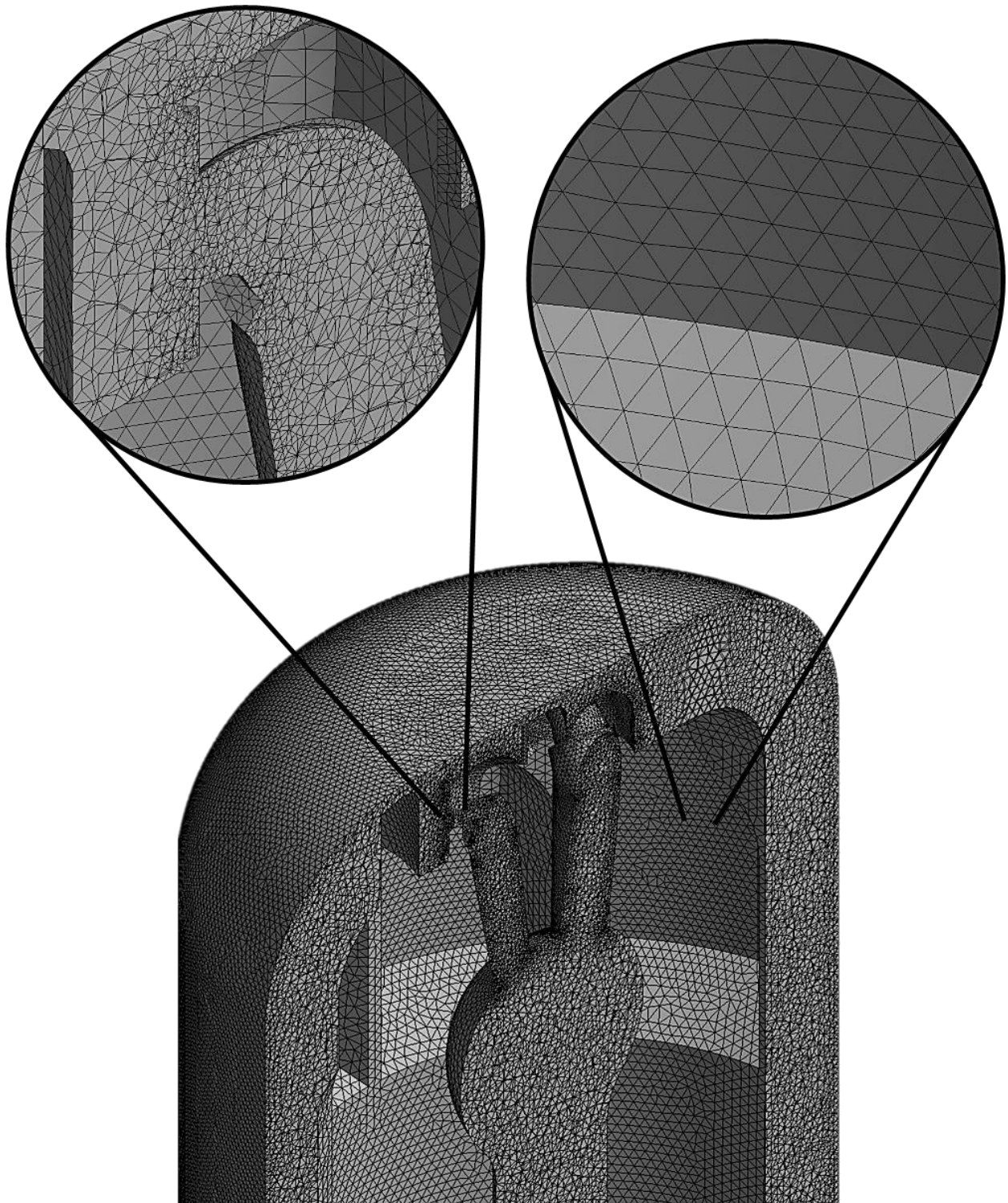


Figura 23. Malla tetraédrica de la geometría BON.

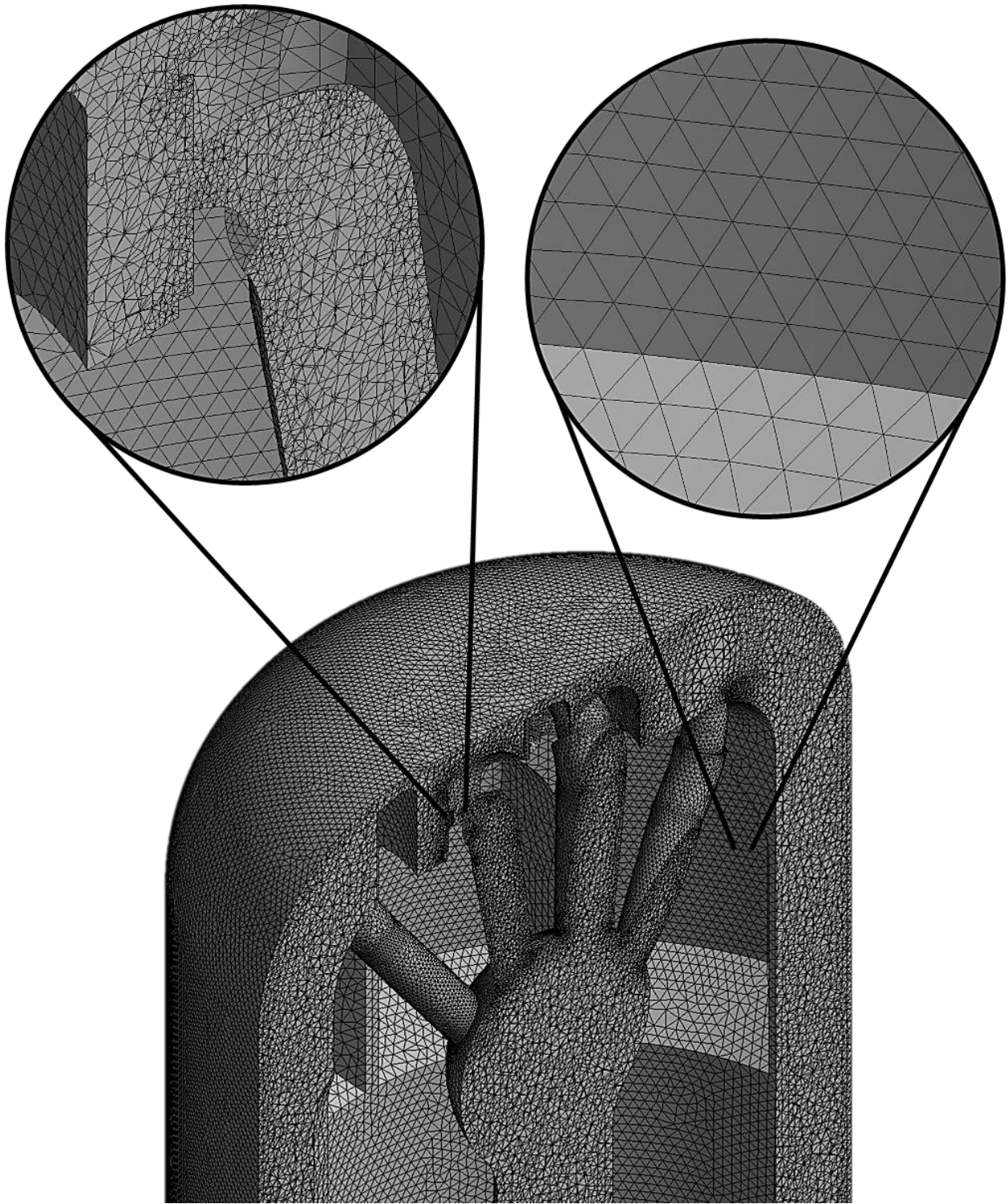


Figura 24. Malla tetraédrica de la geometría BONAT.

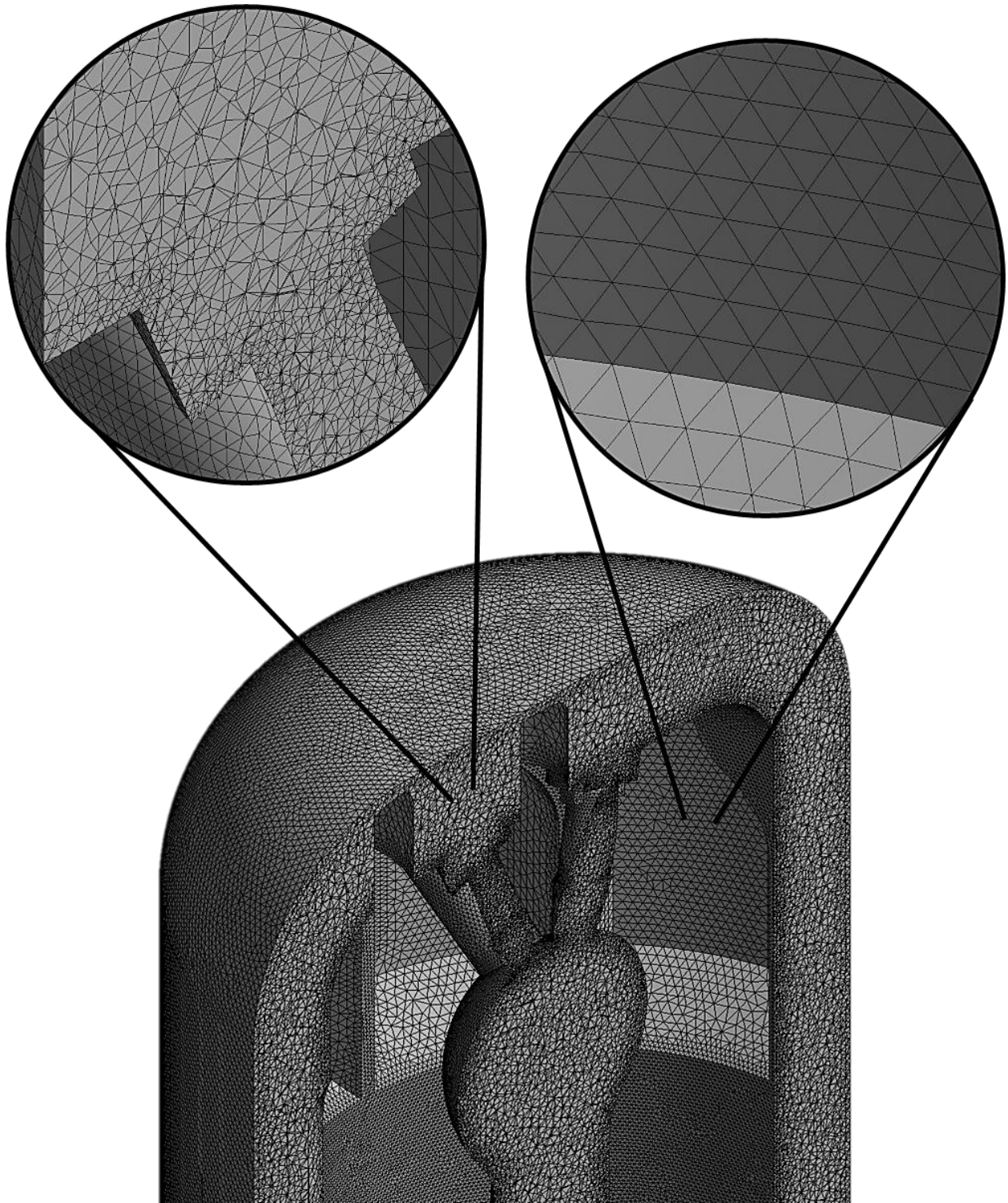


Figura 25. Malla tetraédrica de la geometría BOMIX.

3.2.3 Modelos físicos: El modelo físico usado para representar el comportamiento fluidodinámico de la broca de perforación es el modelo de turbulencia Standard k- ϵ con tratamiento mejorado en la pared, el cuál quedo establecido en el capítulo anterior.

3.2.4 Sustancias: Para el modelar el lodo de perforación, fueron utilizados 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 26.

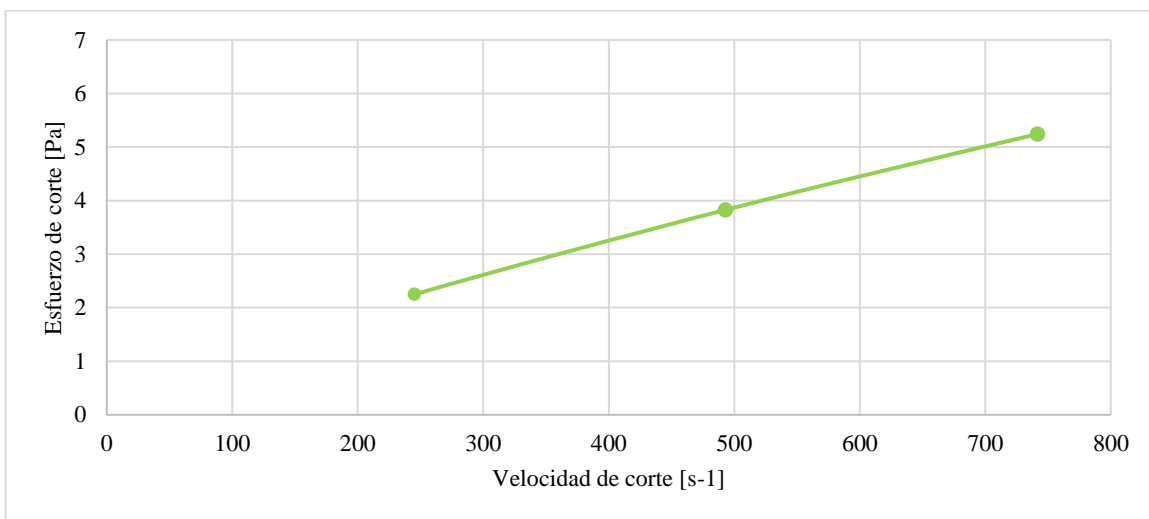


Figura 26. Gráfica Esfuerzo de corte vs. Velocidad de corte para el lodo de perforación utilizado para el estudio. Adaptado de: One-dimensional model of turbulent flow of non-Newtonian drilling mud in non-prismatic channels. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 10(2), 847-857. Welahettige, et al., (2020).

Asimismo, en la Tabla 5 se observa con mayor claridad los datos obtenidos por Welahettige et al., (2020), los cuales fueron tomados a una temperatura constante de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ donde el valor crítico velocidad de corte fue 100 s^{-1} .

Tabla 5. 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, será modelado utilizando el modelo de Herschel-Bulkley, siendo este el que más puede

aproximarse al comportamiento reológico de la mayoría de los fluidos de perforación (American Petroleum Institute, 2001). Matemáticamente, este modelo es el siguiente:

$$\tau = \tau_0 + k\gamma^n \quad (10)$$

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 5 se puede crear un sistema de tres ecuaciones y tres incógnitas, como sigue:

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

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

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

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

$$\tau = 0,1 + 0,0281 \cdot \gamma^{0,7882} \quad (11)$$

Ahora bien, para habilitar en el *solver* los modelos no newtonianos es necesario colocar el comando de texto: *define/models/viscous/turbulence-expert/turb-non-newtonian*. Una vez seleccionado el modelo de Herschel-Bulkley es necesario ingresar las características del lodo, para este estudio fueron introducidos los datos mostrados en la Tabla 6.

Tabla 6. 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

3.3 Solver

Ansys Fluent resuelve las ecuaciones del modelo matemático mediante el método de volúmenes finitos. Para esto, cuenta con dos tipos de *solvers* basados en la densidad o en la presión. El *solver* basado en la presión fue el utilizado en el desarrollo de las simulaciones de estudio, tomando una velocidad de 21,5964 m/s y una presión relativa de 0 Pa, como datos de entrada. Para estos casos tenemos 4 tipos de algoritmos para ser seleccionados: SIMPLE, SIMPLEC, PISO y COUPLED. Los dos primeros son recomendados para estado estacionarios (como este caso de estudio) y PISO y COUPLED para estados transientes.

Los resultados generados por SIMPLE y SIMPLEC para estas simulaciones fueron iguales, por lo que, fue elegido el algoritmo que minimizaba el tiempo de simulación, es decir, SIMPLE. Acompañando estos algoritmos, se aplicó la discretización espacial *Second-Order Upwind*.

3.4 Post-procesamiento

El post-procesamiento del proceso de simulación fue realizado en *CFD-Post* herramienta del Software de *Ansys* donde se facilita el análisis de resultados mediante la creación de contornos, perfiles y gráficas de las variables a estudiar.

4. Análisis de Resultados

En el presente capítulo, se presenta la prueba de independencia de malla, realizado para comprobar el número de volúmenes de control suficientes para correr las simulaciones y obtener una respuesta asertiva, los resultados de las simulaciones para cada una de las cuatro brocas de investigación y el análisis de las variables a estudiar para cada caso.

4.1 Prueba de Independencia de Malla

Para conocer si la cantidad de elementos en los cuales se ha dividido la geometría es la adecuada se hace una prueba de independencia de malla. Este consiste en incrementar la cantidad de volúmenes de control en el dominio y comparar los resultados obtenidos de cierta variable con los de la malla anterior para verificar si hay algún cambio significativo. Si hay un cambio en los resultados se debe seguir aumentando la cantidad de elementos hasta que los resultados no tengan una variación representativa y sean independientes del número de elementos del dominio. Es importante también, utilizar la malla con el mínimo de elementos posibles que tengan resultados independientes ya que a mayor número de elementos el esfuerzo computacional será mayor (Cornejo Cáceres, 2018).

La variable escogida para realizar la prueba de independencia de malla fue el diferencial de presión, el cual fue medido a una altura de 25,9 in y a lo largo de 1,3 in a cada lado del centro, como se muestra en la línea negra de la Figura 27. Fueron realizadas 7 mallas, empezando con un número de elementos de 1'286.843, la cual se fue refinando hasta llegar a 9'725.637 elementos, dicho refinado se muestra con mayor detalle en la Tabla 7. Para cada mallado, fueron tomados resultados de diferencial de presión a lo largo de la línea a evaluar los cuales son los representados en la Figura 28.

A continuación, fue tomado como punto representativo de la Figura 28 el centro de la geometría y se realizó la Figura 29 donde se graficó el resultado de cada velocidad a una posición de 0,0 pulgadas, contra el número de elementos, observándose así, que los valores de velocidad se estabilizan a partir de la malla con 5'841.269 elementos.

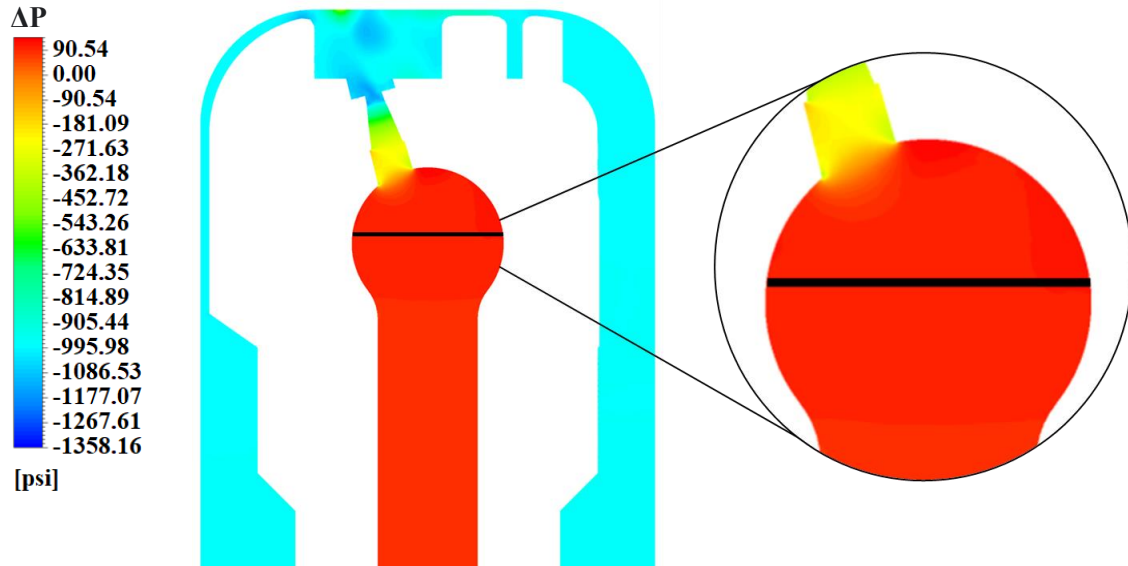


Figura 27. Variable y línea seleccionada para la prueba de malla

Tabla 7. Número de elementos de cada malla generada para la prueba

Refinado (mm)	6	5	4,5	4	3,5	3,3	3
# elementos	1'286.843	2'003.471	2'820.589	4'027.085	5'841.269	8'241.085	9'725.637

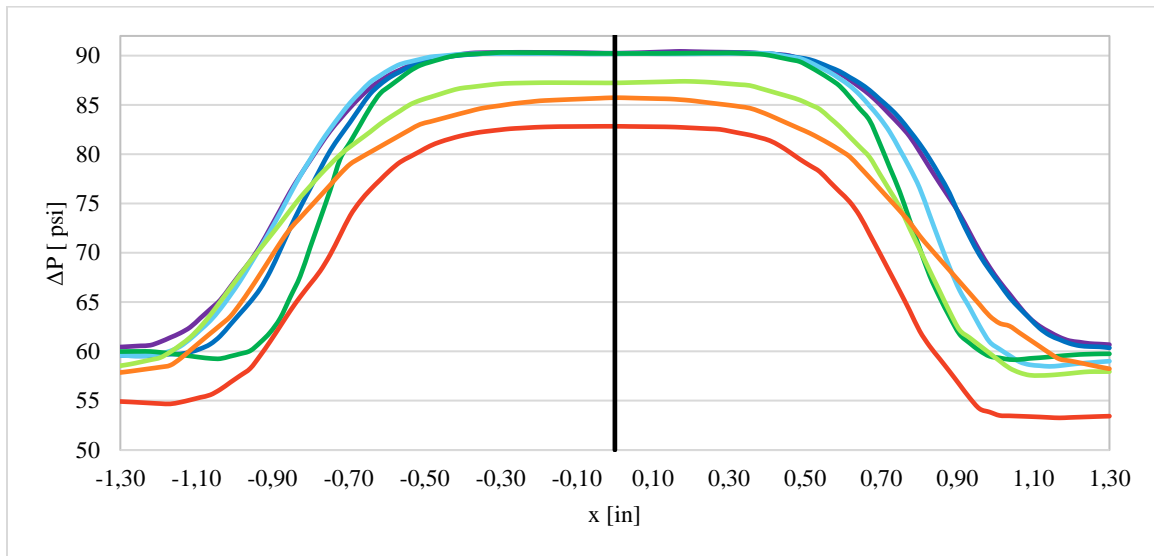


Figura 28. Resultados de velocidad a lo largo de la línea a evaluar, para las mallas — 3 mm; — 3.3 mm; — 3.5 mm; — 4 mm; — 4.5 mm; — 5 mm y — 6 mm

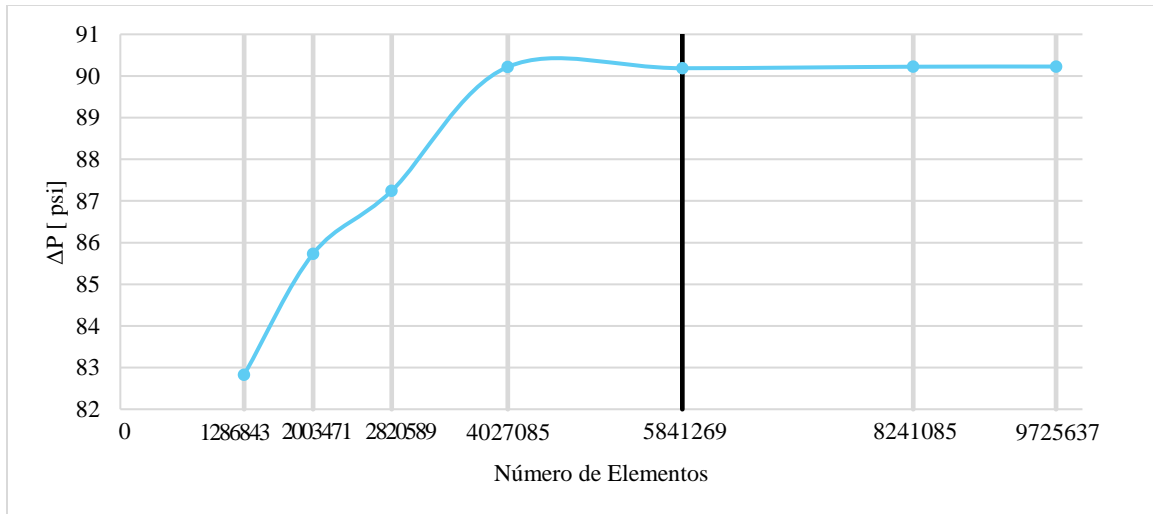


Figura 29. Prueba de malla

4.2 Análisis comparativo de resultados

En esta parte del trabajo, 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.

4.2.1 Broca Base

4.2.1.1 *Diferencial de Presión:* Como se observa en la Figura 30, la presión a lo largo del tramo de la tubería observado es casi 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.

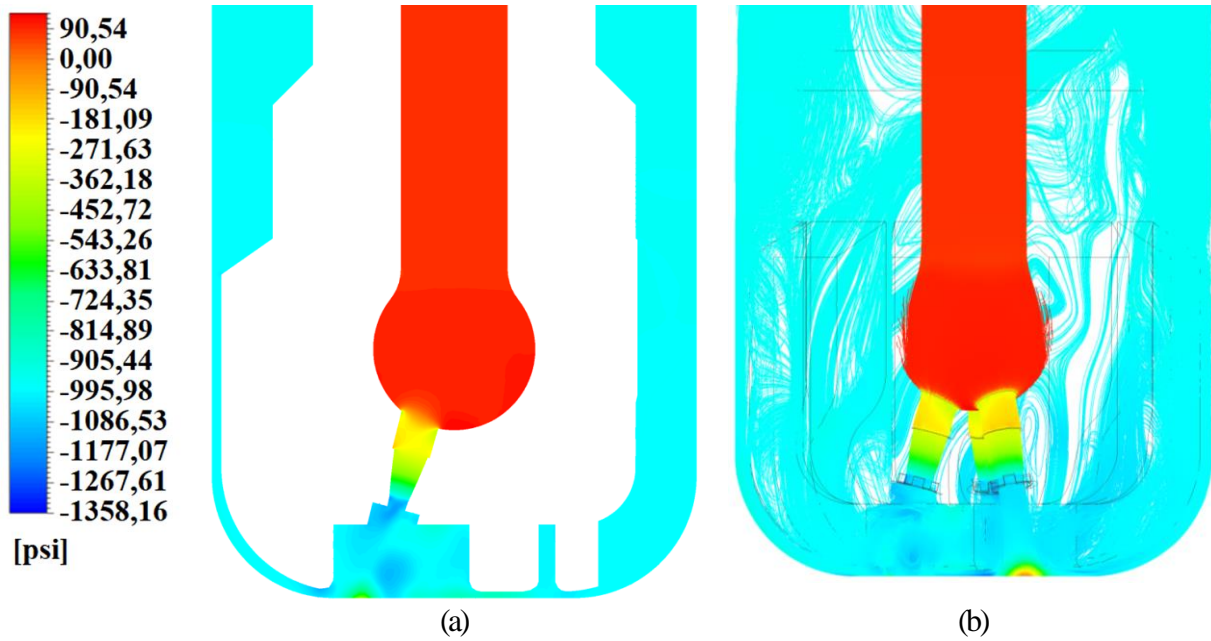


Figura 30. Resultados de Diferencial de Presión para broca Base en (a) dos dimensiones (b) tres dimensiones.

Para observar con mayor claridad el comportamiento del diferencial de presión a lo largo de la broca Base, fueron realizados cortes a doce alturas diferentes, con énfasis en la zona alrededor de las boquillas, así como se evidencia en la Figura 31.

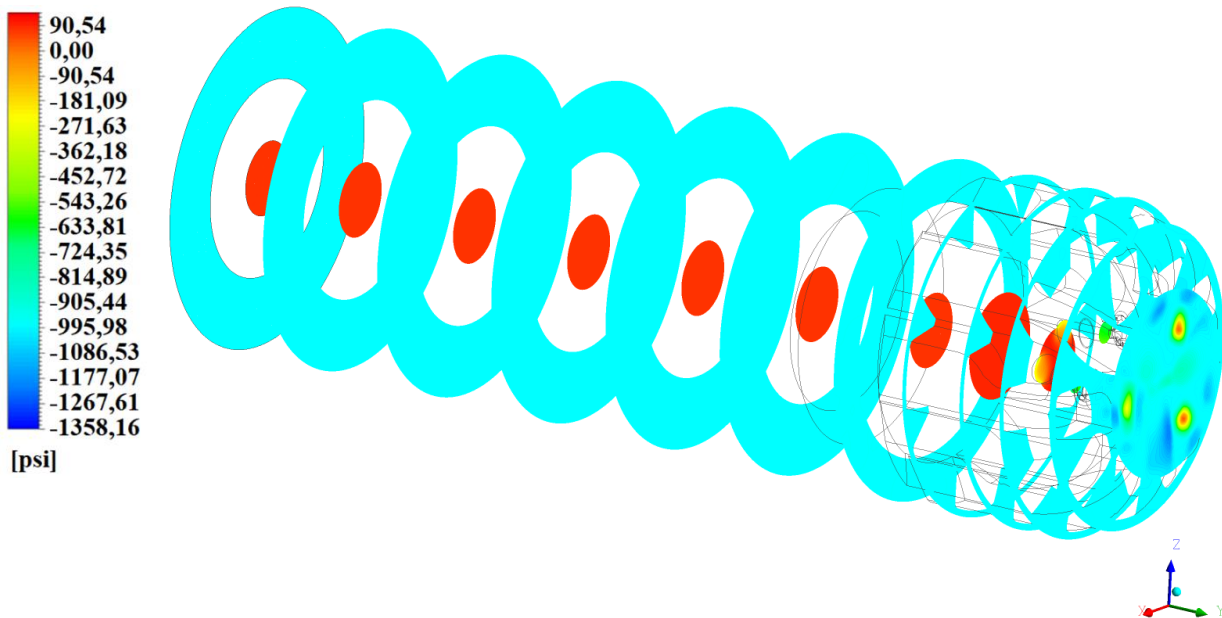


Figura 31. Diferencial de Presión a diferentes alturas de la broca Base.

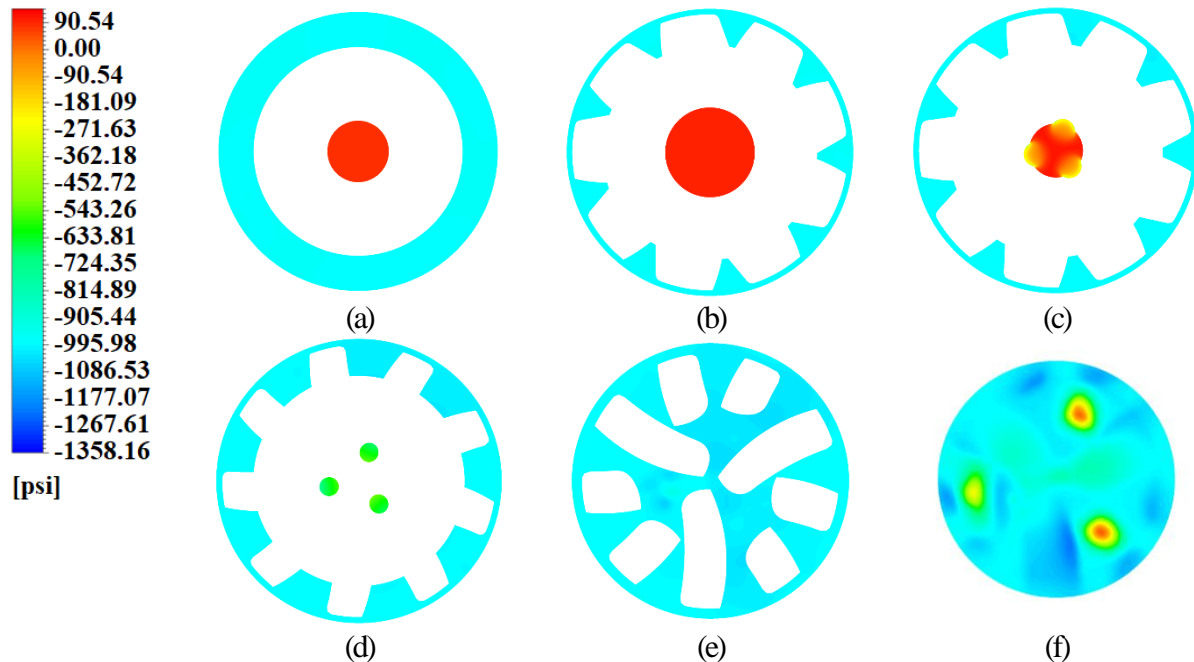


Figura 32. Diferencial de Presión medido a (a) 23 in, (b) 25 in, (c) 27 in, (d) 29 in, (e) 30 in y (f) 31 in para la broca Base.

En la Figura 32, se puede analizar el diferencial de presión medido 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. Este comportamiento también ser observado en la Figura 33.

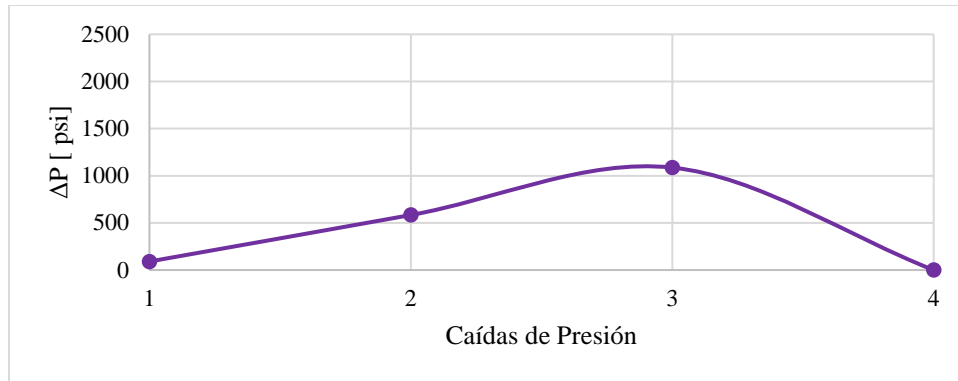
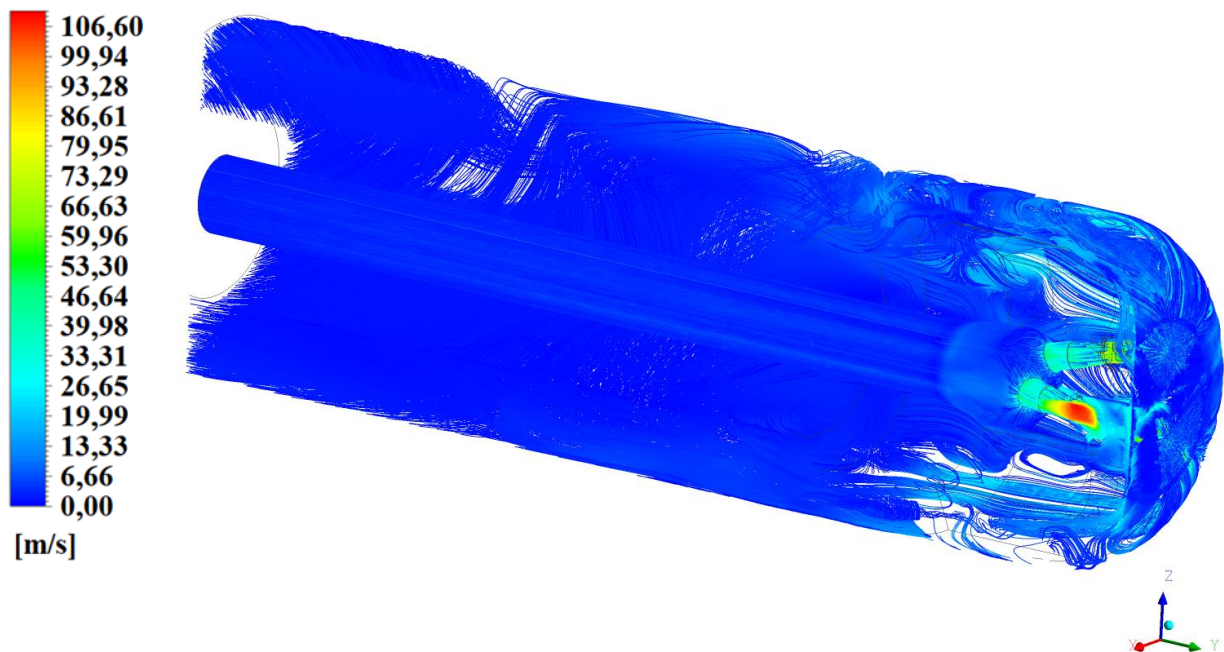


Figura 33. Evolución del diferencial de presión al pasar por tres caídas de presión (1-3) y chocar con la formación (4) para la broca Base.

4.2.1.2 *Velocidad*: Tal como en una perforación sobrebalance, debido a que la tasa flujo es la misma en todos los puntos, la velocidad a largo de la tubería es constante. Dentro de la broca el flujo va de un área de mayor diámetro a una de menor diámetro en el momento en el que fluido de perforación fluye a través de las boquillas, lo que genera un aumento significativo en la velocidad; al salir de estas, 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. Dicho comportamiento es presentado en la *Figura 34*.



(a)

Figura 34. Velocidad para la broca Base

4.2.2 Broca BON

4.2.2.1 *Diferencial de Presión*: El comportamiento del diferencial de presión es presentado en la Figura 35, 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.

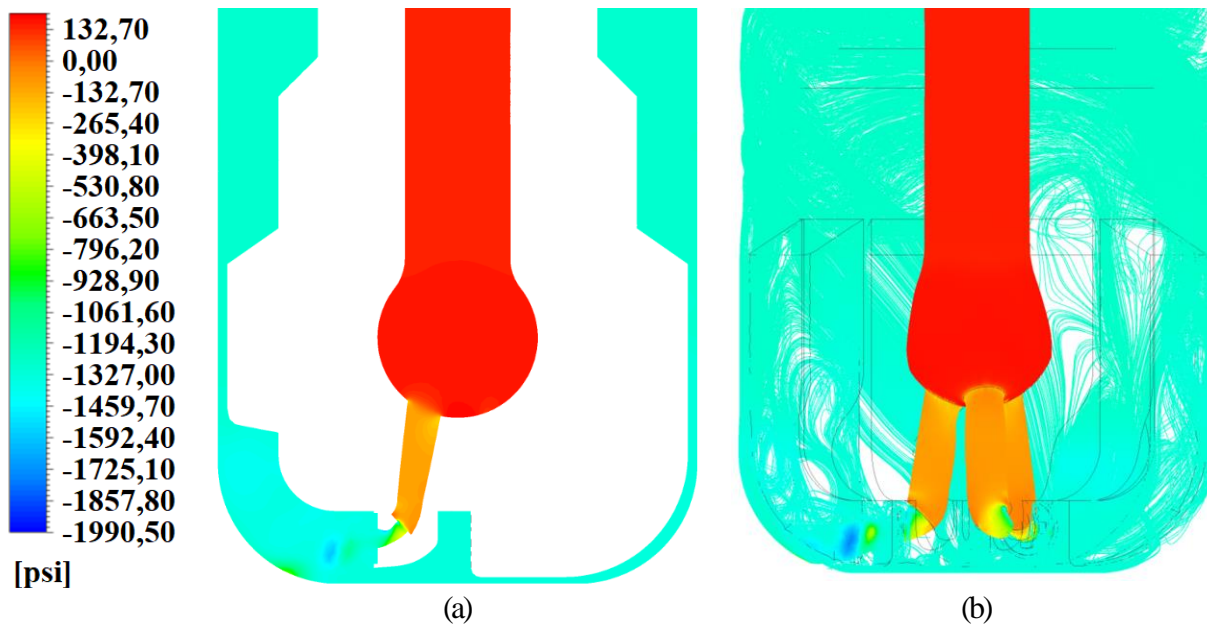


Figura 35. Resultados de Diferencial de Presión para broca BON en (a) dos dimensiones (b) tres dimensiones.

Para observar con mayor claridad el comportamiento del diferencial de presión a lo largo de la broca BON, fueron realizados cortes a doce alturas diferentes, con énfasis en la zona alrededor de las boquillas, así como se evidencia en la Figura 36.

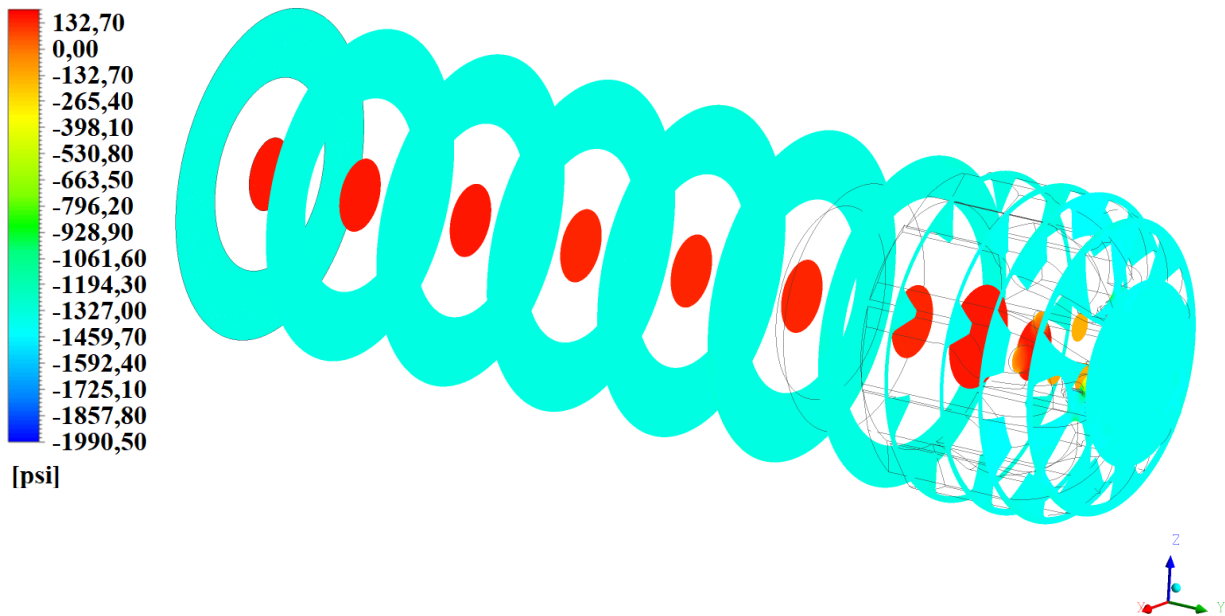


Figura 36. Diferencial de Presión a diferentes alturas de la broca BON.

En la Figura 37, se presenta el comportamiento del diferencial de presión 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 éstas 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. Este comportamiento también ser observado en la Figura 38.

Cabe recordar que Vidrine y Benit (1968), mediante estudios de laboratorio y campo llegaron a la conclusión que la tasa de penetración es afectada, notablemente, por los cambios en el diferencial de presión generado por la interacción entre el lodo y la formación en fondo de pozo. Teóricamente, un aumento en la caída de presión, respecto al lodo, genera un aumento en la ROP.

Por tanto, presentar valores de diferencial de presión de 1200 psi permite la generación de un estado de bajo balance entre la broca y las paredes del pozo contribuyendo así un aumento significativo de las ROP.

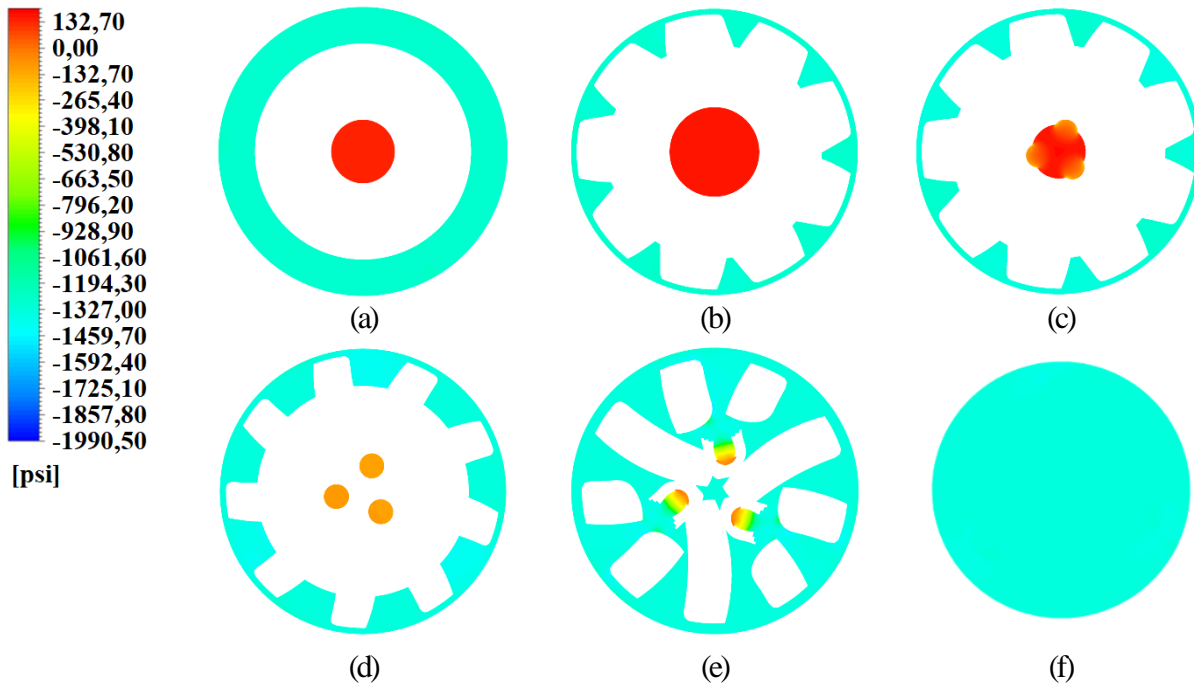


Figura 37. Diferencial de Presión medido a (a) 23 in, (b) 25 in, (c) 27 in, (d) 29 in, (e) 30 in y (f) 31 in para la broca BON.

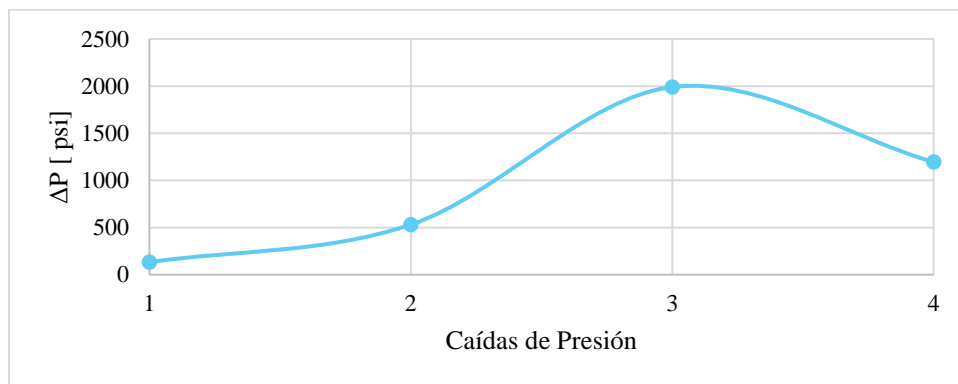


Figura 38. Evolución del diferencial de presión al pasar por tres caídas de presión (1-3) y chocar con la formación (4) para la broca BON.

4.2.2.2 *Velocidad*: 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 39.

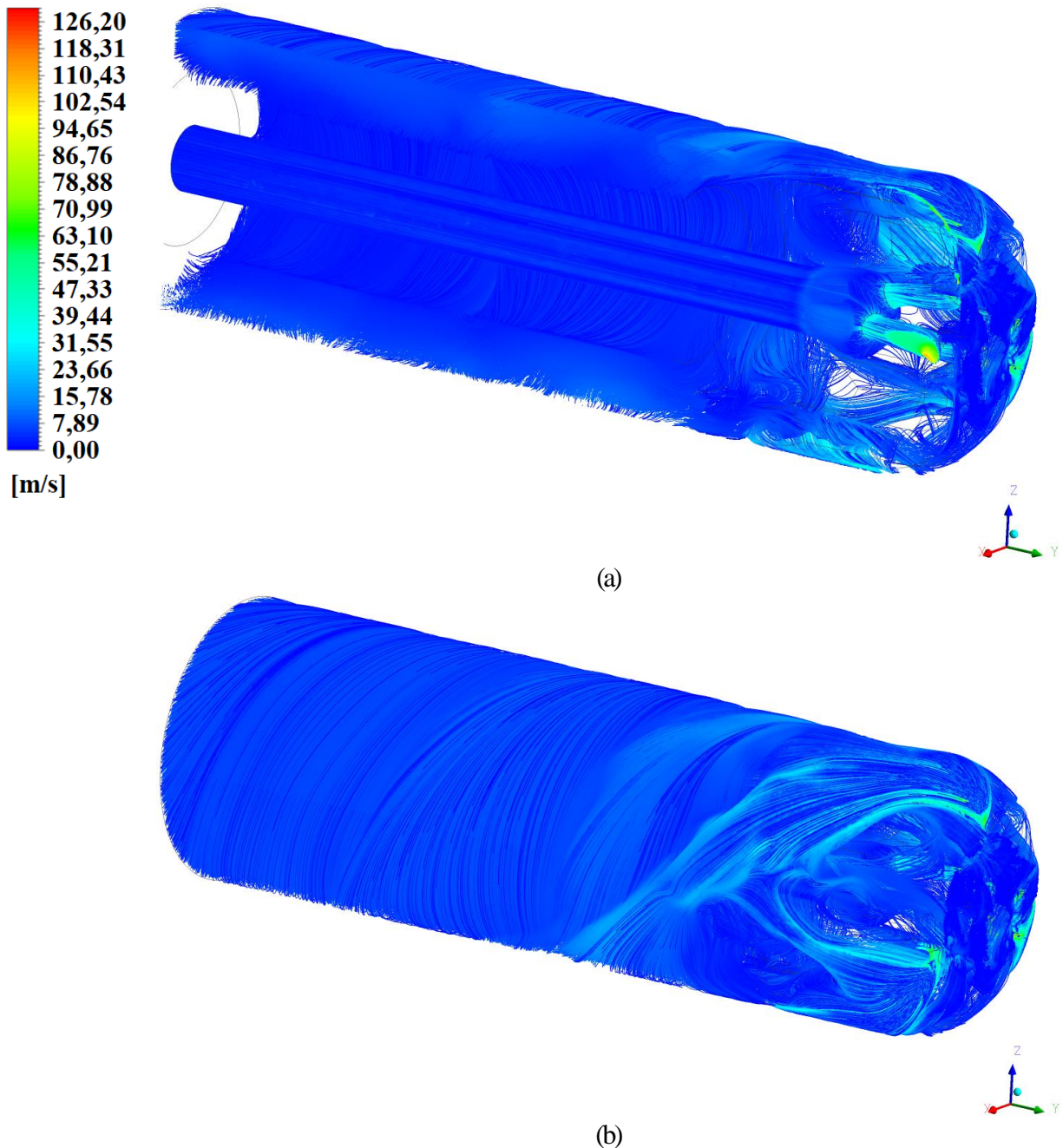


Figura 39. Velocidad para la broca BON con vistas al (a) interior (b) anular.

4.2.3 Broca BONAT

4.2.3.1 *Diferencial de Presión*: Puede observarse en la Figura 40 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.

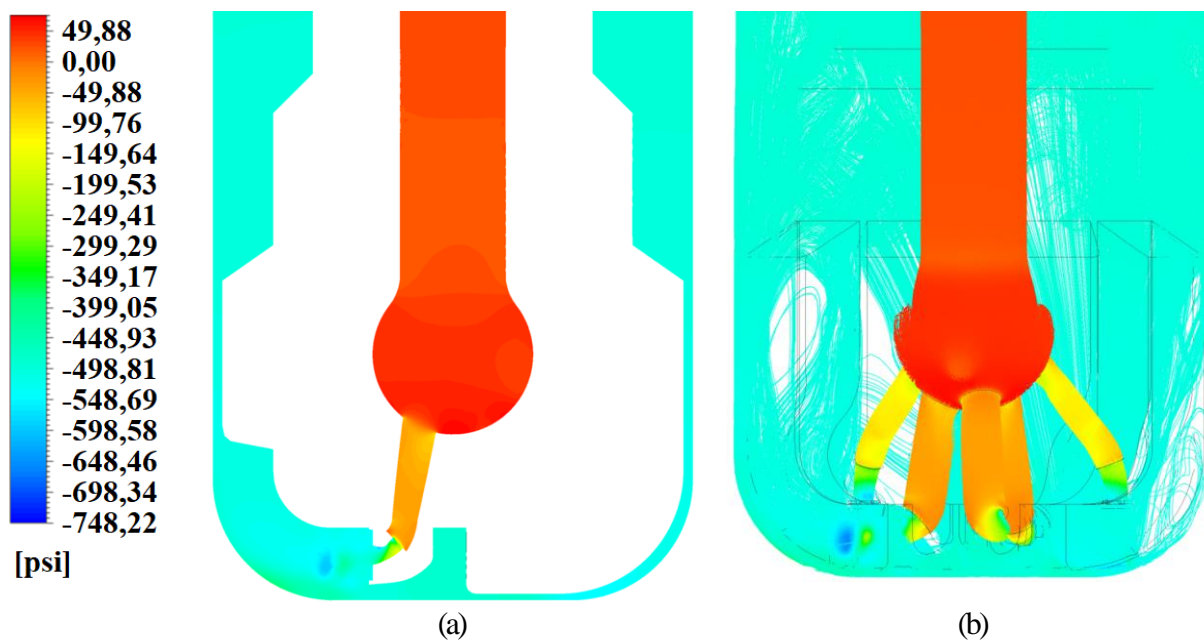


Figura 40. Diferencial de Presión para la broca BONAT.

Para observar con mayor claridad el comportamiento del diferencial de presión a lo largo de la broca BONAT, fueron realizados cortes a doce alturas diferentes, con énfasis en la zona alrededor de las boquillas, así como se evidencia en la Figura 36.

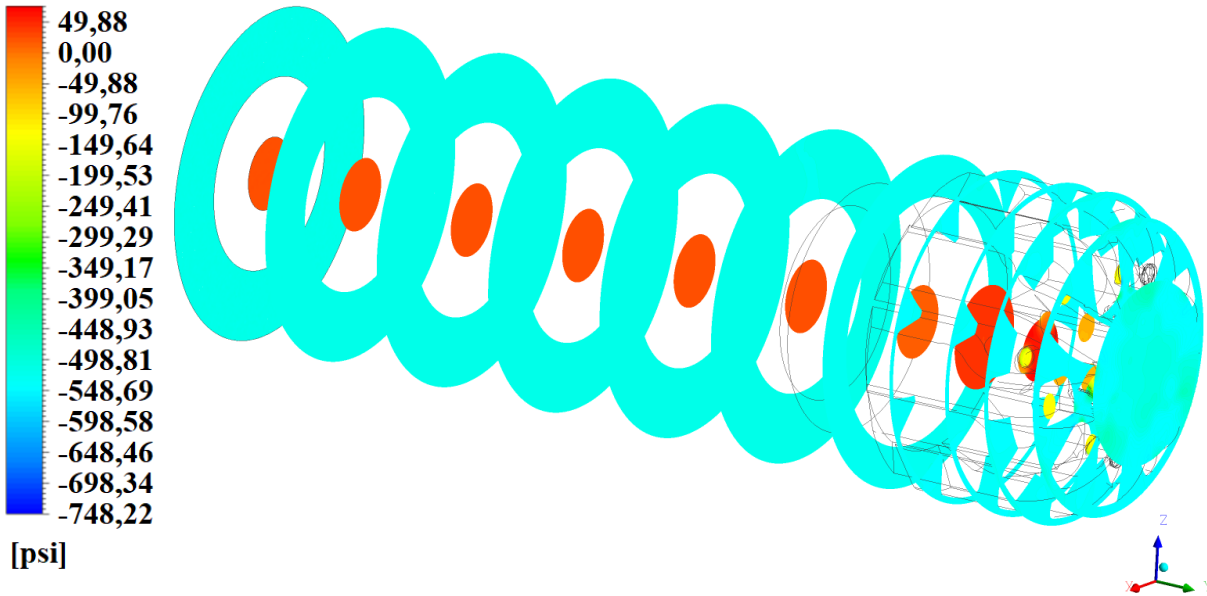


Figura 41. Diferencial de Presión a diferentes alturas de la broca BONAT.

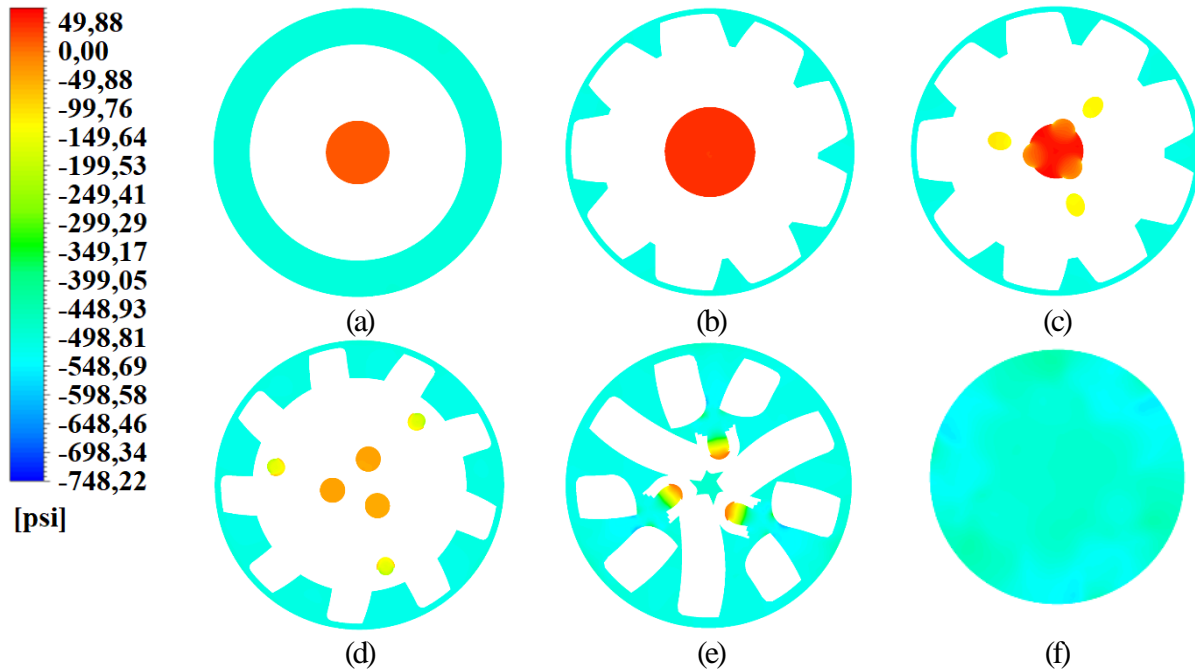


Figura 42. Diferencial de Presión medido a (a) 23 in, (b) 25 in, (c) 27 in, (d) 29 in, (e) 30 in y (f) 31 in para la broca BONAT.

La Figura 42 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. Estos valores de caída de presión contribuyen a un aumento de la tasa de penetración. Este comportamiento también ser observado en la Figura 43.

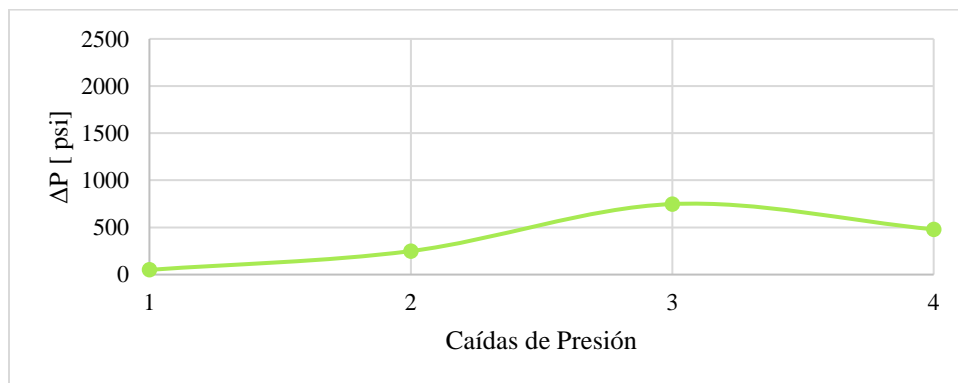


Figura 43. Evolución del diferencial de presión al pasar por tres caídas de presión (1-3) y chocar con la formación (4) para la broca BONAT.

4.2.3.2 *Velocidad*: 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.

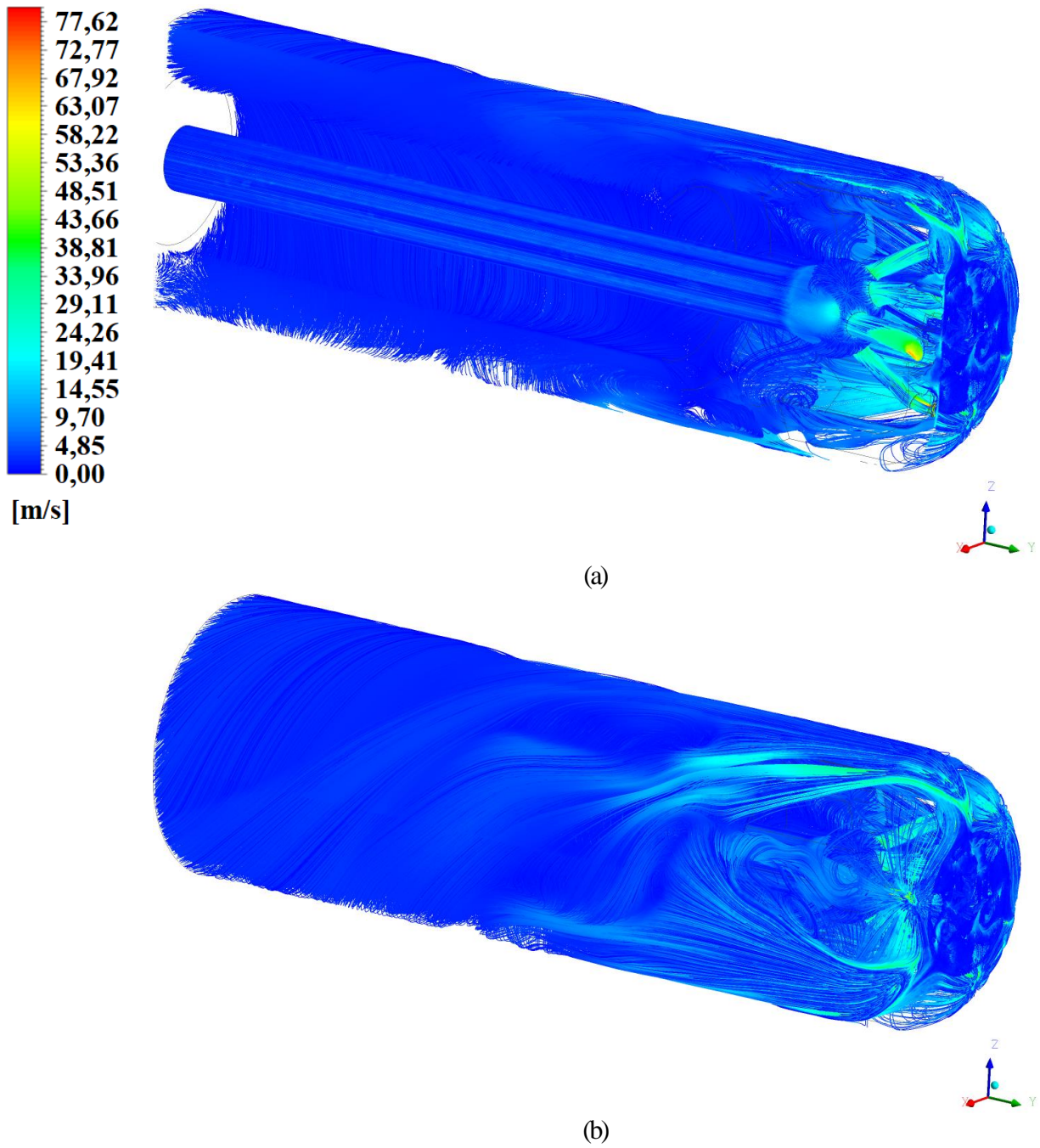


Figura 44. Velocidad para la broca BONAT con vistas al (a) interior (b) anular.

4.2.4 Broca BOMIX

4.2.4.1 *Diferencial de Presión*: Puede observarse en la Figura 41 que la presión a lo largo del tramo de la tubería observado es casi constante. Al igual que las brocas anteriores, ocurre una caída de presión en el área de las boquillas. Igualmente, 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 400 psi. Cuando el fluido choca con la formación, se observan dos comportamientos, por tanto, se pueden observar distintos valores de caídas de presión en la cara de la formación. Aunque se genera un aumento de presión tal como en los dos casos anteriores, el diferencial no alcanza valores de 0 psi.

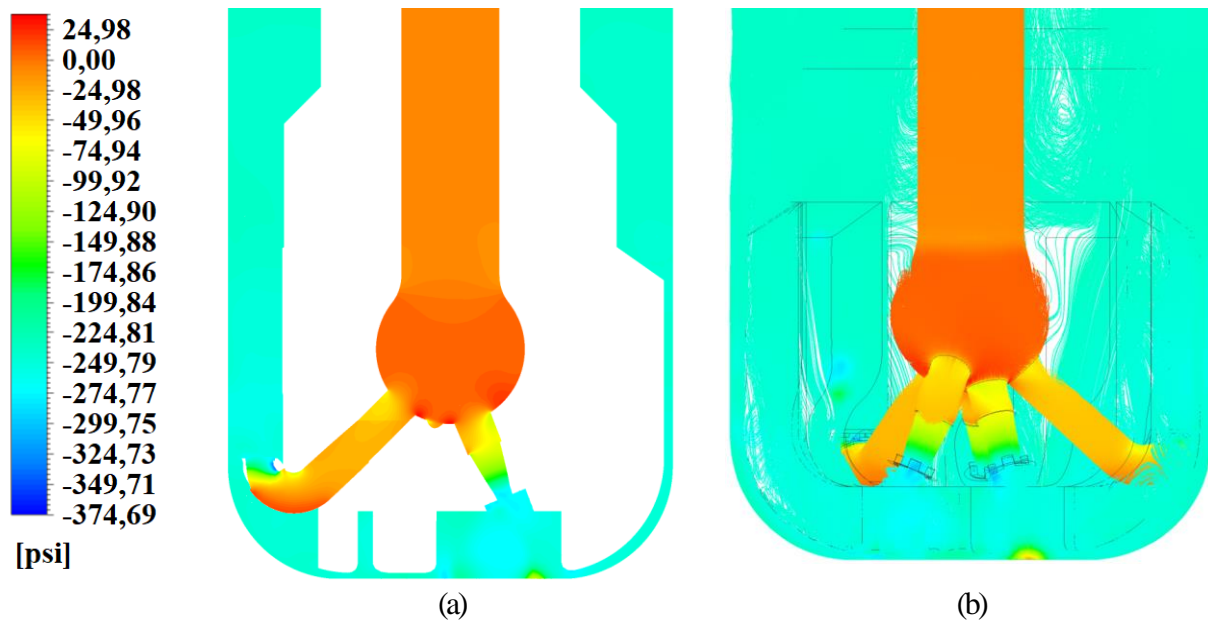


Figura 45. Diferencial de Presión para la broca BOMIX.

Para observar con mayor claridad el comportamiento del diferencial de presión a lo largo de la broca BOMIX, fueron realizados cortes a trece alturas diferentes, con énfasis en la zona alrededor de las boquillas, así como se evidencia en la Figura 46.

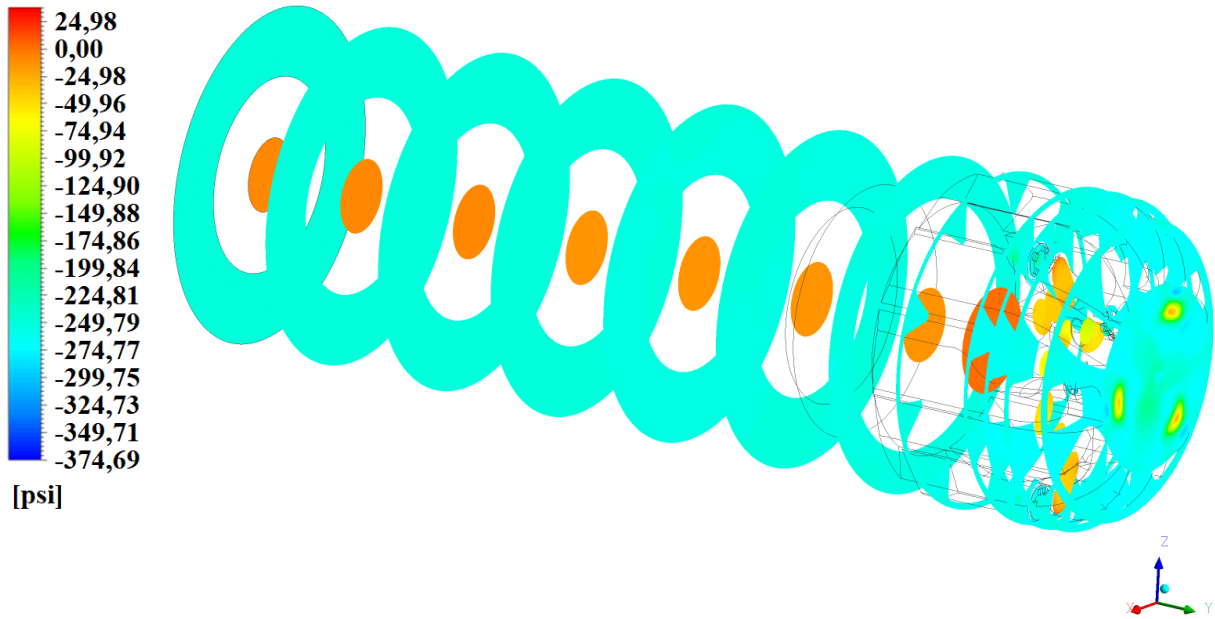


Figura 46. Diferencial de Presión a diferentes alturas de la broca BOMIX.

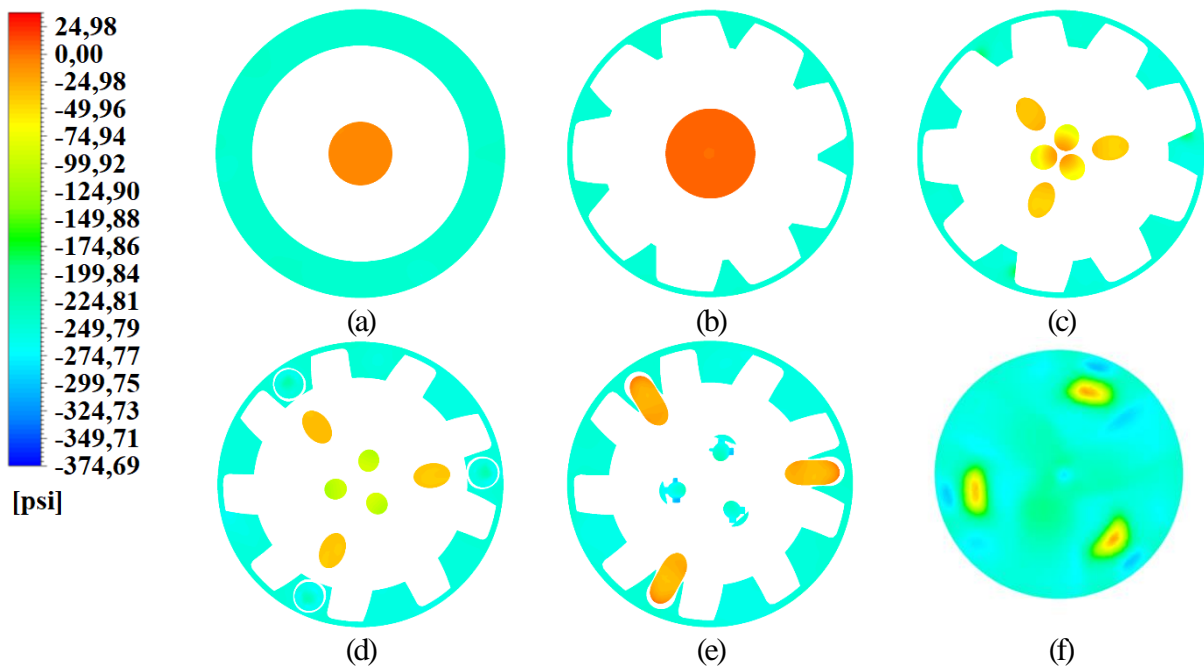


Figura 47. Diferencial de presión medido a (a) 23 in, (b) 25 in, (c) 27.5 in, (d) 28 in, (e) 29 in y (f) 31 in para la broca BOMIX.

La Figura 47 discretiza el diferencial de presión a diferentes alturas: el fluido entra a las boquillas a una altura de 27.5 pulgadas donde se observa la primera caída de presión de 75 psi. A una altura de 28 pulgadas se observa la segunda caída de presión que para las boquillas que apuntan a la formación es de 120 psi, mientras que para las boquillas con inclinación de noventa grados este valor ronda los 30 psi. A esta altura, se encuentra la salida de las últimas, donde el diferencial

de presión presenta una caída hasta de 300 psi. La tercera caída de presión para las boquillas que apuntan a la formación se presenta a una altura de 29 pulgadas con valores de 180 psi. En este punto, el diferencial de presión total es aproximadamente de 400 psi. A la altura de 31 pulgadas, el fluido que choca con la formación gana 400 psi, mientras que el lodo expulsado por las boquillas de noventa grados mantiene la caída de presión, debido a que no colisiona directamente con las paredes del pozo. Por tanto, se pueden observar distintos valores de caídas de presión en la cara de la formación. Esta combinación de fluidos da como resultado que el fluido alrededor de la broca presenta valores de diferencial de presión de 250 psi. Estos valores de caída de presión pueden contribuir a un aumento de la tasa de penetración. Este comportamiento también ser observado en la Figura 48.

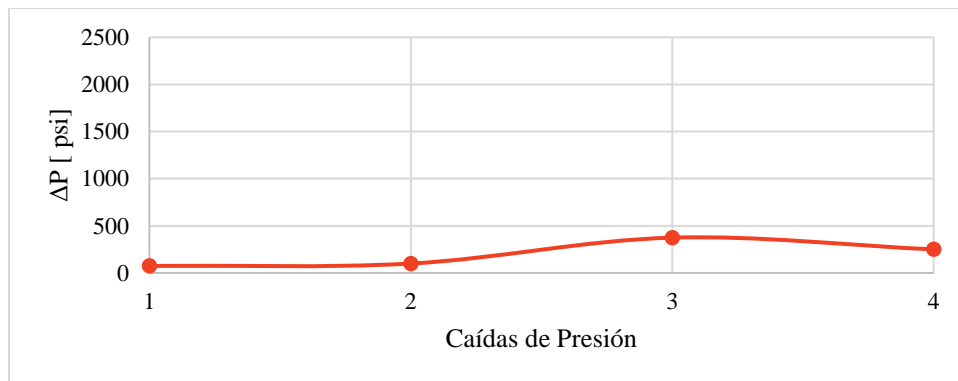


Figura 48. Evolución del diferencial de presión al pasar por tres caídas de presión (1-3) y chocar con la formación (4) para la broca BOMIX.

4.2.4.2 *Velocidad:* Tal como en la broca Base, la velocidad a largo de la tubería es constante. En las boquillas que apuntan a la formación, al salir el fluido de estas la velocidad se pierde completamente en el área de la cara del pozo y el lodo empieza a subir por las paredes de este presentando un comportamiento lineal. Este flujo se ve perturbado por el lodo expulsado por las boquillas de noventa grados, debido a que a la salida de estas el fluido presenta velocidades de 30 m/s, lo cual genera creación de vórtices en dicha área, tal como se observa en la Figura 49.

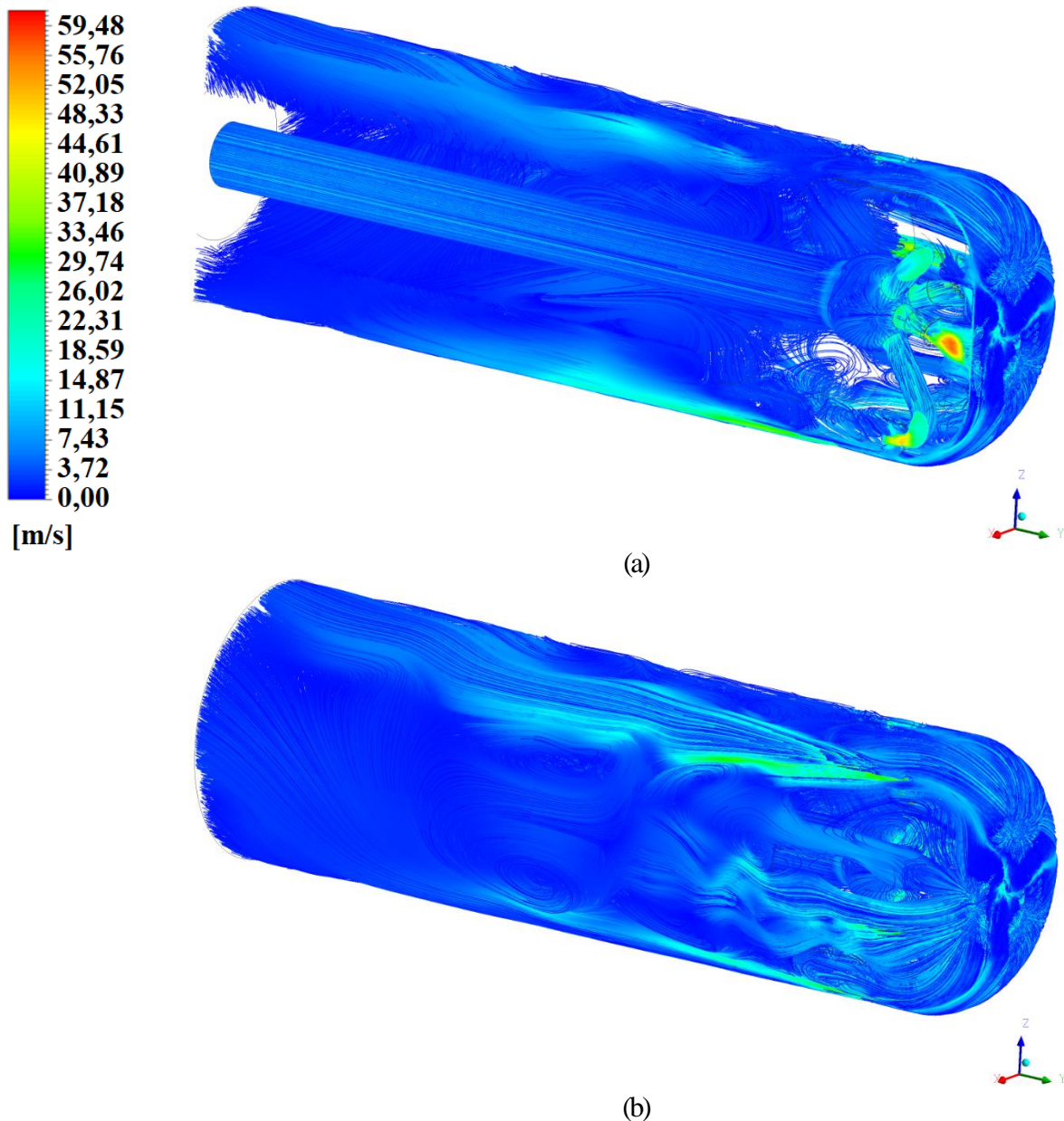


Figura 49. Velocidad para la broca BOMIX con vistas al (a) interior (b) anular.

4.2.5 Diferencial de Presión Brocas de estudio

Con la finalidad de observar el comportamiento del diferencial de presión en forma simultánea de las cuatro brocas de este estudio, se presenta la Figura 50, donde se observa que las brocas BON, BONAT y BOMIX al chocar con la formación presentan valores de diferencial de presión diferentes a 0, lo cual puede contribuir a un aumento de la tasa de penetración.

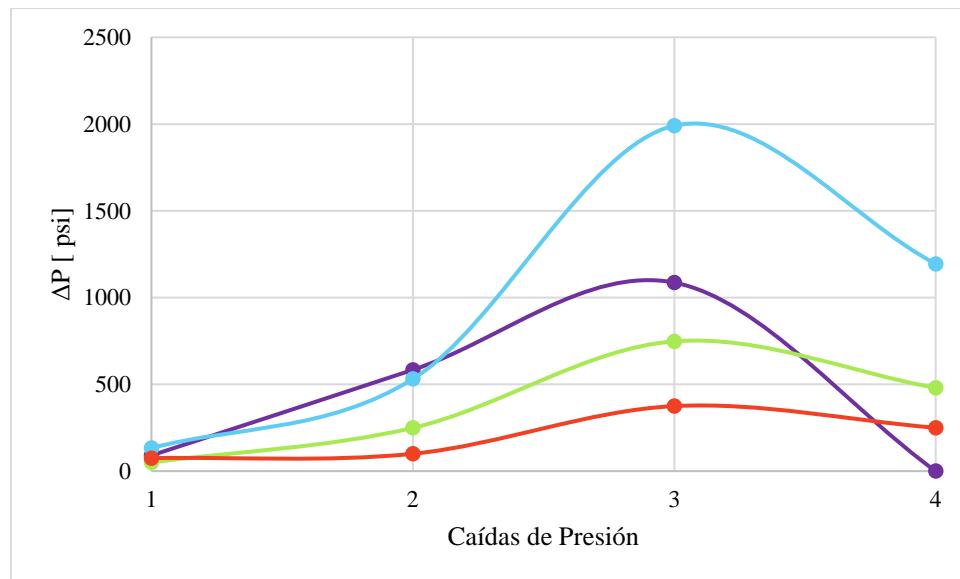


Figura 50. Evolución del diferencial de presión al pasar por tres caídas de presión (1-3) y chocar con la formación (4) para las brocas Base; BON; BONAT y BOMIX.

5. Conclusiones

En este trabajo 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 de fluidos computacional para una broca con 3 boquillas a 90° (BON), 6 boquillas de las cuales 3 apuntan a la formación y 3 a 90° (BONAT) y 6 boquillas donde 3 apuntan a la formación y las 3 a 90° con una dirección opuesta a las primeras (BOMIX).

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 y BOMIX, se observa un comportamiento híbrido, entre perforación sobrebalance y DUBD, donde la caída de presión total presenta valores de 500 y 200 psi, respectivamente.

Aunque en las brocas BON, BONAT y BOMIX la caída de presión no aumenta al chocar con la formación, es importante resaltar que la caída de presión permanece en valores alrededor de 1200, 500 y 200 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 90°. Al comparar las brocas Base y BON, ambos valores de diferencial distan entre sí unos 1200 psi, por lo tanto, la configuración de la broca BON es la más recomendada para mejorar las tasas de penetración.

6. Recomendaciones

Se recomienda continuar investigando en la técnica DUBD, alcanzable mediante el diseño de brocas, especialmente en la ubicación y ángulo de las boquillas. Para próximas investigaciones se recomienda realizar una modificación diferente a la presentada en este trabajo; entre los arreglos a tener en cuenta se podría considerar trabajar con otro tipo de broca o con una broca PDC con un número diferente de aletas y boquillas.

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.

Para próximas simulaciones, realizar una simulación que adapte el comportamiento de rotación de la broca con la finalidad de probar un escenario dinámico en la zona alrededor y debajo de la broca, con el propósito de ver el comportamiento de la broca propuesta en una perforación con la sarta en movimiento.

Referencias Bibliográficas

Aadnoy, B., Cooper, I., Miska, S., Mitchell, R. F., & Payne, M. L. (2009). *Advanced Drilling and Well Technology*. Society of Petroleum Engineers.

Akhshik, S., & Rajabi, M. (2018). CFD-DEM modeling of cuttings transport in underbalanced drilling considering aerated mud effects and downhole conditions. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 160, 229-246. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.05.012>

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 Advantage Staff. (2018). *Gallery: Oil and Gas Industry Applications*. 2015.

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>

Baker Hughes. (2014). *Baker Hughes Drill Bits Catalog*. <https://books.apple.com/mx/book/baker-hughes-drill-bits-catalog/id926514651>

Batchelor, G. K. (2000). *An Introduction to Fluid Dynamics* (Cambridge Univ.Press). <http://adsabs.harvard.edu/abs/2000ifd..book.....B>

Bennion, D. B., Thomas, F. B., Bietz, R. F., & Bennion, D. W. (1998). Underbalanced Drilling: Praises and Perils. *SPE Drilling & Completion*, 13(04), 214-222. <https://doi.org/10.2118/52889-PA>

Bybee, K. (2005). New Bit Design and Cutter Technology Extend PDC Applications to Hard-Rock Drilling. *Journal of Petroleum Technology*, 57(12), 63-64. <https://doi.org/10.2118/1205-0063-JPT>

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>

Cornejo Cáceres, J. S. (2018). *Simulación numérica de un separador gas-líquido tipo ciclón cilíndrico utilizando Dinámica De Fluidos Computacional*. Universidad Industrial de Santander.

Cunningham, R. A., & Eenink, J. G. (1959). Laboratory Study of Effect of Overburden, Formation and Mud Column Pressures on Drilling Rate of Permeable Formations. *Transactions of the AIME*, 217(01), 9-17. <https://doi.org/10.2118/1094-G>

El Neiri, M. H., 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>

Fu, J., Li, G., Shi, H., Niu, J., & Huang, Z. (2012). A Novel Tool To Improve the Rate of Penetration—Hydraulic-Pulsed Cavitating-Jet Generator. *SPE Drilling & Completion*, 27(03), 355-362. <https://doi.org/10.2118/162726-PA>

Ghobadpouri, S., Hajidavalloo, E., & Noghrehabadi, A. R. (2017). Modeling and simulation of gas-liquid-solid three-phase flow in under-balanced drilling operation. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 156, 348-355. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.06.015>

Ghosh, R., Schunnesson, H., & Kumar, U. (2016). Evaluation of operating life length of rotary tricone bits using Measurement While Drilling data. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 83, 41-48. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.12.015>

Hafez, M., Aboufotouh, M., & Abd El Moneim, M. (2019, noviembre 11). *Case Study of Self-Adjusting PDC Bit Technology Reducing Drilling Dynamics, Improving Performance and Avoids NPT in the Western Desert of Egypt*. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference. <https://doi.org/10.2118/197905-MS>

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>

Hareland, G., Wu, A., & James, J. A. (2009, enero 1). *Bearing Wear Model for Roller Cone Bits*. Middle East Drilling Technology Conference & Exhibition. <https://doi.org/10.2118/125644-MS>

Hegde, C., Daigle, H., Millwater, H., & Gray, K. (2017). Analysis of rate of penetration (ROP) prediction in drilling using physics-based and data-driven models. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 159. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.09.020>

Hegde, C., Millwater, H., Pycrz, M., Daigle, H., & Gray, K. (2019). Rate of penetration (ROP) optimization in drilling with vibration control. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 67, 71-81. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2019.04.017>

Hopkins, P. F. (2015). A new class of accurate, mesh-free hydrodynamic simulation methods. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 450(1), 53-110. <https://doi.org/10.1093/mnras/stv195>

Jaffar, A. K., Birch, R. M., Teasdale, P., & Al Ani, S. (2005, enero 1). *New PDC Technology Significantly Improves Performance in Drilling Deep Khuff Wells for a Major Operator in Abu Dhabi*. SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition. <https://doi.org/10.2118/96792-MS>

Jiménez De la Ossa, K. J., Gonzalez Silva, G., Prieto Jimenez, N., & Saavedra, N. (2019). *Análisis del efecto de una modificación en el ángulo de boquillas para una Broca PDC aplicando Dinámica de Fluidos Computacional*. Universidad Industrial de Santander.

JPT staff, _ . (1998). Underbalanced Drilling in the Williston Basin. *Journal of Petroleum Technology*, 50(09), 66-67. <https://doi.org/10.2118/0998-0066-JPT>

Karpushin, O. V. (2005, enero 1). *Five Years of the Oil Production Operation in the Russian Arctic Offshore: Challenges and Achievements - The Way Forward*. International Petroleum Technology Conference. <https://doi.org/10.2523/IPTC-10326-ABSTRACT>

Kundu, P. K., Cohen, I. M., & Dowling, D. R. (Eds.). (2012). Chapter 4—Conservation Laws. En *Fluid Mechanics (Fifth Edition)* (pp. 95-169). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382100-3.10004-6>

Mitchell, R. F., & Miska, S. (2011). *Fundamentals of Drilling Engineering*. Society of Petroleum Engineers.

Mohammed, H., Abbas, A., & Dahm, H. (2018, junio 20). *Wellbore Instability Analysis for Nahr Umr Formation in Southern Iraq*.

Motahhari, H. R. (2008). *Improved drilling efficiency technique using integrated pdm and pdc bit parameters*. <https://doi.org/10.11575/PRISM/2079>

Napitupulu, E. K. (2014). *10 inch PDC Oil Drill Bit*. <https://grabcad.com/library/10-inch-pdc-oil-drill-bit-1>

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>

Nelik, L., & Brennan, J. (2005). Chapter 1—BENEFITS OF PROGRESSING CAVITY PUMPS. En L. Nelik & J. Brennan (Eds.), *Gulf Pump Guides: Progressing Cavity Pumps*,

Downhole Pumps and Mudmotors (pp. 1-3). Gulf Publishing Company.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-9765113-1-1.50008-X>

Oilfield Team. (s. f.). *Underbalanced drilling vs Conventional drilling*. Recuperado 30 de octubre de 2020, de <https://oilfieldteam.com/en/a/learning/Underbalanced-drilling-Conventional-drilling>

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>

Prieto Jiménez, N., Silva, G., & Chaves Guerrero, A. (2018, marzo 30). *Estudio fluidodinámico de la combustión no premezclada de coque en regeneradores tipo riser usando CFD*.

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.

Schlumberger. (2014). PDC Bit Technology for the 21st Century. *Oilfield Review*, 26(2), 48-57.

Sivagnanam, M. (2014). *PDC Drill Bit Redesign and Simulation for Optimized Performance*. <https://doi.org/10.11575/PRISM/27280>

Smith International. (2002). *Tecnología de Barrenas Impregnadas*. Smith Technologies.

Soares, C., Daigle, H., & Gray, K. (2016). Evaluation of PDC bit ROP models and the effect of rock strength on model coefficients. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 34, 1225-1236. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.08.012>

Tu, J., Yeoh, G. H., & Liu, C. (2018). *Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach*. Butterworth-Heinemann.

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.

Xiong, H., & Shan, D. (2003, enero 1). *Reservoir Criteria for Selecting Underbalanced Drilling Candidates*. IADC/SPE Underbalanced Technology Conference and Exhibition. <https://doi.org/10.2118/81621-MS>

Yahiaoui, M., Gerbaud, L., Paris, J.-Y., Denape, J., & Dourfaye, A. (2013). A study on PDC drill bits quality. *Wear*, 298-299, 32-41. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2012.12.026>