

Análisis del efecto de una modificación en el ángulo de boquillas para una broca PDC
aplicando Dinámica de Fluidos Computacional

Kelly Jhoanna Jiménez De la Ossa

Trabajo de grado para optar por el título de: Ingeniera de Petróleos

Director

Germán González Silva

Ph.D. en Ingeniería Química

Co-directores

Natalia Prieto Jiménez

M.Sc. en Ingeniería Química, Ph.D. (c)

Nestor Fernando Saavedra Trujillo

M.Sc. en Ingeniería de Petróleos

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-químicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Bucaramanga

2019

Dedicatoria

A Dios.

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, este triunfo es más suyo que mío.

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 cariño incondicional, 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 mis abuelos, tíos y primos y en especial a mi Mamita por su incondicional cariño y estar pendientes de mí en todo momento.

A mis pastores Tomás, Mercedes, Álvaro y Ruby y a todos mis hermanos, por sus oraciones.

A Luis Alejandro, por haber traído paz y tranquilidad a mi vida en los momentos más grises, gracias por tanta ayuda y tantos aportes en el desarrollo de esta tesis y en mi vida, eres un ejemplo a seguir, tienes mi total admiración y cariño, te quiero.

A Cristian Daza, mi gran amigo, mi compañero de carrera, gracias por estos cinco años de ayuda sincera, por compartir conmigo alegrías y tristezas, por tu apoyo académico y personal durante esta travesía, en ti y en Manu encontré más que unos buenos amigos: hermanos.

A mis amigos Senior, Laura D., Laura V., Daniel, Edgar, a pesar de la distancia nuestra amistad ha seguido intacta, los quiero muchachos. A mis compañeros y colegas, Julio, Lau, Tadeo, Carlos A., Willy, Edna, Cindy, Dani A., Pati, Yan, Lucho, Sebas, Fredy, Six, Fonseca, Miguel, Dani M., Luis M., Jose T., Jose V., tienen un lugar muy especial en mi corazón.

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	17
1. Marco Teórico	18
1.1 Brocas de perforación utilizadas en la actualidad	18
1.1.1 Broca de conos rotantes.....	21
1.1.2 Broca de cortadores fijos.....	21
1.1.2.1 Brocas PDC.....	22
1.1.2.2 Brocas Impregnadas.....	23
1.2 Técnicas de perforación en la industria petrolera.....	25
1.2.1 Overbalanced Drilling (OBD).....	27
1.2.2 Underbalanced Drilling (UBD).....	27
1.2.3 Dynamic Underbalanced Drilling (DUBD)	28
1.3 CFD en la industria petrolera	29
2. Modelo Matemático	33
2.1 Ecuaciones de continuidad y momentum.....	33
2.1.1 Ecuación de conservación de masa.....	33
2.1.2 Ecuación de conservación de cantidad de movimiento.....	34
2.2 Modelo de turbulencia.....	34
2.2.1 Ecuaciones de transporte para el modelo standard $k - \epsilon$	35
2.3 Tratamiento mejorado de pared.....	36

2.3.1	Modelamiento de doble capa para el tratamiento mejorado de pared.....	36
2.4	Modelo numérico	36
2.4.1	Discretización Espacial.	37
2.4.1.1	First-Order Upwind.	37
2.4.1.2	Second-Order Upwind.....	37
3.	Metodología	38
3.1	Identificación del problema.....	39
3.2	Pre-procesamiento.....	39
3.2.1	Geometría.	40
3.3	Mallado.....	42
3.3.1	Modelos físicos.	50
3.3.2	Sustancias.	50
3.4	Solver	51
3.5	Post-procesamiento	51
4.	Análisis de Resultados	51
4.1	Test de Independencia de Malla.....	52
4.2	Análisis de resultados.....	53
4.2.1	Velocidad.	54
4.2.2	Diferencial de presión.	60
5.	Conclusiones	68

6. Recomendaciones.....	70
Referencias Bibliográficas	71

Lista de Tablas

Tabla 1. Aplicaciones de CFD en la industria del petróleo y gas. (ANSYS Advantage Staff, 2018)	33
Tabla 2. Calidad de elementos de la malla respecto a la Ortogonalidad y Oblicuidad, broca de 31,94°.....	47
Tabla 3. Calidad de elementos de la malla respecto a la Ortogonalidad y Oblicuidad, broca de 75,14°.....	47
Tabla 4. Propiedades del fluido de perforación utilizado en las simulaciones	50

Lista de Figuras

Figura 1. Mapa generalizado: Análisis bibliométrico brocas utilizadas en perforación petrolera. (VOSviewer, 2019).....	19
Figura 2. Países con mayores investigaciones sobre brocas en el mundo, junto con los años de investigación. (VOSviewer, 2019).....	19
Figura 3. Broca de conos rotantes y broca de cortadores fijos. (Aadnoy, Cooper, Miska, Mitchell, & Payne, 2009)	20
Figura 4. Broca PDC. (Aadnoy et al., 2009).....	22
Figura 5. ONYX 360, Cortadores que rotan 360° sobre su propio eje. (Schlumberger, 2018)....	23
Figura 6. Brocas impregnadas (Baker Hughes, 2014)	24
Figura 7. Mapa generalizado: Análisis bibliométrico técnicas de perforación utilizadas en la industria petrolera. (VOSviewer, 2019).....	25
Figura 8. Países con mayores investigaciones sobre técnicas de perforación en el mundo, junto con los años de investigación. (VOSviewer, 2019).....	26
Figura 9. Mapa generalizado: Análisis bibliométrico CFD y la industria de petróleo y gas.(VOSviewer, 2019).....	30
Figura 10. Países con mayores investigaciones sobre CFD y la industria de petróleo y gas en el mundo, junto con los años de investigación. (VOSviewer, 2019).....	31
Figura 11. Análisis del flujo de un fluido de perforación en una broca tricónica y PDC. (Mitchell & Miska, 2011)	31
Figura 12. Metodología computacional. Adaptado de (Cornejo Cáceres, 2018).....	39
Figura 13. (a) Geometría original, (b) Ángulo de las boquillas respecto al flujo de entrada.	41

Figura 14. (a) Geometría modificada, (b) Vista frontal de la geometría de 31,94° adaptada para el estudio del comportamiento del fluido de perforación, (c) Sección transversal de la geometría adaptada.	43
Figura 15. (a) Geometría original, (b) Ángulo de las boquillas respecto al flujo de entrada.	44
Figura 16. (a) Geometría modificada, (b) Vista frontal de la geometría de 75,14° adaptada para el estudio del comportamiento del fluido de perforación, (c) Sección transversal de la geometría adaptada.	45
Figura 17. (a) Geometría utilizada en la simulación sobrebalance: 31,94° (b) Geometría utilizada en la simulación DUBD: 75,14°.	46
Figura 18. Malla tetraédrica de la geometría de 31,94°, utilizada para la simulación sobrebalance.	48
Figura 19. Malla tetraédrica de la geometría de 75,14°.	49
Figura 20. Variable y línea seleccionada para el test de malla	52
Figura 21. Resultados de velocidad a lo largo de la línea a evaluar, para las mallas — 10 mm; — 8 mm; — 7 mm; — 5 mm; — 3.5 mm y — 3 mm	53
Figura 22. Test de malla.	53
Figura 23. Resultados de velocidad para una broca PDC con ángulos de 31,94° en (a) dos dimensiones (b) tres dimensiones.	54
Figura 24. Valores de velocidad a diferentes alturas de la broca PDC con ángulos de 31,94°.	55
Figura 25. Velocidad medida a (a) 12 in, (b) 13 in, (c) 14 in, (d) 15 in y (e) 15.9 in para una broca PDC de 31,94°	56
Figura 26. Resultados de velocidad para una broca PDC con ángulos de 75,14° en (a) dos dimensiones (b) tres dimensiones.	57

Figura 27. Valores de velocidad a diferentes alturas de la broca PDC con ángulos de 75,14°. ... 58

Figura 28. Velocidad medida a (a) 13 in, (b) 13.5 in, (c) 14 in, (d) 14.5 in, (e) 15 in y (f) 15.9 in para una broca PDC con ángulos de 75,14°..... 58

Figura 29. Valores de velocidad para la broca PDC de 31,94° donde —Entrada del fluido por las boquillas; — Paso del fluido por las boquillas; — Salida del fluido por las boquillas y — Fluido a punto de chocar con la formación. 59

Figura 30. Valores de velocidad para la broca PDC de 75,14° donde —Entrada del fluido por las boquillas; — Paso del fluido por las boquillas; — Salida del fluido por las boquillas y — Fluido a punto de chocar con la formación. 60

Figura 31. Diferencial de presión a lo largo de una broca PDC con ángulos de 31,94° en (a) dos dimensiones (b) tres dimensiones. 61

Figura 32. Diferencial de Presión a diferentes alturas de la broca PDC con ángulos de 31,94°.. 61

Figura 33. Diferencial de Presión medido a (a) 12 in, (b) 13 in, (c) 14 in, (d) 15 in y (e) 15,9 in para una broca PDC con ángulos de 31,94°..... 62

Figura 34. Diferencial de presión a lo largo de una broca PDC con ángulos de 75,14° en (a) dos dimensiones (b) tres dimensiones. 63

Figura 35. Diferencial de Presión a diferentes alturas de la broca PDC con ángulos de 75,14°.. 64

Figura 36. Diferencial de Presión medido a (a) 13 in, (b) 13.5 in, (c) 14 in, (d) 14.5 in, (e) 15 in y (f) 15,9 in para una broca PDC con ángulos de 75,14°..... 65

Figura 37. Diferencial de Presión para la broca PDC de 31,94° donde —Entrada del fluido por las boquillas; — Paso del fluido por las boquillas; — Salida del fluido por las boquillas y — Fluido a punto de chocar con la formación. 66

Figura 38. Diferencial de Presión para la broca PDC de 75,14° donde —Entrada del fluido por las boquillas; — Paso del fluido por las boquillas; — Salida del fluido por las boquillas y — Fluido a punto de chocar con la formación..... 66

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 DEL EFECTO DE UNA MODIFICACIÓN EN EL ÁNGULO DE BOQUILLAS PARA UNA BROCA PDC APLICANDO DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL*

AUTOR: KELLY JHOANNA JIMÉNEZ DE LA OSSA **

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

DESCRIPCIÓN:

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. En la búsqueda de una nueva técnica que incorpore las ventajas y soslaye las desventajas de estas técnicas se propone la perforación bajo balance dinámica. La caída de presión generada alrededor y debajo de la broca es nuevamente restaurada a valores normales por encima de la misma y estas condiciones requieren de ligeras modificaciones en el diseño de la broca.

El objetivo de este proyecto es proponer un diseño para una broca de perforación en 3D de acuerdo a los postulados de la perforación bajo balance dinámica; a partir de estudios fluidodinámicos en estado estable, aplicando las ecuaciones de conservación de masa y cantidad de momento tridimensional, se utilizará el método de volúmenes Finitos para la discretización de las ecuaciones y técnicas de CFD para la solución.

Para cada una de las geometrías propuestas se realizó un análisis de diferencial de presión y velocidad donde se obtuvo datos del fluido en varios momentos: al entrar a las boquillas, al atravesarlas y en la salida de estas, así como cuando el fluido está a punto de chocar con la formación; estos los resultados podrían representar un avance en pro a los postulados de la técnica.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Germán González Silva, PhD. Codirectores: Nestor Fernando Saavedra Trujillo, MSc. Natalia Prieto Jiménez, PhD.(c)

Abstract

TÍTULO: ANALYSIS OF THE EFFECT OF A MODIFICATION IN THE NOZZLE ANGLE FOR A PDC DRILL BIT USING COMPUTATIONAL DYNAMIC FLUIDS*

AUTHORS: KELLY JHOANNA JIMÉNEZ DE LA OSSA**

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

Overbalanced drilling (OBD) is known to be cheap and simple but formation damage and the reduced rate of penetration (ROP) are some of the disadvantages for this technique. On the other hand, underbalanced drilling (UBD) minimizes formation damage and reaches high ROP, but it's expensive, complicated and cannot be applied in a lot of cases. In the research for a new technique that incorporates the advantages and avoids the disadvantages of the actual drilling techniques is proposed Dynamic Underbalanced Drilling (DUBD); the pressure drop generated around and below the bit is restored to normal pressure above the bit and that conditions requires some minor modifications to the design of drill bit.

This work focuses on propose a design for a drill bit according to the assumptions of Dynamic Underbalanced Drilling; from steady fluid-dynamic studies, applying mass and momentum conservation equations, the finite element method shall be used for the discretization of CFD equations and techniques for the solution.

For each one of the proposed geometries a differential pressure and velocity analysis were done and this information provided fluid data in some scenarios: when the drilling fluid enters to the nozzle, flows through it and exit as well as it strikes the formation. The results may represent and advance for the sake of the postulates of the hybrid technique.

* Degree Project

** Physicochemical Engineering Faculty. Petroleum Engineering School. Director: Germán González Silva, PhD. Codirectors: Natalia Prieto Jiménez, PhD.(c), Nestor Fernando Saavedra Trujillo, MSc.

Introducción

La exploración y explotación de hidrocarburos obliga a las compañías petroleras a mejorar sus procesos de perforación y buscar una estrategia para perforar y producir pozos económicamente más eficientes, así mientras va incrementando la necesidad de perforar más pozos, cada aspecto de esta operación que pueda tener la posibilidad de optimización debería ser investigada.

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)

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 Computacional de Fluidos, CFD por sus siglas en inglés (*Computational Fluid Dynamics*), siendo una herramienta utilizada para la simulación del comportamiento de sistemas relacionados con el flujo de fluidos, transferencia de calor y otros procesos físicos afines; 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 una broca PDC, cuyos ángulos de las boquillas respecto al flujo de entrada han sido modificados, utilizando dinámica computacional de fluidos con la finalidad de comprobar si estas modificaciones replican los postulados de una nueva técnica de perforación llamada *Dynamic Underbalanced Drilling* y comprobar si dichos cambios representan una alternativa económica y práctica en el proceso de perforación.

1. Marco Teórico

1.1 Brocas de perforación utilizadas en la actualidad

En el desarrollo del análisis bibliométrico se realizó una revisión generalizada respecto a las investigaciones y trabajos publicados con relación a las brocas utilizadas en la perforación de un pozo petrolero, fueron utilizados 160 resultados a nivel mundial empleando la base de datos *scopus*. En la *Figura 1* se presenta un mapa generalizado que reúne 61 grupos de tópicos claves respecto al tema, de los cuales resaltan como temas representativos: Brocas PDC, brocas de diamante y brocas tricónicas. Así mismo, en la *Figura 2* se presentan gráficamente los países con mayores investigaciones respecto a las brocas de perforación, donde Estados Unidos lidera como el país con mayor indagación científica con 97 artículos publicados, seguido por Kuwait y China con 15 y 14 publicaciones respectivamente; adicionalmente, en el mismo gráfico se puede observar los años en los que fueron realizadas las investigaciones de dichos países.

Existen muchas variaciones en los diseños de brocas y la selección de ésta depende de múltiples aspectos, tales como el tipo de formación a ser perforada, así como las condiciones de operación esperadas durante el proceso de perforación. A su vez, el desempeño de la broca está en función de parámetros de operación tales como WOB (*Weight on Bit*), RPM (revoluciones por minuto), propiedades del lodo y eficiencia hidráulica.

La perforación rotaria usa dos tipos de brocas: brocas de conos rotantes y brocas de cortadores fijos, tal como se muestra en la *Figura 3*. 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).

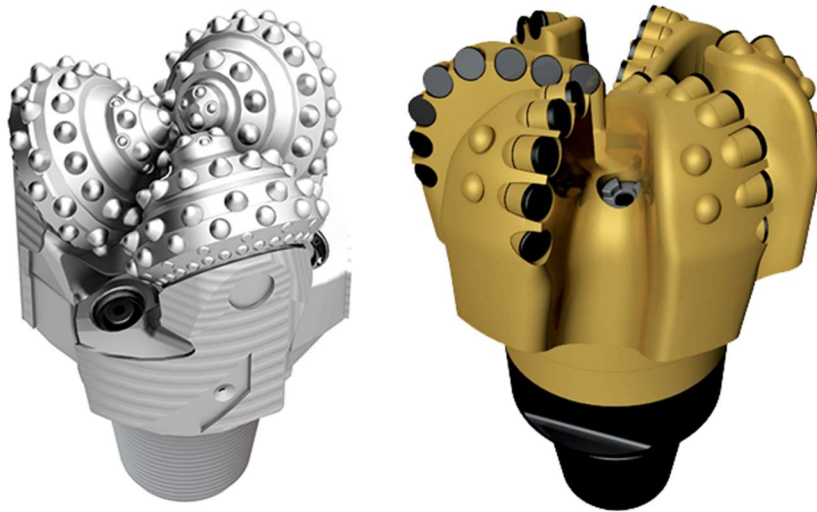


Figura 3. Broca de conos rotantes y broca de cortadores fijos. Adaptado de Advanced Drilling and Well Technology. Richardson, TX: Society of Petroleum Engineers. Aadnoy, B., Cooper, I., Miska, S., Mitchell, R. F., & Payne, M. L. (2009).

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 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, Schunnesson, & Kumar, 2016; Hareland, Wu, & James, 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, Birch, Teasdale, & Al Ani, 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 4, 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 4. 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, Gerbaud, Paris, Denape, & Dourfaye, 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 5, los cuales han ayudado a mejorar la eficiencia de la perforación y extender la vida de la broca.



Figura 5. 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 6, 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 6. 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).

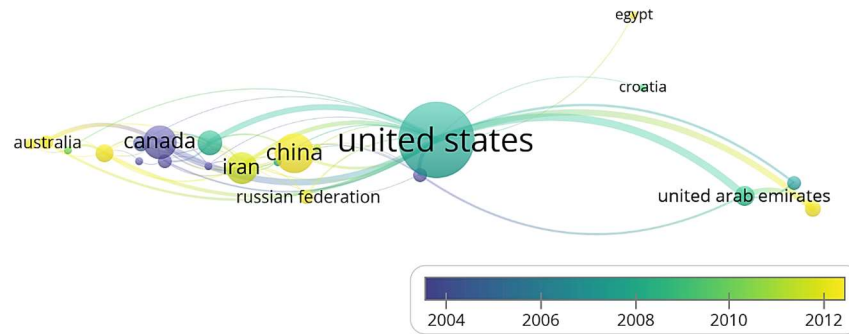


Figura 8. Países con mayores investigaciones sobre técnicas de perforación en el mundo, junto con los años de investigación. (VOSviewer, 2019)

La presión hidrostática de un pozo es la presión que ejerce la columna de lodo sobre las paredes del mismo lo cual ayuda a dar estabilidad al hueco evitando que formaciones inconsolidadas 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.

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).

1.2.2 *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, Hajidavalloo, & Noghrehabadi, 2017; JPT staff, 1998).

1.2.3 Dynamic Underbalanced Drilling (DUBD): Dynamic Underbalanced Drilling surge como resultado de la búsqueda de una nueva técnica que incorpore las ventajas y evite las desventajas de OBD y UBD propuesto por (Neiri, H, Dahab, & Abdulaziz, 2016). 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.

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, empieza a perder velocidad lo que generaría un incremento de la presión y, como consecuencia, que el resto del pozo se mantuviera en condiciones de sobrebalance.(Neiri et al., 2016)

1.3 CFD en la industria petrolera

En el desarrollo del análisis bibliométrico se realizó una revisión generalizada respecto a las investigaciones y trabajos publicados respecto a CFD aplicado a la industria del petróleo y gas, fueron utilizados 326 resultados a nivel mundial utilizando la base de datos *scopus*. En la

Figura 9 se presenta un mapa generalizado que reúne 73 grupos de tópicos claves respecto al tema, de los cuales resaltan como temas representativos: Dinámica Computacional de Fluidos, industria del gas y flujo multifásico.

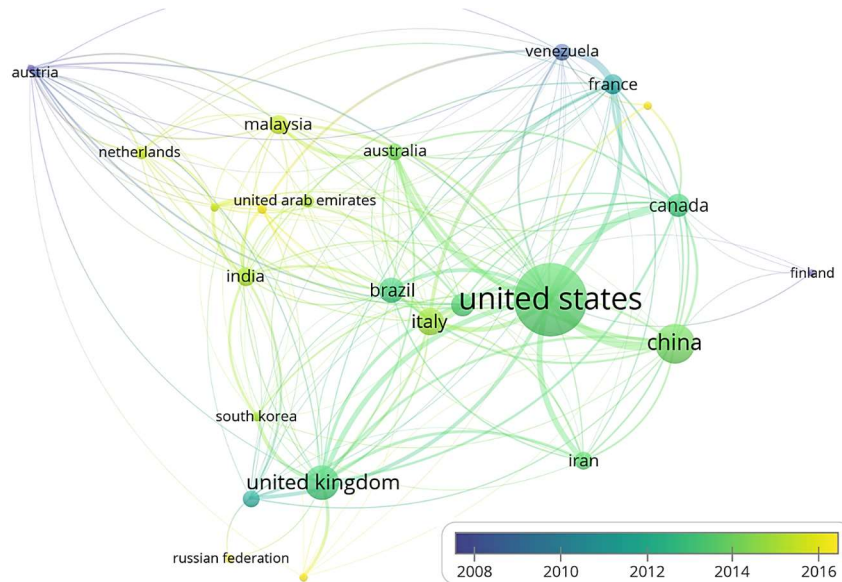


Figura 10. Países con mayores investigaciones sobre CFD y la industria de petróleo y gas en el mundo, junto con los años de investigación. (VOSviewer, 2019)

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.

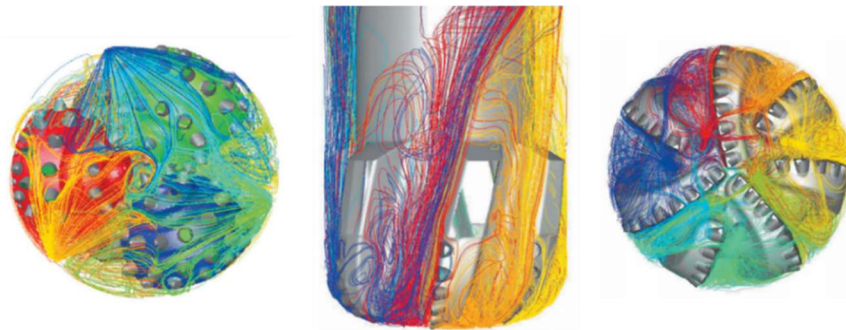
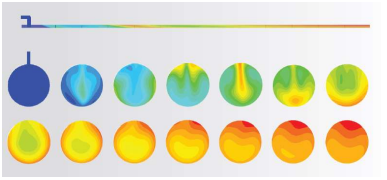
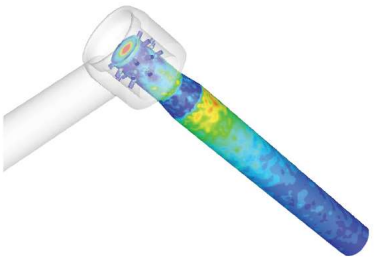
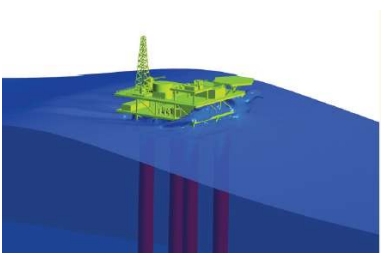


Figura 11. Análisis del flujo de un fluido de perforación en una broca tricónica y PDC. Adaptado de Fundamentals of Drilling Engineering. Society of Petroleum Engineers. Mitchell, R. F., & Miska, S. (2011).

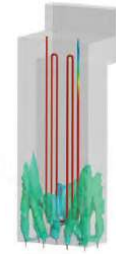
La Dinámica Computacional de Fluidos es una herramienta utilizada para la simulación del comportamiento de sistemas relacionados con el flujo de fluidos, transferencia de calor y otros procesos físicos afines (Jiménez, Silva, & Guerrero, s. f.; Silva, Jiménez, & Salazar, 2012; Silva, Prieto, & Mercado, 2018). Trabaja solucionando ecuaciones de flujo de fluidos a través de una zona de interés, con condiciones específicas en una región definida. CFD es utilizado para disminuir tiempo y costos en experimentos complejos simulando los distintos escenarios posibles y permitiendo el análisis de todos los procesos fluido-dinámicos envueltos en el mismo (González Silva, Luz Lisboa, Velasquéz, & José, 2010). La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** presenta algunas aplicaciones de CFD en la Industria del Petróleo y Gas.

Tabla 1. Aplicaciones de CFD en la industria del petróleo y gas.

Aplicación	Descripción	Ilustración
Flujo multifásico en tuberías	La simulación flash muestra contornos de fracciones másicas de la fase vapor en varias secciones transversales aguas abajo. Esta simulación mostró que las fracciones de hidrocarburos vaporizados aumentan con la distancia.	
Predicción de fallas de equipos por corrosión	Los recortes de perforación, transporte de arena y agente de retención reducen la vida de los equipos, tuberías y herramientas de fondo de pozo a través de la corrosión. CFD permite el modelado de flujo único o múltiples fluidos que tengan en cuenta el tamaño de las partículas y cargas.	
Movimiento de superficies húmedas a causa de ondas irregulares del mar.	Estudiar el flujo sobre una superficie libre y los movimientos relacionados con el mar, para la producción, almacenamiento en plataformas offshore, para la perforación de petróleo y gas, producción y transporte.	

Optimización de reformadores de combustible

CFD utiliza un modelo de canal para simular reformadores complejos y hornos de craqueo en menos tiempo. En la ilustración se pueden observar gases calientes de los quemadores que proporcionan calor a los tubos de proceso y permiten reacciones internas.



Adaptado de ANSYS Advantage Staff. (2018). Gallery: Oil and Gas Industry Applications.

2. Modelo Matemático

Para hacer uso de La Dinámica Computacional de Fluidos 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 (González Silva, 2012).

2.1 Ecuaciones de continuidad y momentum

2.1.1 Ecuación de conservación de masa: La ecuación para conservación de masa, o ecuación de continuidad, puede ser descrita de la siguiente forma:

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

Siendo válida para ser utilizada en fluidos incompresibles.

2.1.2 Ecuación de conservación de cantidad de movimiento.

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

Donde P es la presión estática, $\vec{\tau}$ es el tensor de estrés, que será descrito debajo y $\rho \vec{g}$ son las fuerzas gravitacionales.

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

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

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).

2.2 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).

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:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \\ \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b \end{aligned} \quad (5)$$

Donde,

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (6)$$

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, Yeoh, & Liu, 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 sub-capa viscosa, entonces el tratamiento mejorado de muro 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):

$$\int_V \frac{\partial \rho \varphi}{\partial t} dV + \oint \rho \varphi \vec{V} \cdot d\vec{A} = \oint \Gamma_\varphi \nabla \varphi \cdot d\vec{A} + \int_V S_\varphi dV \quad (7)$$

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:

$$\varphi_{f,SOU} = \varphi + \nabla \varphi \cdot \vec{r} \quad (8)$$

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 pre-procesamiento, 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 post-procesamiento se validan los resultados obtenidos mediante la observación de perfiles de las variables de respuesta y diagramas en 2D o contornos en 3D a fin de obtener una visualización clara de los resultados de simulación. Serán utilizados paquetes del software comercial ANSYS®. La metodología propuesta se presenta en la Figura 12.

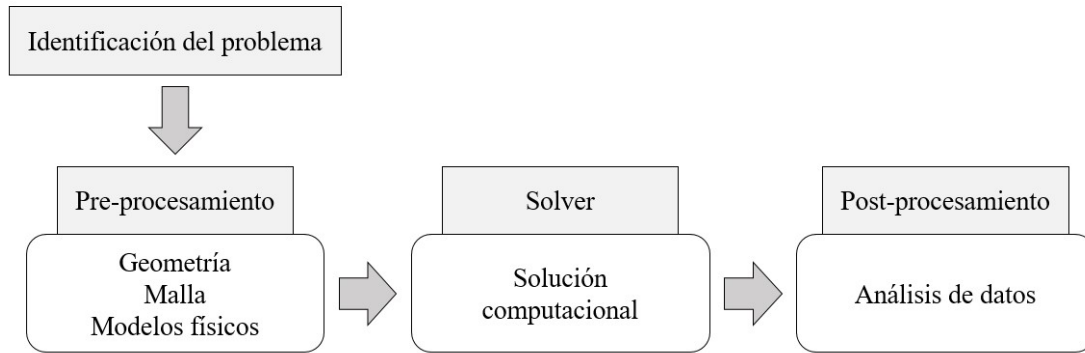


Figura 12. Metodología computacional. Adaptado de Simulación numérica de un separador gas-líquido tipo ciclón cilíndrico utilizando Dinámica De Fluidos Computacional. Cornejo Cáceres, J. S. Universidad Industrial de Santander. (2018).

3.1 Identificación del problema

En el presente trabajo, se analiza el comportamiento fluido-dinámico de una broca PDC en una perforación sobrebalance y en una perforación bajo balance dinámica. Para la primera parte de las simulaciones, se utiliza una broca cuyos ángulos de las boquillas, respecto al flujo de entrada es $31,94^\circ$ y, posteriormente, se realiza una modificación de dichos ángulos a $75,14^\circ$. Para ambas simulaciones la sustancia utilizada como lodo de perforación es un fluido altamente viscoso que adopta el comportamiento reológico del mismo.

3.2 Pre-procesamiento

El pre-procesamiento define el dominio de investigación mediante la creación de la geometría. Posterior a esto, se hace necesaria la discretización de dicho dominio mediante la creación de una malla. En este momento se definen también los modelos físicos que gobiernan la hidráulica de una perforación, así como las condiciones de frontera para cada caso de simulación.

3.2.1 Geometría: Las brocas PDC son usadas en perforaciones profundas y en formaciones duras y abrasivas, permiten alcanzar mayores RPM respecto a las brocas de conos rotantes. Al seleccionar una broca PDC para un proceso de perforación se corre un riesgo menor a dejar basura, proveniente de las partes de la misma, dentro del pozo en relación con una broca tricónica en la cual puede ocurrir el desprendimiento de alguno de sus conos.

En una broca PDC, los cortadores de diamante policristalino se encuentran montados en una matriz de carburo de tungsteno que les provee resistencia y rigidez. El mecanismo de corte que se produce con este tipo de broca es por cizallamiento, lo cual produce cortes que son mucho más finos que los producidos por una broca tricónica.

De acuerdo con lo anterior, la broca seleccionada para este estudio es una broca PDC de 10 in de diámetro y 15,632 in de longitud. En la *Figura 13* se muestra, a la izquierda la geometría creada por Napitupulu (2014) y a la derecha, el ángulo de las boquillas respecto al flujo de entrada, el cual servirá como guía para la modificación que corresponde a este trabajo .

En el desarrollo de la primera etapa del proyecto, la geometría original, de $31,94^\circ$, fue importada a *Ansys DesignModeler* donde se le realizaron unas modificaciones, tales como la creación un cilindro hueco que imita la conexión de la broca con el resto de la sarta de perforación, además, asumiendo que la profundidad que invade la broca es la misma que la profundidad con los cortadores y rimadores, estos fueron omitidos de la geometría (Zhenquan & Dongyu, 2014); con la finalidad de simplificar el diseño y, de este modo, realizar un análisis enfocado en los fenómenos físicos que gobiernan el flujo del lodo a través de la broca y alrededor del anular, como se muestra en la *Figura 14*.

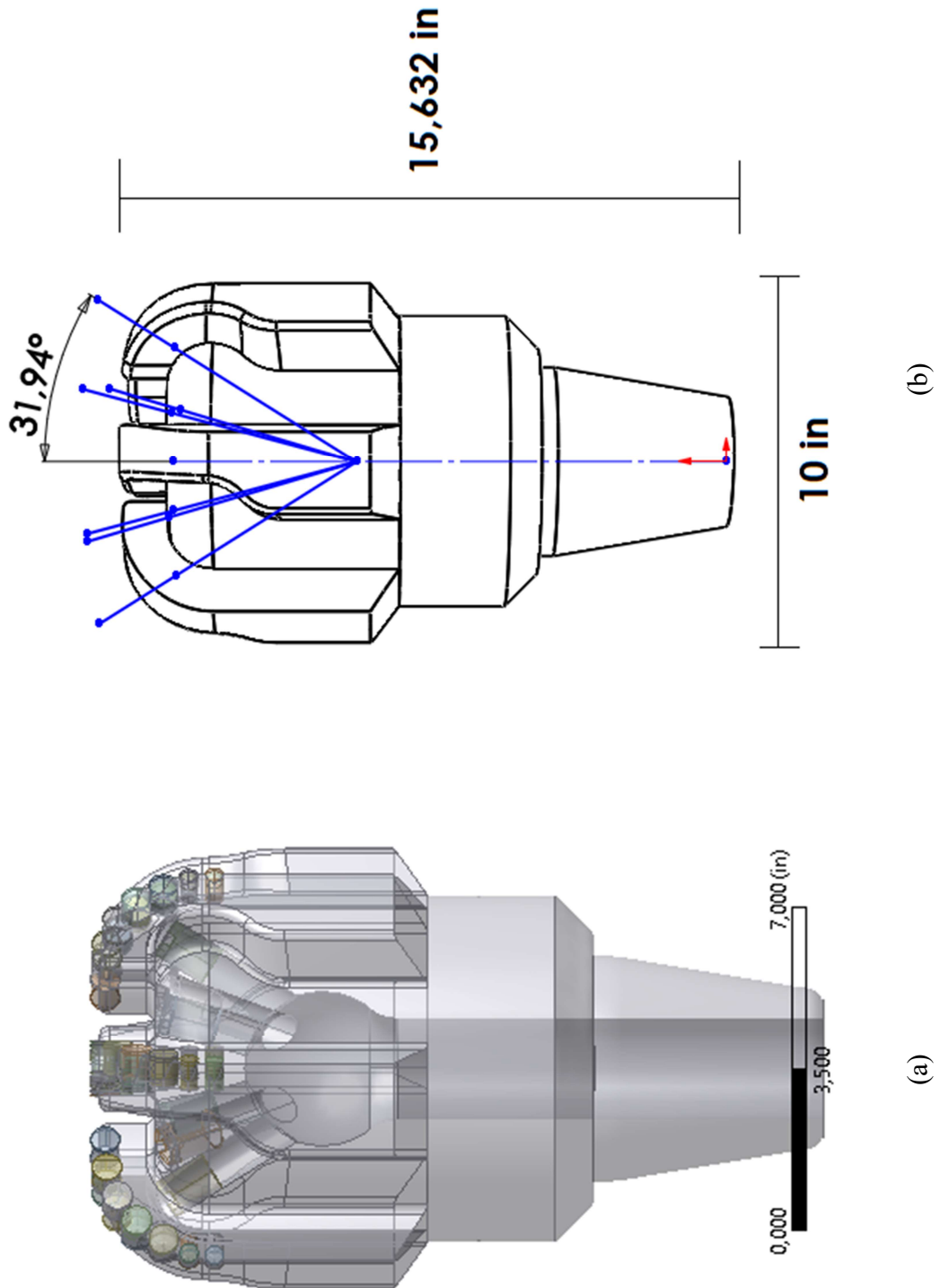


Figura 13. (a) Geometría original, (b) Ángulo de las boquillas respecto al flujo de entrada.

Los postulados de la técnica de perforación bajo balance dinámica aseguran que al realizar modificaciones en el ángulo de las boquillas respecto al flujo de entrada, esta técnica puede ser aplicada; dicha modificación fue realizada en el programa *SolidWorks* dando como resultado la broca mostrada en la *Figura 15*, de $75,14^\circ$.

Posteriormente, en *Ansys DesingModeler* esta nueva geometría fue adaptada para el estudio del comportamiento del fluido de perforación a través de la broca, tal como se muestra en la *Figura 16*.

Finalmente, en la *Figura 17* se exhiben las dos geometrías utilizadas en las simulaciones del presente trabajo de investigación.

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 va 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.

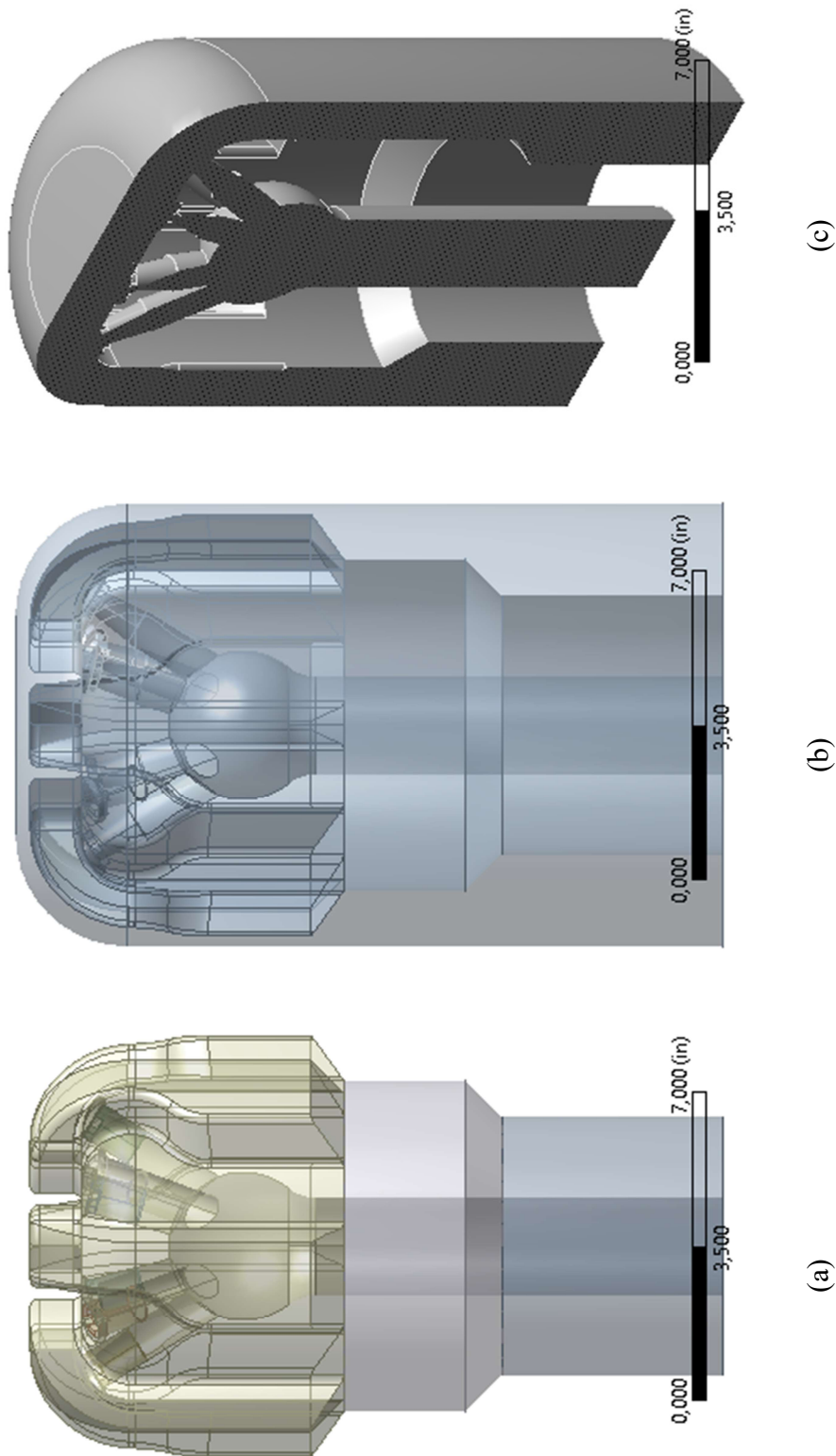


Figura 14. (a) Geometría modificada, (b) Vista frontal de la geometría de $31,94^\circ$ adaptada para el estudio del comportamiento del fluido de perforación, (c) Sección transversal de la geometría adaptada.

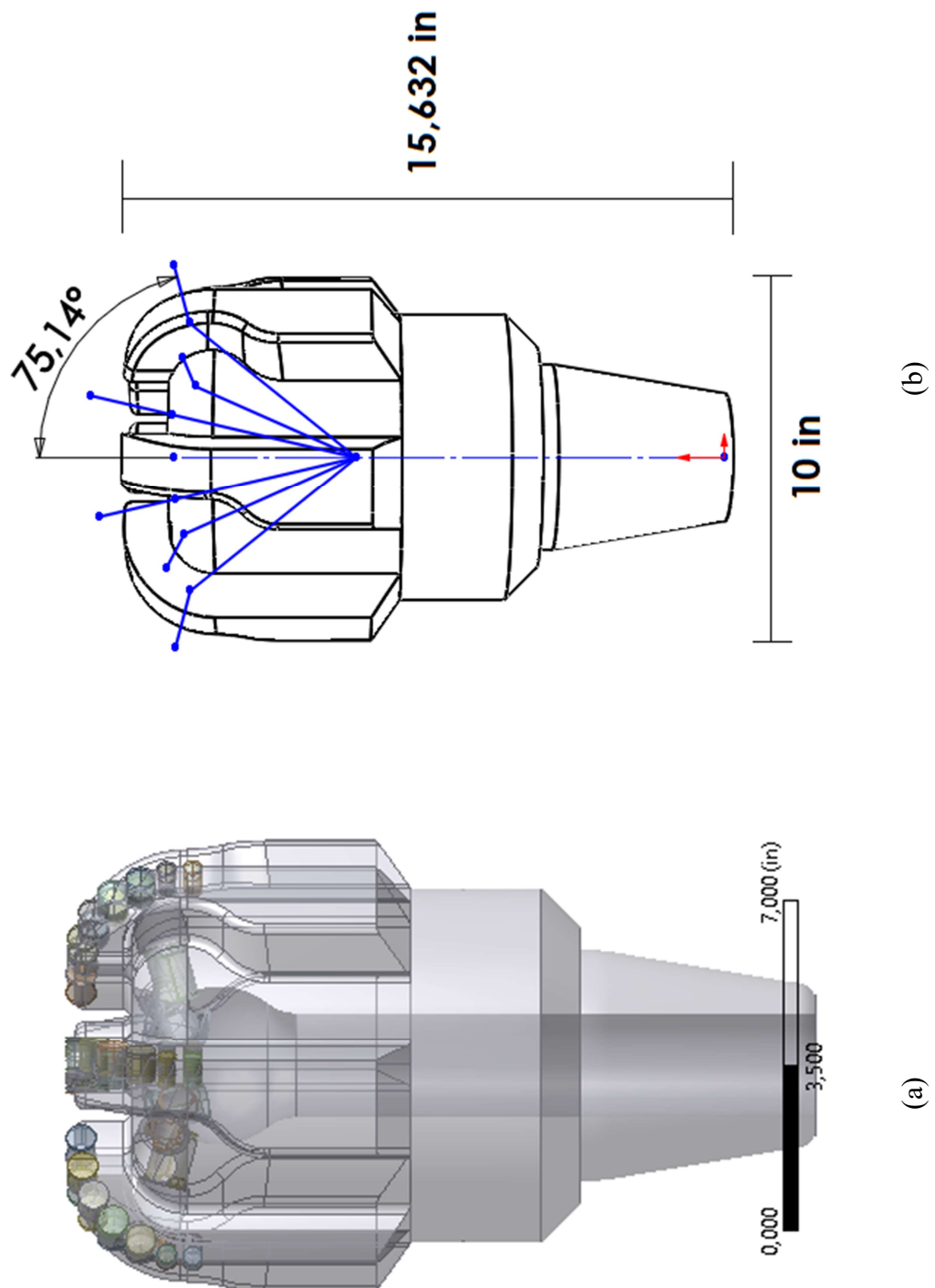


Figura 15. (a) Geometría original, (b) Ángulo de las boquillas respecto al flujo de entrada.

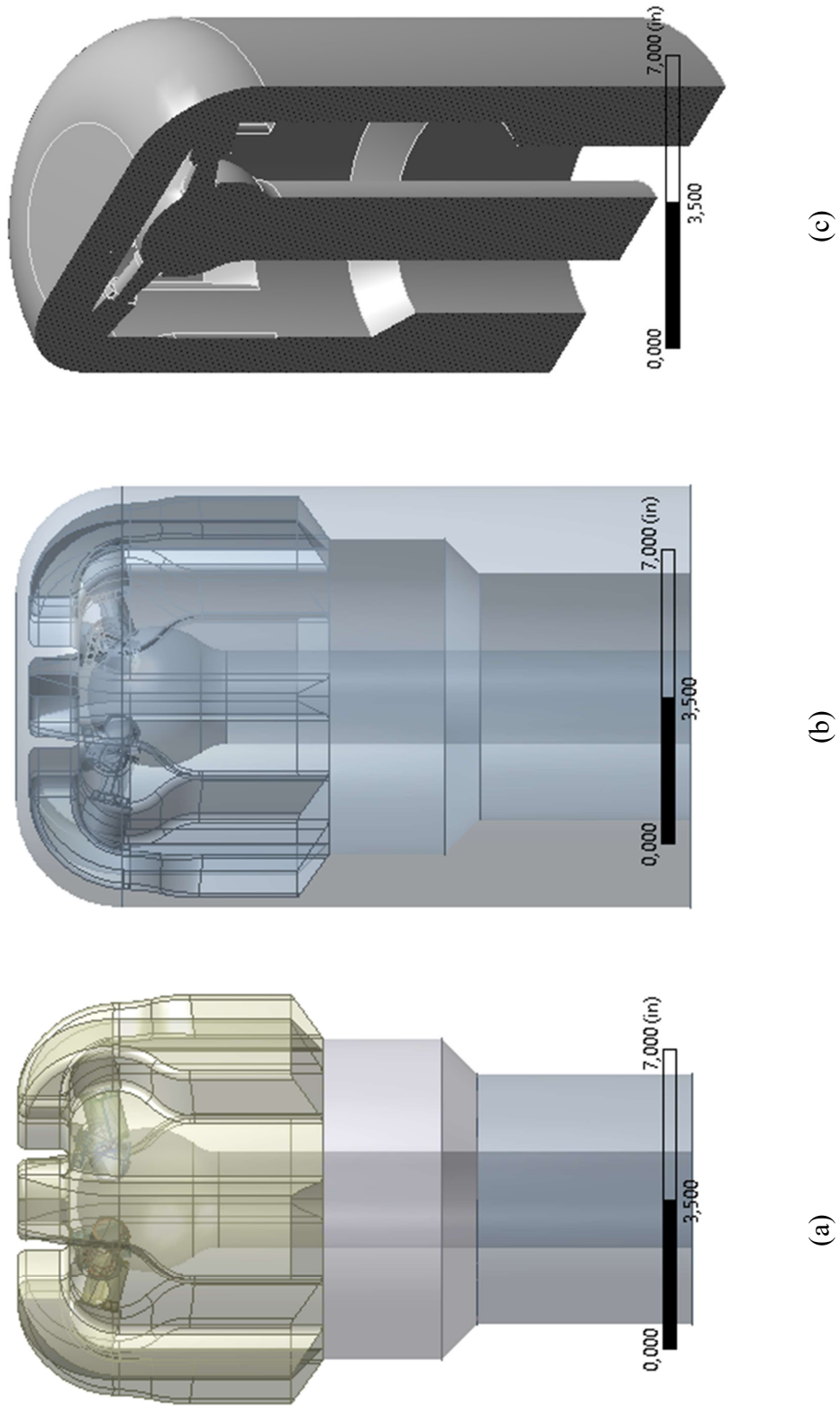


Figura 16. (a) Geometría modificada, (b) Vista frontal de la geometría de 75,14° adaptada para el estudio del comportamiento del fluido de perforación, (c) Sección transversal de la geometría adaptada.

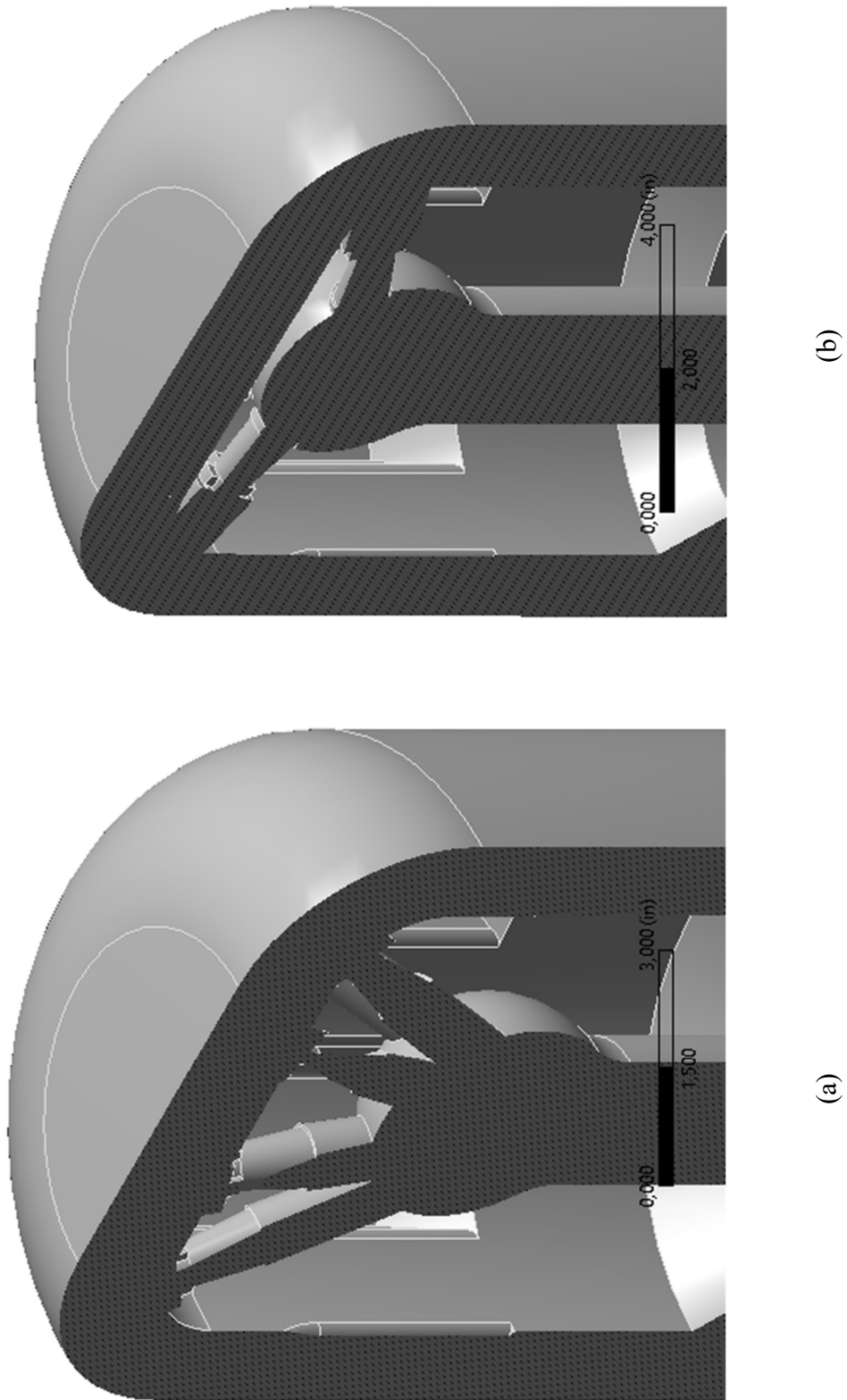


Figura 17. (a) Geometría utilizada en la simulación sobrebalance: $31,94^\circ$ (b) Geometría utilizada en la simulación DUBD: $75,14^\circ$.

Los valores de ortogonalidad y oblicuidad promedios de la geometría de $31,94^\circ$ son 0,76702 y 0,23127, 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 de $31,94^\circ$.

Ortogonalidad			Oblicuidad		
Calidad de celda	Elementos	Porcentaje	Calidad de celda	Elementos	Porcentaje
Aceptable (0,15 – 0,20)	39	0,001%	Malo (1 – 0,75)	235	0,006%
Bueno (0,20 – 0,69)	1'047.570	28,43%	Suficiente (0,75 – 0,5)	67.592	1,83%
Muy bueno (0,70 – 0,95)	2'544.000	69,03%	Bueno (0,5 – 0,25)	1'485.000	40,30%
Excelente (0,95 – 1)	93.560	2,54%	Excelente (0,25 – 0)	2'132.342	57,86%

El mallado tetraédrico generado para la geometría de $31,94^\circ$ es presentado en la Figura 18, cuenta con 3'685.169 elementos y ha sido seleccionado para simular el primer escenario: perforación sobrebalance. El mallado tetraédrico generado para la geometría de $75,14^\circ$ es presentado en la Figura 19, cuenta con 3'410.982 elementos y ha sido seleccionado para simular el segundo escenario: perforación bajo balance dinámica. Los valores de ortogonalidad y oblicuidad promedios de la geometría de $75,14^\circ$ son 0,76737 y 0,23094, respectivamente, lo que representa una muy buena calidad de malla; la Tabla 3 desglosa los valores de calidad de cada elemento en la malla.

Tabla 3. Calidad de elementos de la malla respecto a la Ortogonalidad y Oblicuidad, broca de $75,14^\circ$.

Ortogonalidad			Oblicuidad		
Calidad de celda	Elementos	Porcentaje	Calidad de celda	Elementos	Porcentaje
Aceptable (0,15 – 0,20)	115	0,003%	Malo (1 – 0,75)	406	0,012%
Bueno (0,20 – 0,69)	959.940	28,14%	Suficiente (0,75 – 0,5)	63.037	1,85%
Muy bueno (0,70 – 0,95)	2'364.227	69,31%	Bueno (0,5 – 0,25)	1'365.539	40,30%
Excelente (0,95 – 1)	86.700	2,54%	Excelente (0,25 – 0)	1'982.000	58,11%

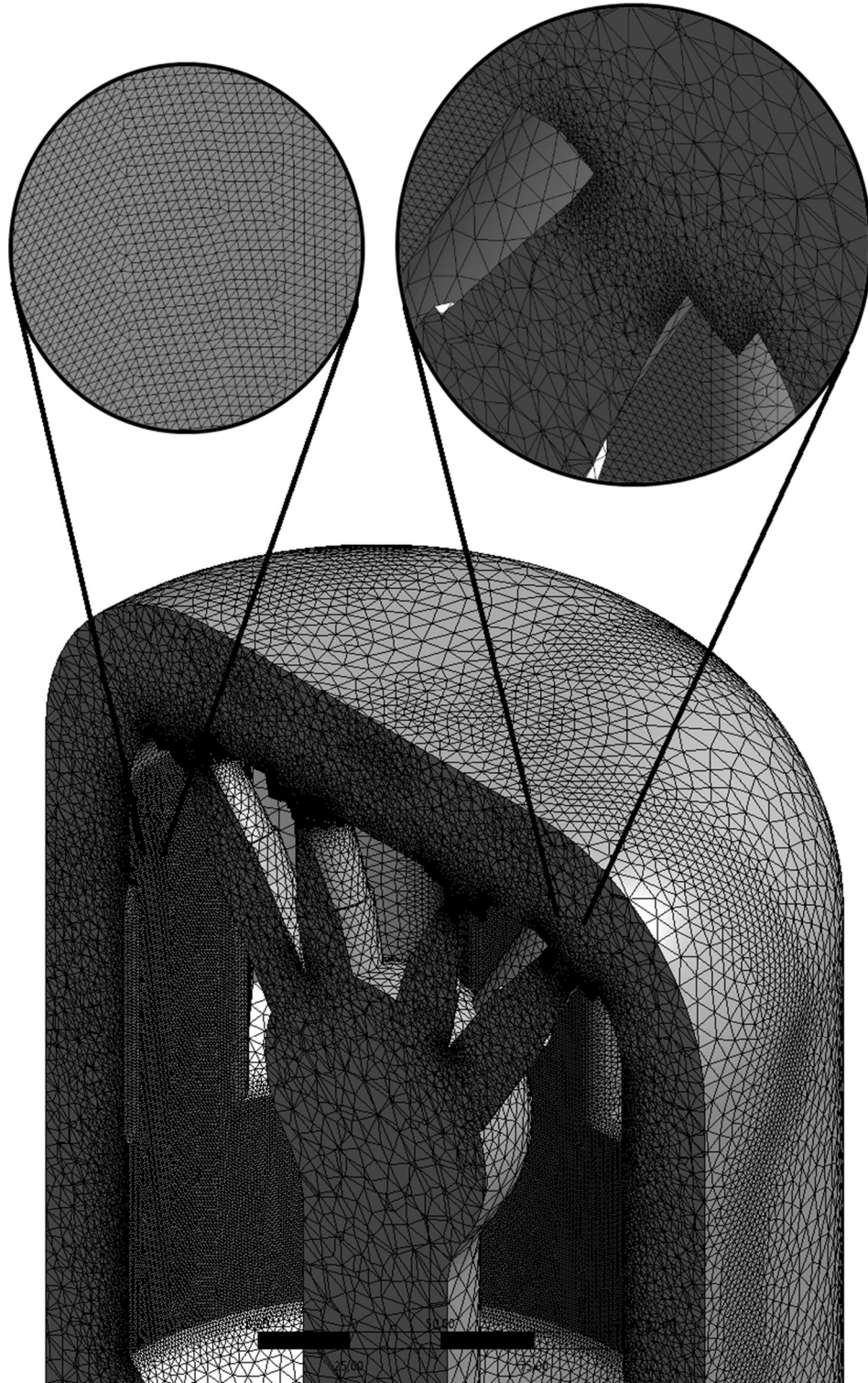


Figura 18. Malla tetraédrica de la geometría de $31,94^\circ$, utilizada para la simulación sobrebalance.

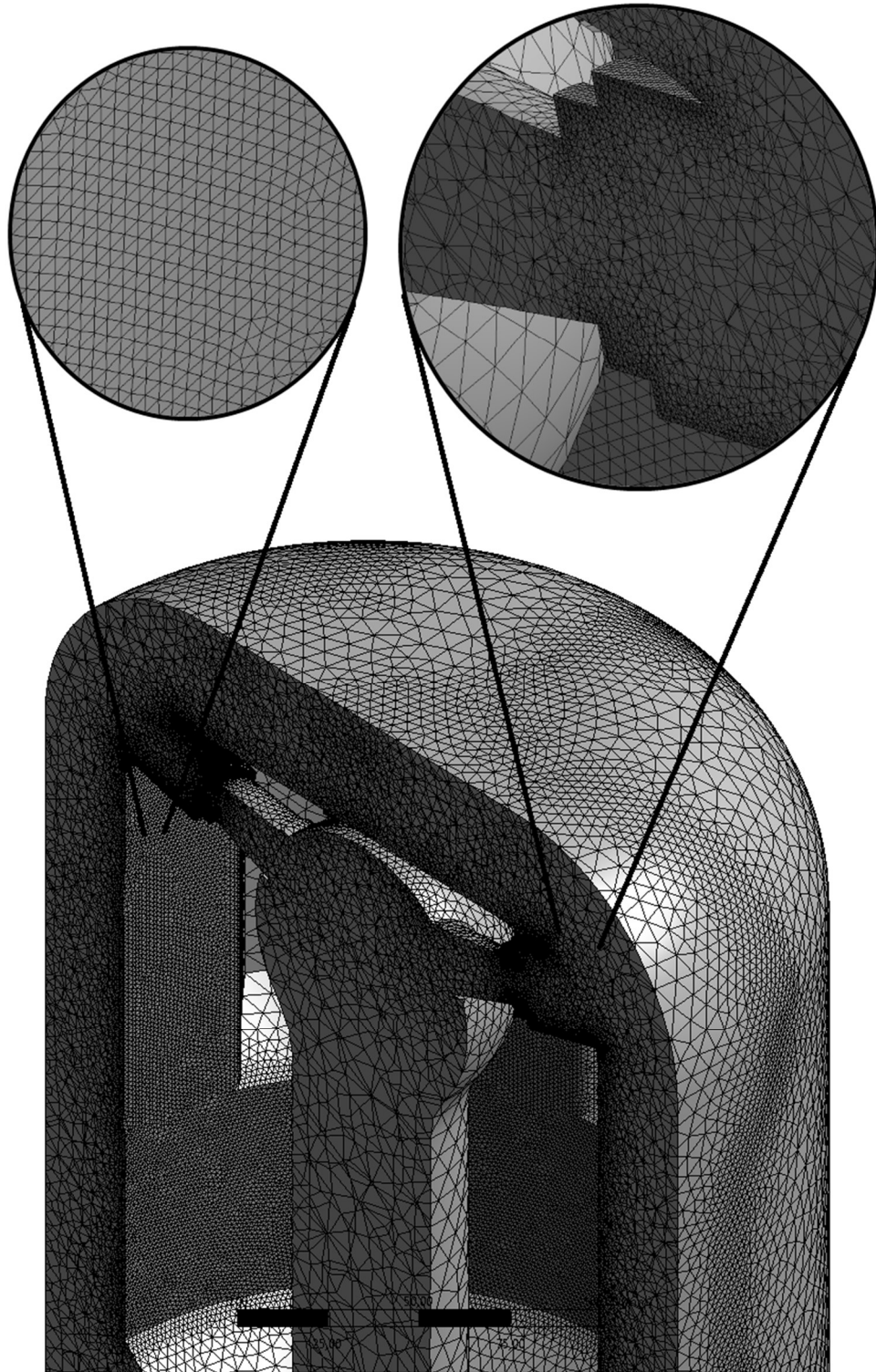


Figura 19. Malla tetraédrica de la geometría de 75.14° .

Para conocer si la cantidad de elementos en los cuales se ha dividido el dominio es la adecuada se hace un test de independencia de malla. Este test 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 significativa 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).

3.2.3 Modelos físicos: El modelo físico usado para representar el comportamiento fluido-dinámico 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 desarrollo de la simulación, como lodo de perforación se usó un fluido altamente viscoso que adopta el comportamiento reológico del mismo, los valores de densidad y viscosidad son presentados en la Tabla 4.

Tabla 4. *Propiedades del fluido de perforación utilizado en las simulaciones.*

	Sistema Inglés	Sistema Internacional
Densidad	11 ppg	1318,092 kg/m ³
Viscosidad	25 cP	0,025 Pa·s

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 el test 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 de la perforación sobrebalance y bajo balance dinámica y el análisis de las variables a estudiar para cada caso.

4.1 Test de Independencia de Malla

La variable escogida para realizar el test de independencia de malla fue la velocidad, la cual fue medida a una altura de 12.6 in y a lo largo de 1,3 in a cada lado del centro, como se muestra en la línea negra de *Figura 20*. Fueron realizadas 6 mallas, empezando con un número de elementos de 533.625, la cual se fue refinando hasta llegar a 5'251.266 elementos. Para cada mallado, fueron tomados resultados de velocidad a lo largo de la línea a evaluar los cuales son los representados en la *Figura 21*.

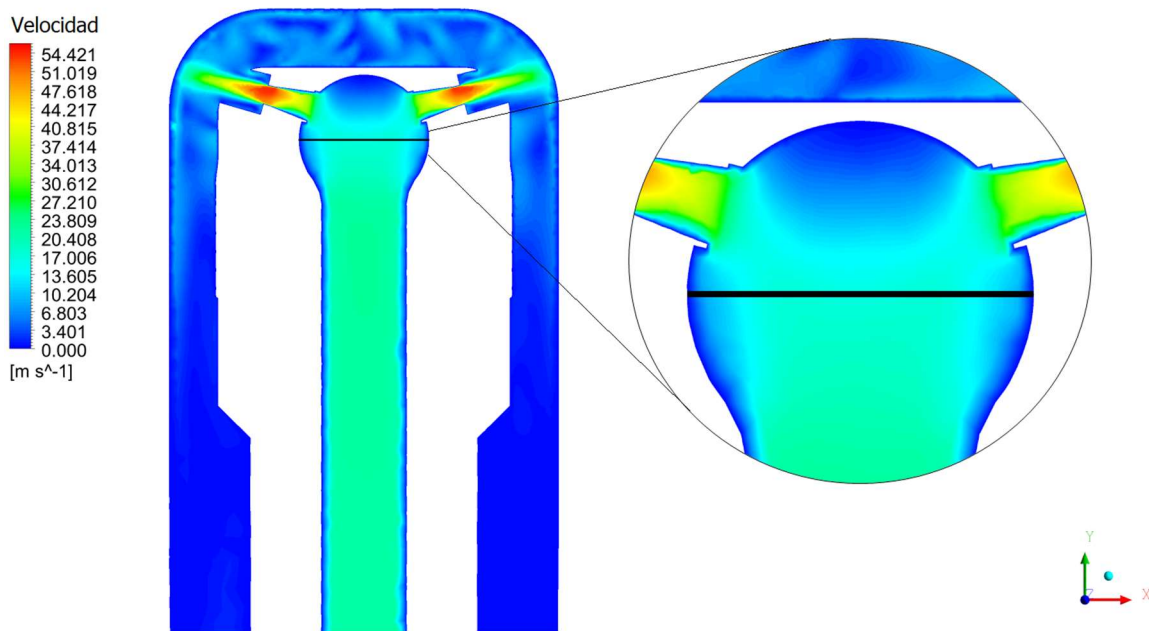


Figura 20. Variable y línea seleccionada para el test de malla

A continuación, se tomaron dos puntos representativos de la *Figura 21* y se realizó la *Figura 22* donde se graficó el resultado de cada velocidad a una posición de -0,9 in y 0,0 in contra el número de elementos, observándose así, que los valores de velocidad se estabilizan a partir de la malla con 3'410.982 elementos.

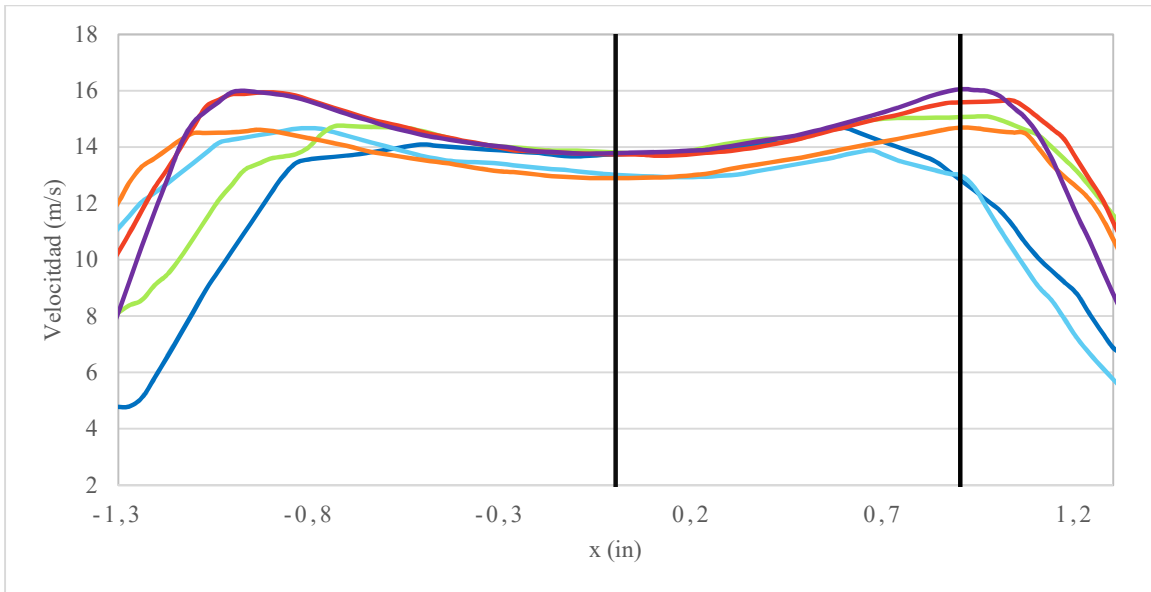


Figura 21. Resultados de velocidad a lo largo de la línea a evaluar, para las mallas 10 mm; 8 mm; 7 mm; 5 mm; 3.5 mm y 3 mm

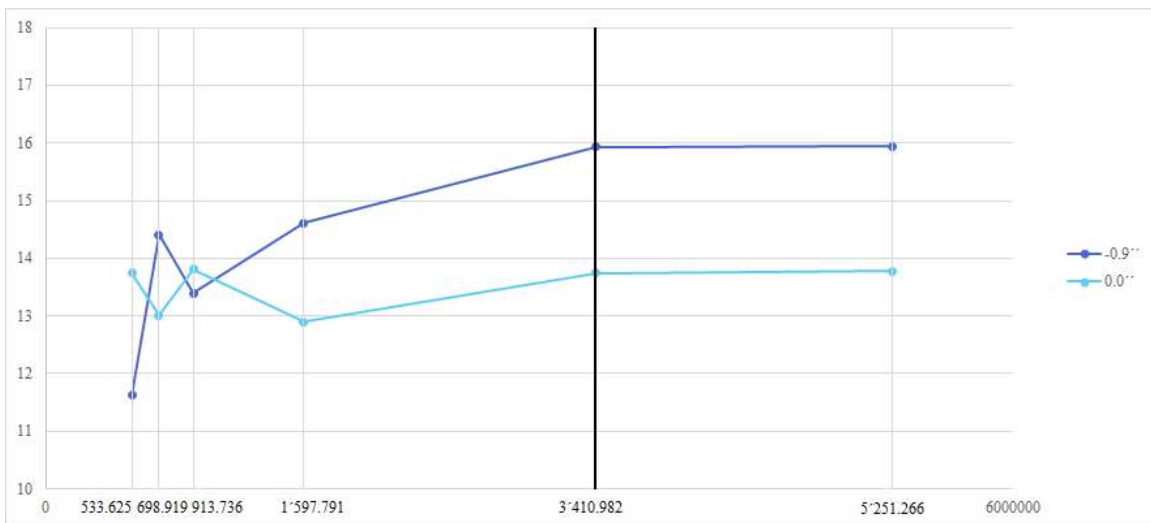


Figura 22. Test de malla

4.2 Análisis de resultados

En esta parte del trabajo, se analiza la velocidad y el diferencial de presión en los casos de estudio; las herramientas gráficas, tales como contornos, realizadas utilizando la herramienta *CFD-Post*. Estos resultados corresponden a las simulaciones para cada una de las geometrías propuestas.

4.2.1 Velocidad.

i. Broca 31,94°

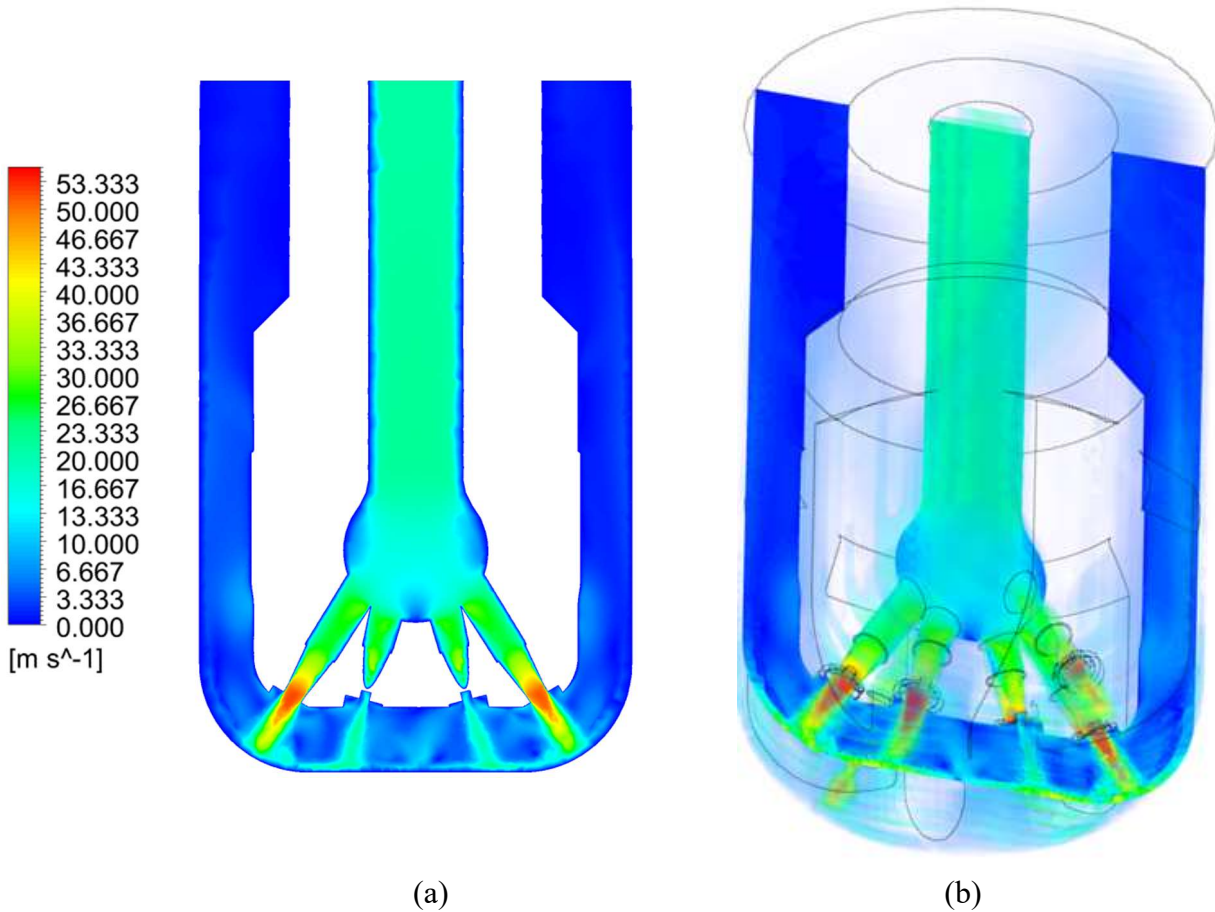


Figura 23. Resultados de velocidad para una broca PDC con ángulos de 31,94° en (a) dos dimensiones (b) tres dimensiones.

En la perforación sobrebalance, la velocidad a largo de la tubería es constante, debido a que la tasa flujo es la misma en todos los puntos; 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, el fluido de perforación choca con la formación y la velocidad de este queda reducida a cero (Robinson, 2010), tal como se muestra en la *Figura 23*.

Para observar con mayor claridad el comportamiento de la velocidad a lo largo de la geometría estudiada, broca PDC con ángulos de $31,94^\circ$ respecto al flujo, fueron realizados cortes a once alturas diferentes, con énfasis en la zona alrededor de las boquillas, así como se evidencia en la *Figura 24*.

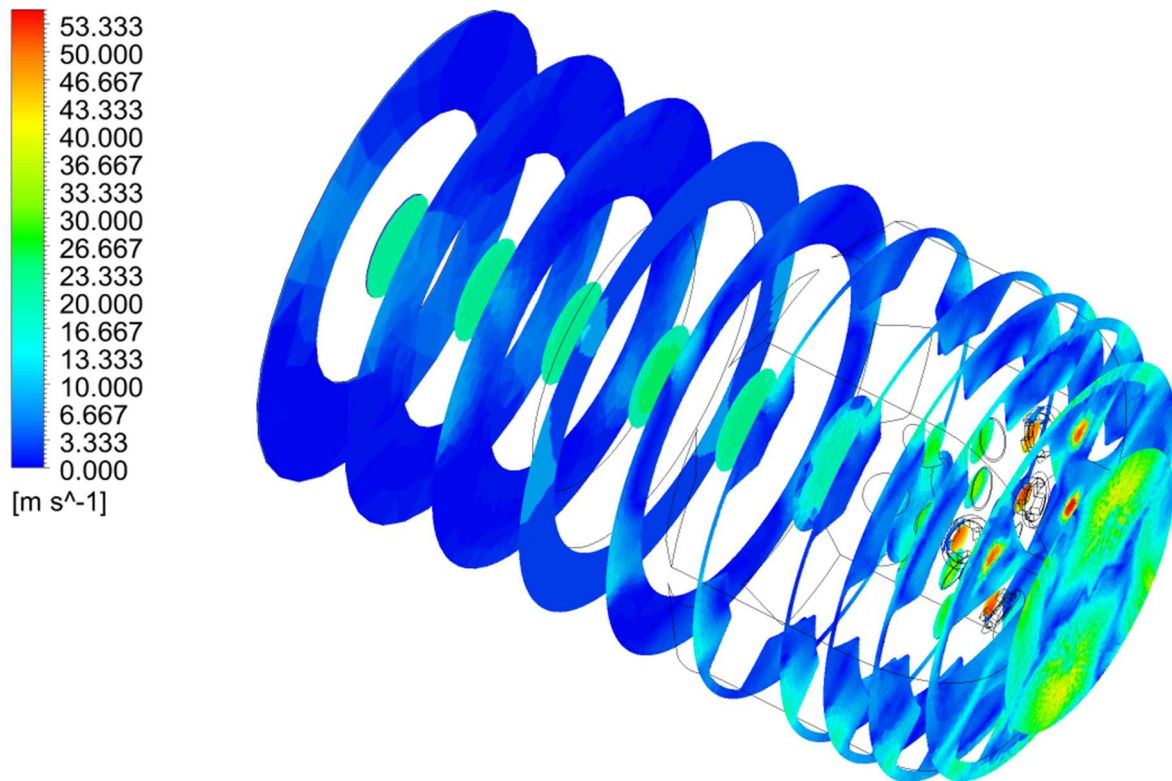


Figura 24. Valores de velocidad a diferentes alturas de la broca PDC con ángulos de $31,94^\circ$.

En la *Figura 25* se presenta con mayor claridad el cambio de velocidad a diferentes alturas: la entrada de las boquillas se evidencia a una altura de 12 pulgadas, donde se observa una velocidad alrededor de 20 m/s la cual es mayor a la rapidez con la que venía el fluido en la tubería; a la altura de 14 pulgadas, cuando el fluido se encuentra atravesando las boquillas, la velocidad se encuentra alrededor de 30 m/s y, a una altura de 15 pulgadas donde se encuentra la salida de las boquillas los valores rondan cerca a los 50 m/s. En cuanto al fluido a punto de chocar con la formación, a la altura de 15.9 pulgadas se observa que el valor de la velocidad se encuentra entre los 0 y 10 m/s.

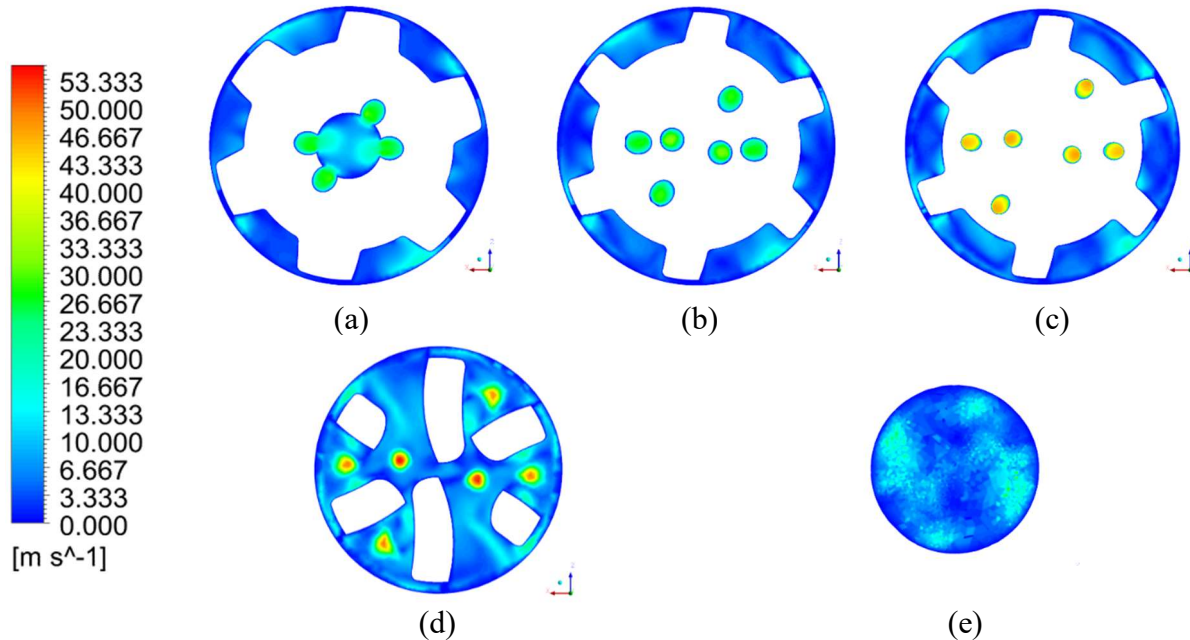


Figura 25. Velocidad medida a (a) 12 in, (b) 13 in, (c) 14 in, (d) 15 in y (e) 15.9 in para una broca PDC de 31,94°

ii. Broca 75,14°

Ahora bien, *Dynamic Underbalanced Drilling* 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. La zona de bajo balance sería creada alrededor y debajo de la broca debido a la velocidad que conservaría el fluido y, a medida que el fluido va entrando al anular se generaría la pérdida de velocidad lo que daría como consecuencia que el resto del pozo se mantuviera en condiciones de sobrebalance, obteniendo así una técnica híbrida. En las *Figura 26* se evidencian los resultados de velocidad obtenidos para la broca PDC cuyos ángulos de boquillas son 75,14°. Estos resultados discrepan de los postulados realizados por la técnica *Dynamic Underbalanced Drilling* siendo el comportamiento observado 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 cuál podría ser un avance en pro a los postulados de la técnica.

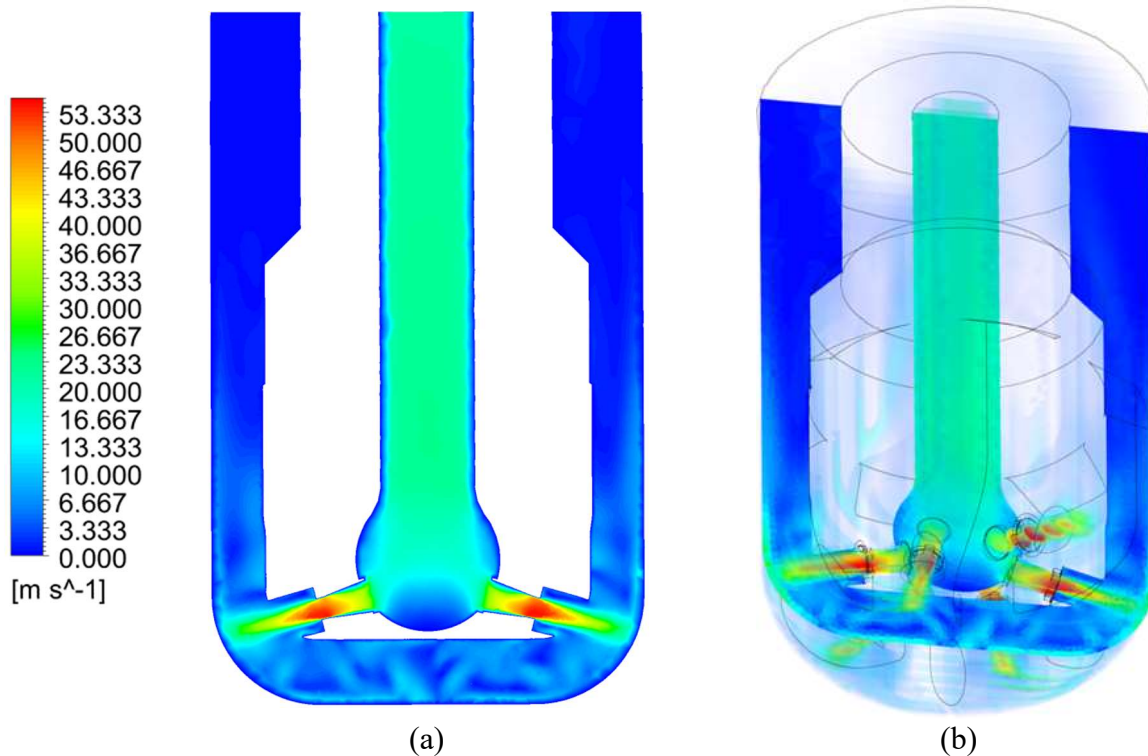


Figura 26. Resultados de velocidad para una broca PDC con ángulos de $75,14^\circ$ en (a) dos dimensiones (b) tres dimensiones.

Para observar con mayor claridad el comportamiento de la velocidad a lo largo de la geometría estudiada, broca PDC con ángulos de $75,14^\circ$ respecto al flujo, fueron realizados cortes a doce alturas diferentes, con énfasis en la zona alrededor de las boquillas, así como se evidencia en la Figura 27. En la Figura 28 se presenta con mayor claridad el cambio de velocidad a diferentes alturas: la entrada de las boquillas se evidencia a una altura de 13 pulgadas, donde se observa una velocidad alrededor de 25 m/s la cual es mayor a la rapidez con la que venía el fluido en la tubería; a la altura de 14 pulgadas, cuando el fluido se encuentra atravesando las boquillas, la velocidad se encuentra alrededor de 35 m/s y, a la salida de las boquillas los valores rondan cerca a los 50 m/s. En cuanto al fluido a punto de chocar con la formación, el valor de la velocidad se encuentra entre los 0 y 10 m/s, aunque, se puede observar, a una altura de 14.5 pulgadas que en la pared el valor de la velocidad no es 0 m/s, lo cual representa un cambio significativo respecto al comportamiento de una perforación sobrebalance, donde, los valores en la pared de la formación son iguales a 0 m/s.

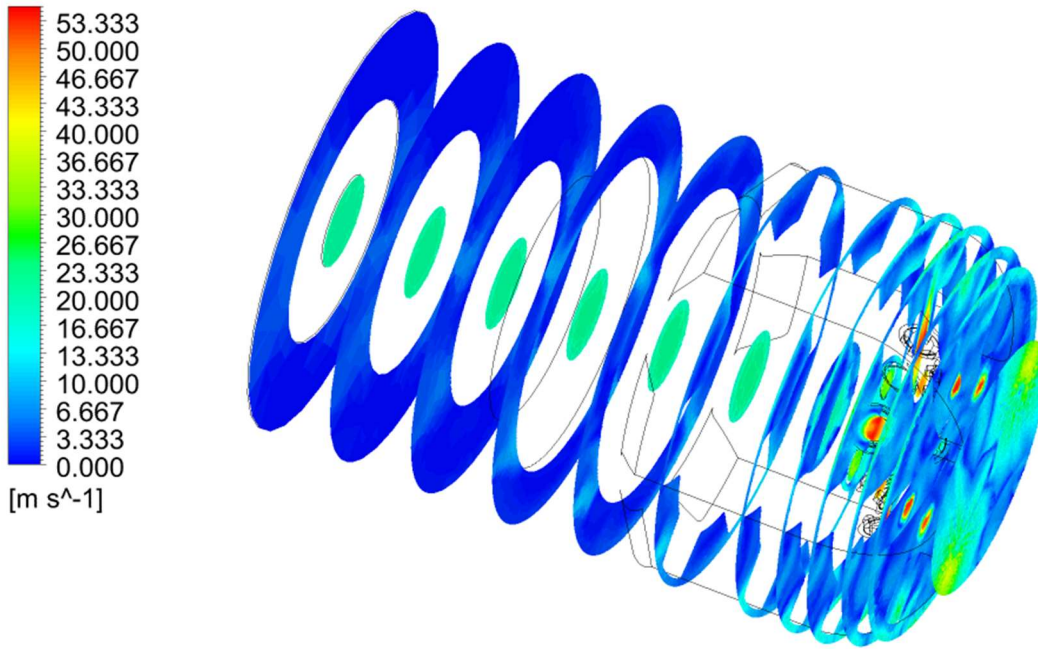


Figura 27. Valores de velocidad a diferentes alturas de la broca PDC con ángulos de 75,14°.

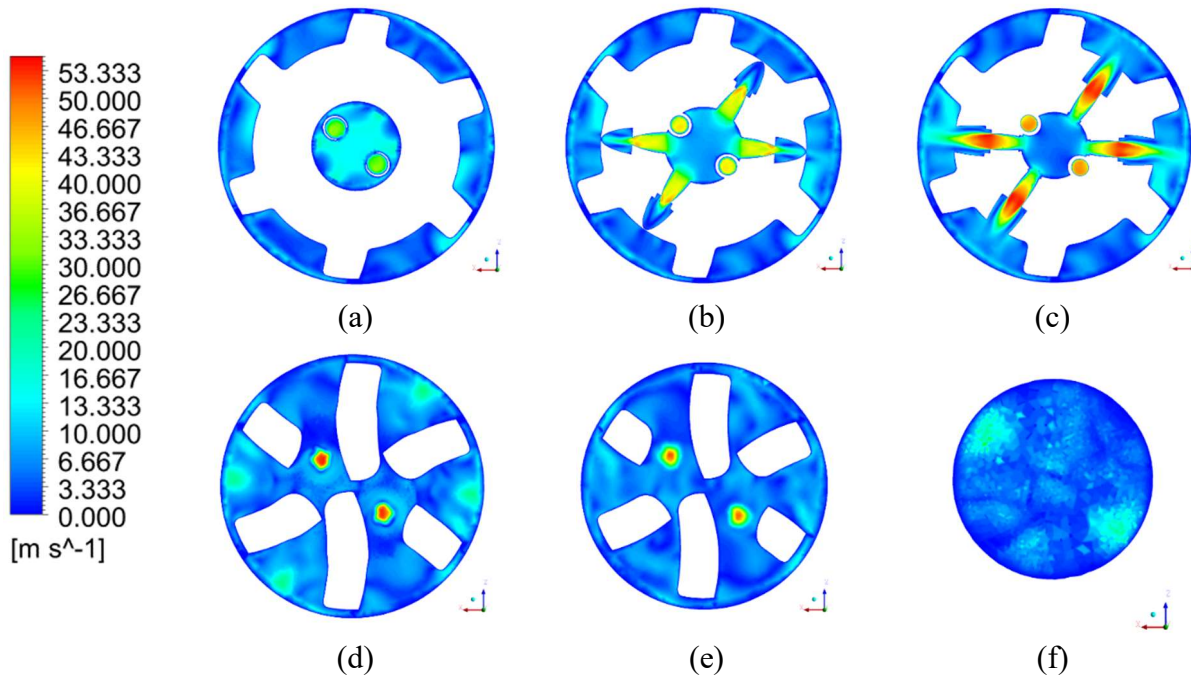


Figura 28. Velocidad medida a (a) 13 in, (b) 13.5 in, (c) 14 in, (d) 14.5 in, (e) 15 in y (f) 15.9 in para una broca PDC con ángulos de 75,14°.

iii. Comparación Broca 31,94° vs. Broca 75,14°

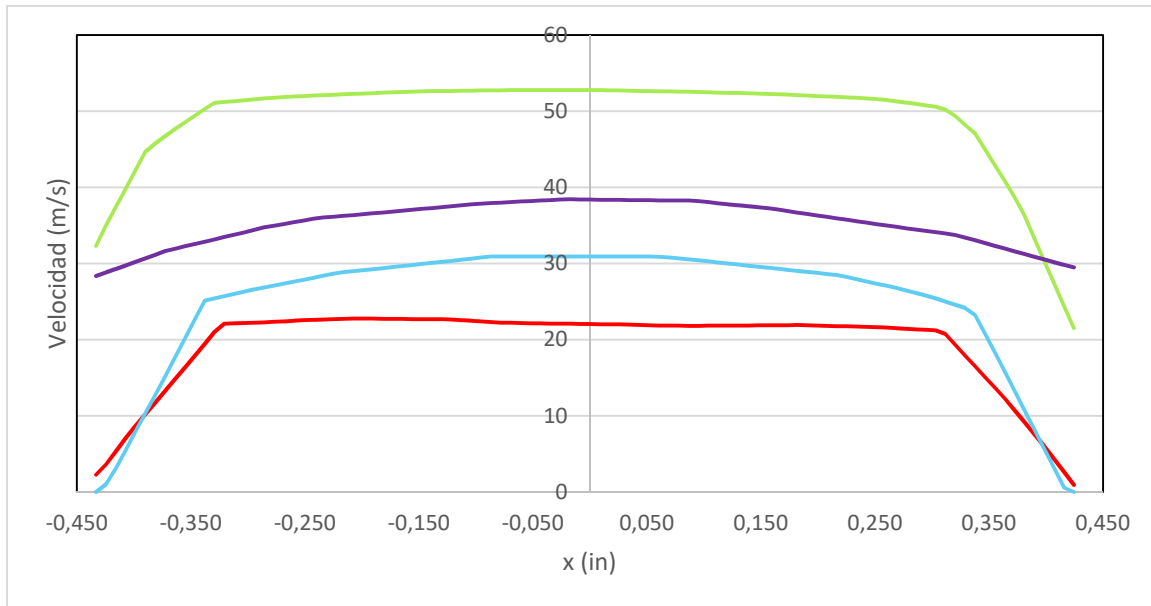


Figura 29. Valores de velocidad para la broca PDC de 31,94° donde — Entrada del fluido por las boquillas; — Paso del fluido por las boquillas; — Salida del fluido por las boquillas y — Fluido a punto de chocar con la formación.

En la *Figura 29* se presenta una compilación de los datos obtenidos para la simulación del primer escenario donde va de 22 m/s a la entrada de las boquillas a 32 m/s al atravesarlas para, finalmente, salir con una velocidad de 52 m/s. Al estar a punto de chocar con la formación, el fluido va disminuyendo su velocidad hasta llegar a 38 m/s y, visualmente, la velocidad llega a valores de 0 m/s en las paredes del pozo, replicando así una simulación sobrebalance.

En la *Figura 30* se presenta una recopilación de los datos obtenidos para la simulación del segundo escenario donde la velocidad a la entrada de las boquillas va de 38 m/s a 52 m/s al ser atravesadas para, finalmente, salir con una velocidad de 48 m/s. Al estar a punto de chocar con la formación, el fluido va disminuyendo su velocidad hasta llegar a 12 m/s y, visualmente, la velocidad llega a valores entre 0 a 10 m/s en las paredes del pozo, siendo este comportamiento más parecido a una perforación sobre balance que a una bajo balance dinámico.

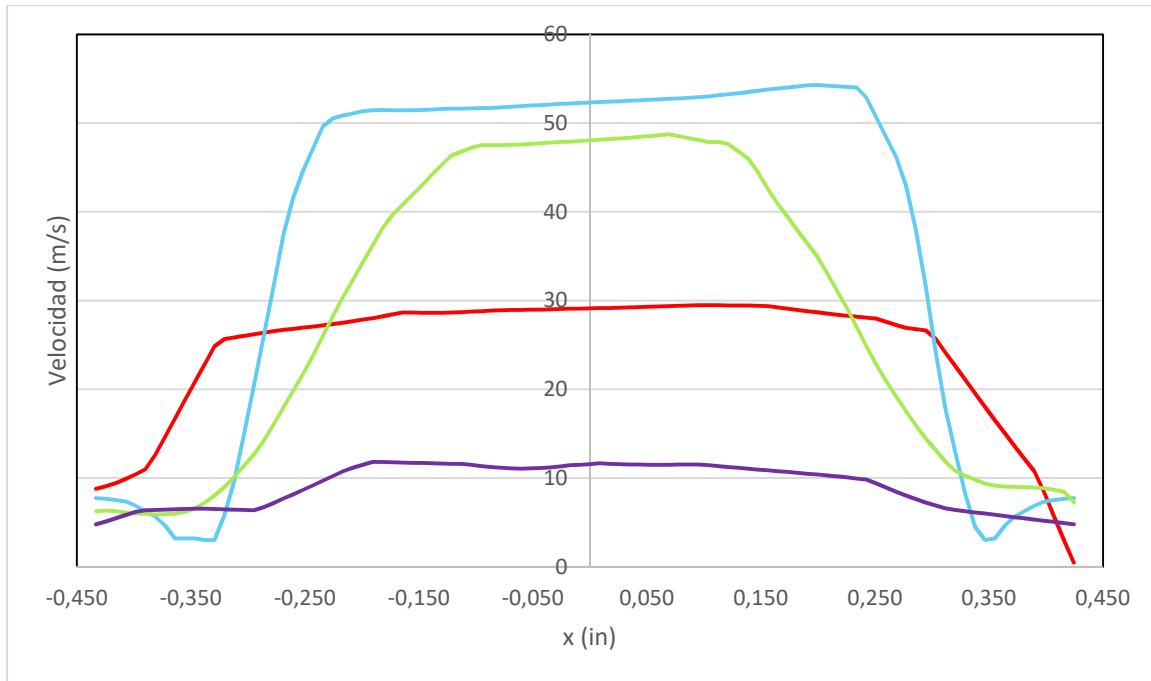


Figura 30. Valores de velocidad para la broca PDC de 75,14° donde — Entrada del fluido por las boquillas; — Paso del fluido por las boquillas; — Salida del fluido por las boquillas y — Fluido a punto de chocar con la formación.

4.2.2 Diferencial de presión.

i. Broca 31,94°

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. Al salir de estas, el fluido de perforación choca con la formación y, por ende, la velocidad queda reducida a cero, la presión aumenta, generándose así, la condición de sobrebalance (Robinson, 2010), tal como se muestra en la *Figura 31*.

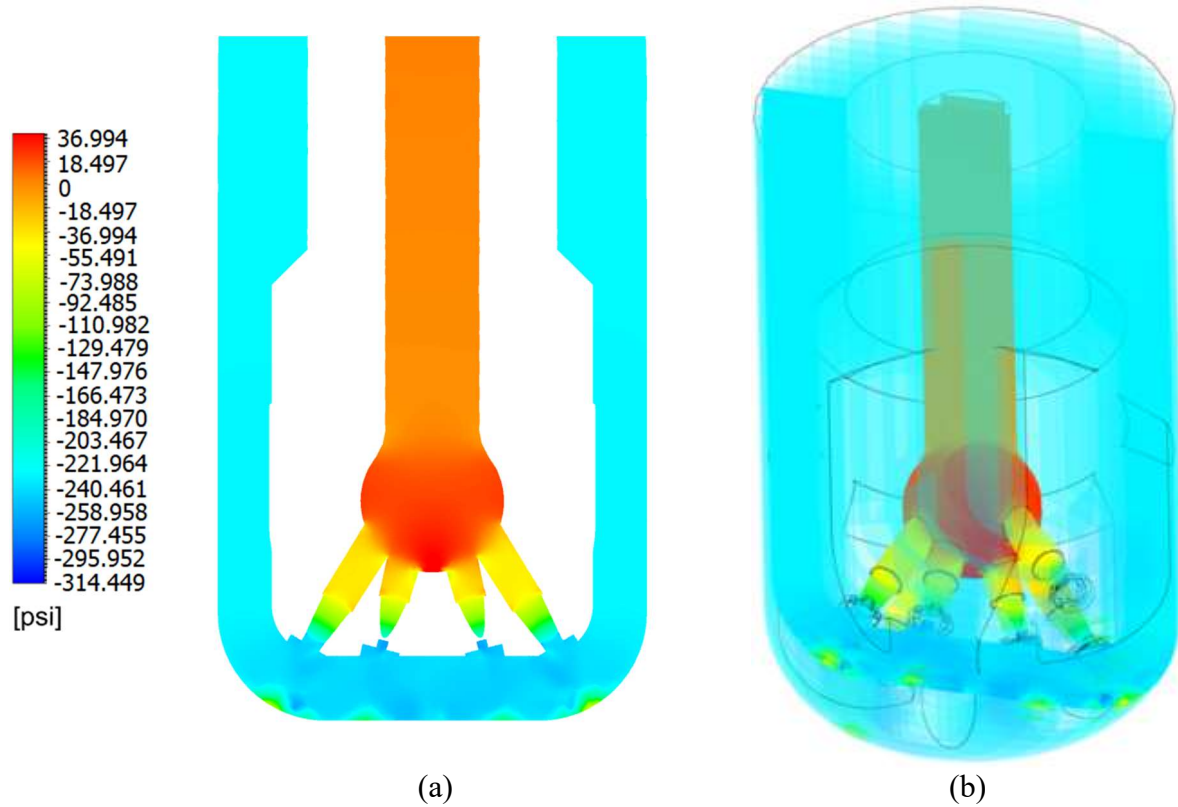


Figura 31. Diferencial de presión a lo largo de una broca PDC con ángulos de $31,94^\circ$ en (a) dos dimensiones (b) tres dimensiones.

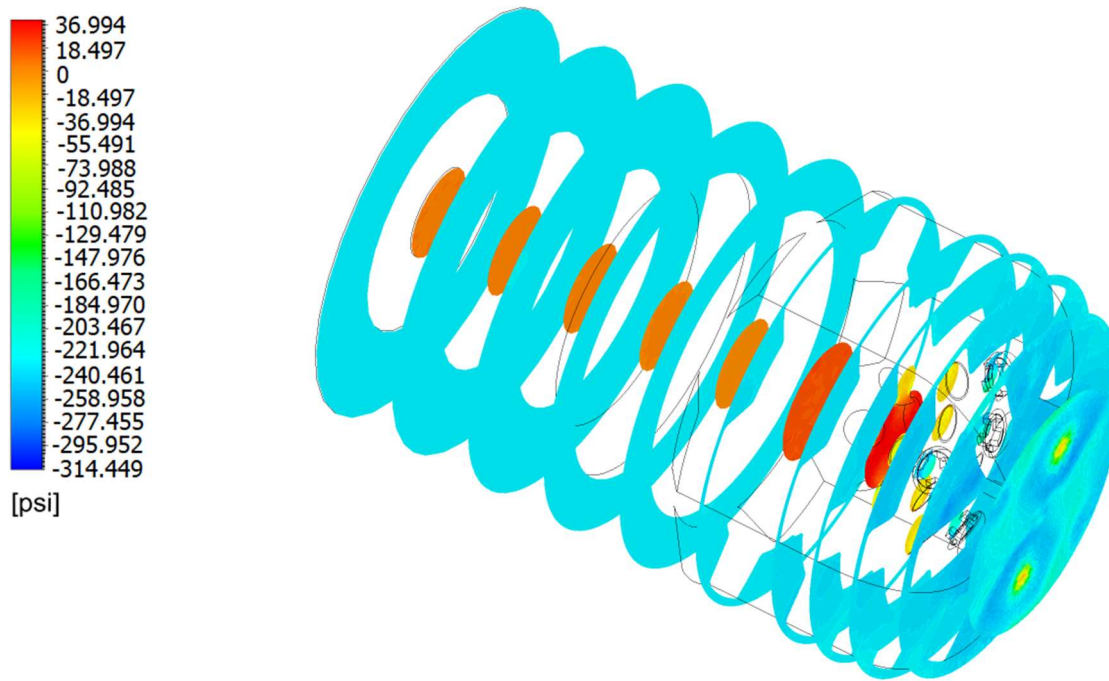


Figura 32. Diferencial de Presión a diferentes alturas de la broca PDC con ángulos de $31,94^\circ$.

Para observar con mayor claridad el comportamiento de la caída de presión a lo largo de la geometría estudiada, broca PDC con ángulos de $31,94^\circ$ respecto al flujo, fueron realizados cortes a once alturas diferentes, con énfasis en la zona alrededor de las boquillas, así como se evidencia en la *Figura 32*.

En la *Figura 33* se presenta con mayor claridad el diferencial de presión a diferentes alturas: la entrada de las boquillas se evidencia a una altura de 12 pulgadas, donde se observa una caída de presión alrededor de 5 psi respecto a la presión con la que venía el fluido en la tubería; a la altura de 14 pulgadas, cuando el fluido se encuentra atravesando las boquillas, el diferencial de presión se encuentra alrededor de 55 psi y, a una altura de 15 pulgadas donde se encuentra la salida de las boquillas la caída de presión aumenta hasta los 235 psi. En cuanto al fluido a punto de chocar con la formación, a la altura de 15,9 pulgadas se observa que la caída de presión se encuentra alrededor de los 185 psi.

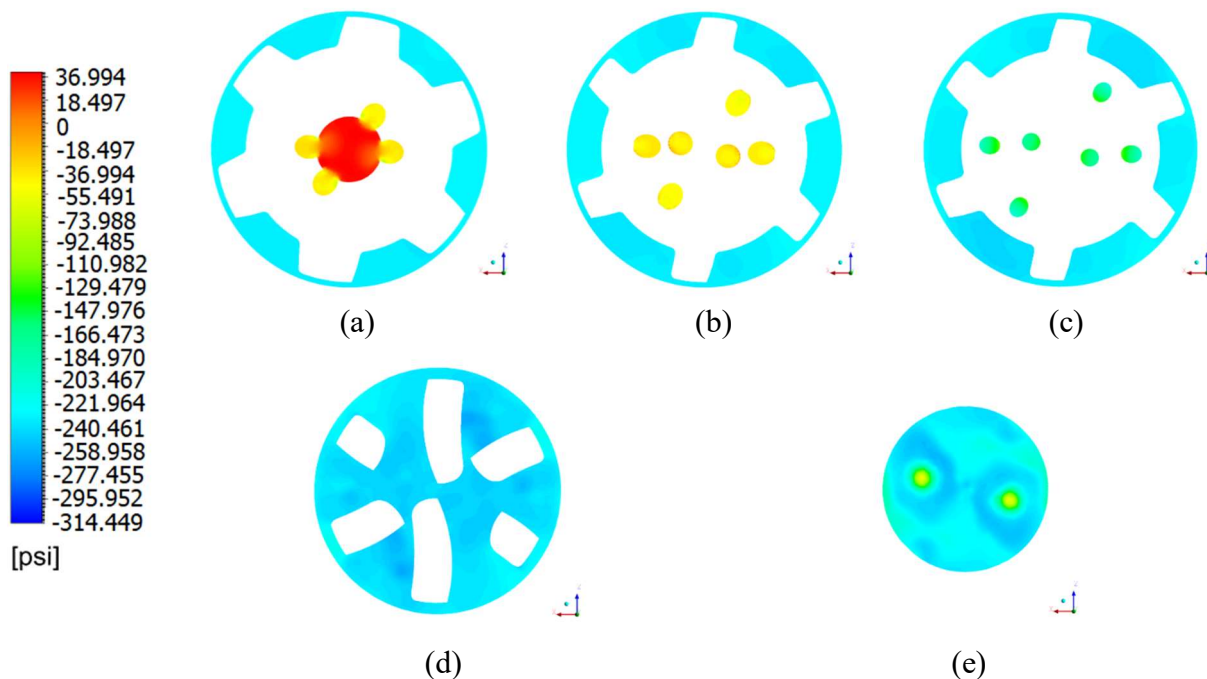


Figura 33. Diferencial de Presión medido a (a) 12 in, (b) 13 in, (c) 14 in, (d) 15 in y (e) 15,9 in para una broca PDC con ángulos de $31,94^\circ$

ii. Broca 75,14°

Por su parte, *Dynamic Underbalanced Drilling* afirma que el impacto de modificar la orientación y el ángulo de las boquillas 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 de 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, empieza a perder velocidad lo que generaría un incremento de la presión y, como consecuencia, que el resto del pozo se mantuviera en condiciones de sobrebalance.

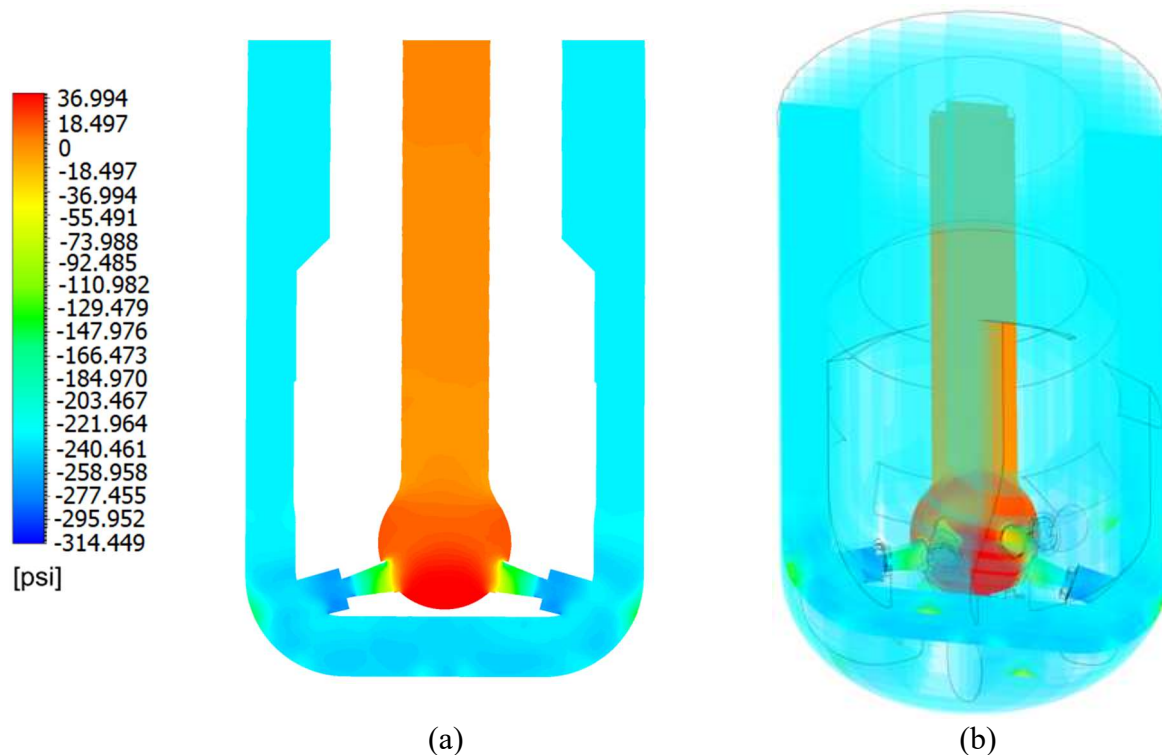


Figura 34. Diferencial de presión a lo largo de una broca PDC con ángulos de 75,14° en (a) dos dimensiones (b) tres dimensiones.

En la *Figura 34* se presentan los diferenciales de presión obtenidos para la broca PDC cuyos ángulos de boquillas son $75,14^\circ$. Los resultados de las simulaciones realizadas a esta geometría no corresponden a los postulados realizados por la técnica *Dynamic Underbalanced Drilling* siendo el comportamiento observado muy similar al obtenido en la perforación OBD: a medida que el fluido atraviesa las boquillas ocurre una caída de presión significativa, al salir de estas, la presión aumenta, evidenciando la condición de sobrebalance.

Para observar con mayor claridad el comportamiento del diferencial de presión a lo largo de la geometría estudiada, broca PDC con ángulos de $75,14^\circ$ respecto al flujo, fueron realizados cortes a doce alturas diferentes, con énfasis en la zona alrededor de las boquillas, así como se evidencia en la *Figura 35*.

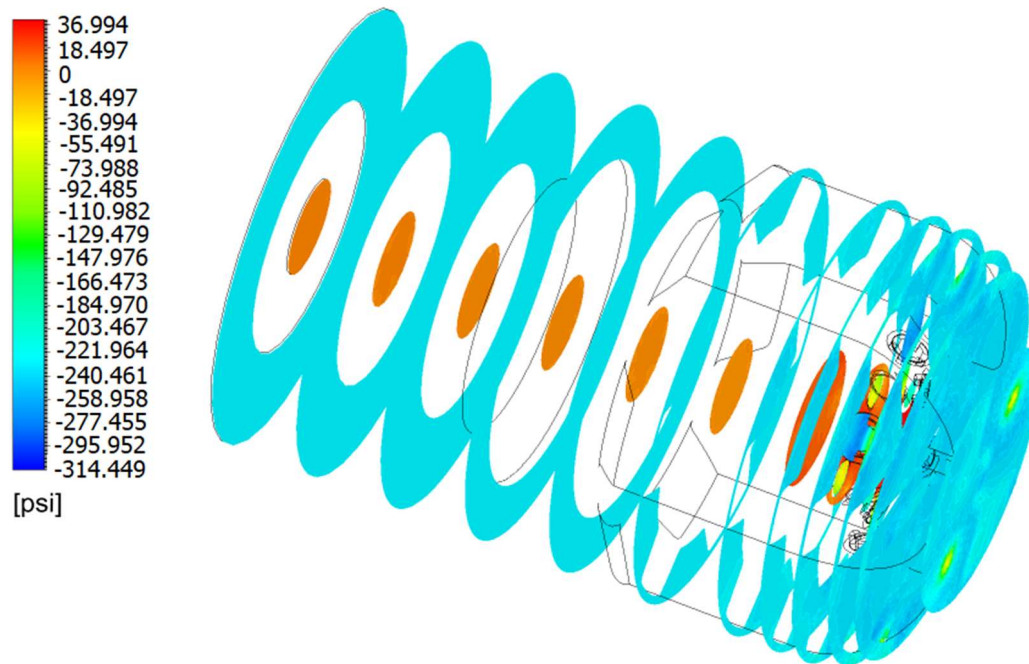


Figura 35. Diferencial de Presión a diferentes alturas de la broca PDC con ángulos de $75,14^\circ$.

En la *Figura 36* se presenta con mayor claridad el diferencial de presión a diferentes alturas: la entrada de las boquillas se evidencia a una altura de 13 pulgadas, donde se observa una caída de presión alrededor de 35 psi respecto a la presión con la que venía el fluido en la tubería; a la altura

de 14 pulgadas, cuando el fluido se encuentra atravesando las boquillas, la caída de presión aumenta hasta los 230 psi y, a la salida de las boquillas los valores de diferencial de presión rondan cerca a los 245 psi. En cuanto al fluido a punto de chocar con la formación, el valor del diferencial de presión se encuentra alrededor de los 125 psi.

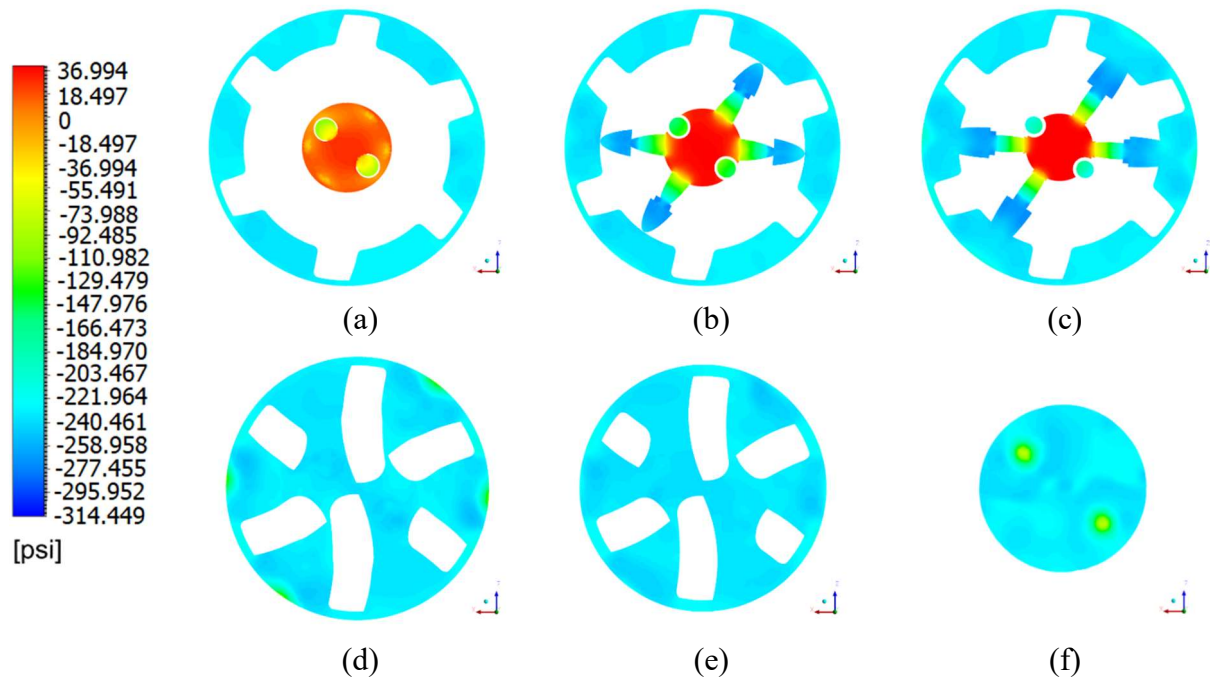


Figura 36. Diferencial de Presión medido a (a) 13 in, (b) 13.5 in, (c) 14 in, (d) 14.5 in, (e) 15 in y (f) 15,9 in para una broca PDC con ángulos de 75,14°

iii. Comparación Broca 31,94° vs. Broca 75,14°

En la *Figura 37* se presenta una compilación de los datos obtenidos para la simulación del primer escenario donde la caída de presión va de 5 psi a la entrada de las boquillas a 55 psi al atravesarlas para, finalmente, una caída de presión de 235 psi a la salida. Al estar a punto de chocar con la formación, el fluido aumenta un poco la presión para llegar a valores de diferencial de presión de 185 psi, replicando así una simulación sobrebalance.

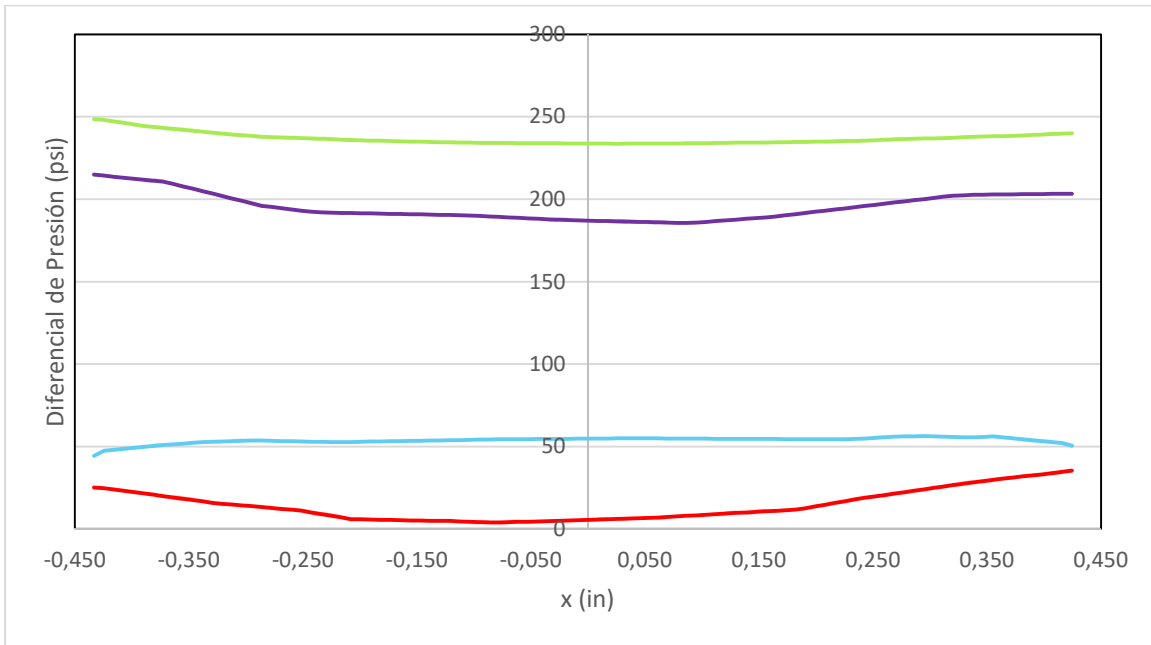


Figura 37. Diferencial de Presión para la broca PDC de 31,94° donde — Entrada del fluido por las boquillas; — Paso del fluido por las boquillas; — Salida del fluido por las boquillas y — Fluido a punto de chocar con la formación.

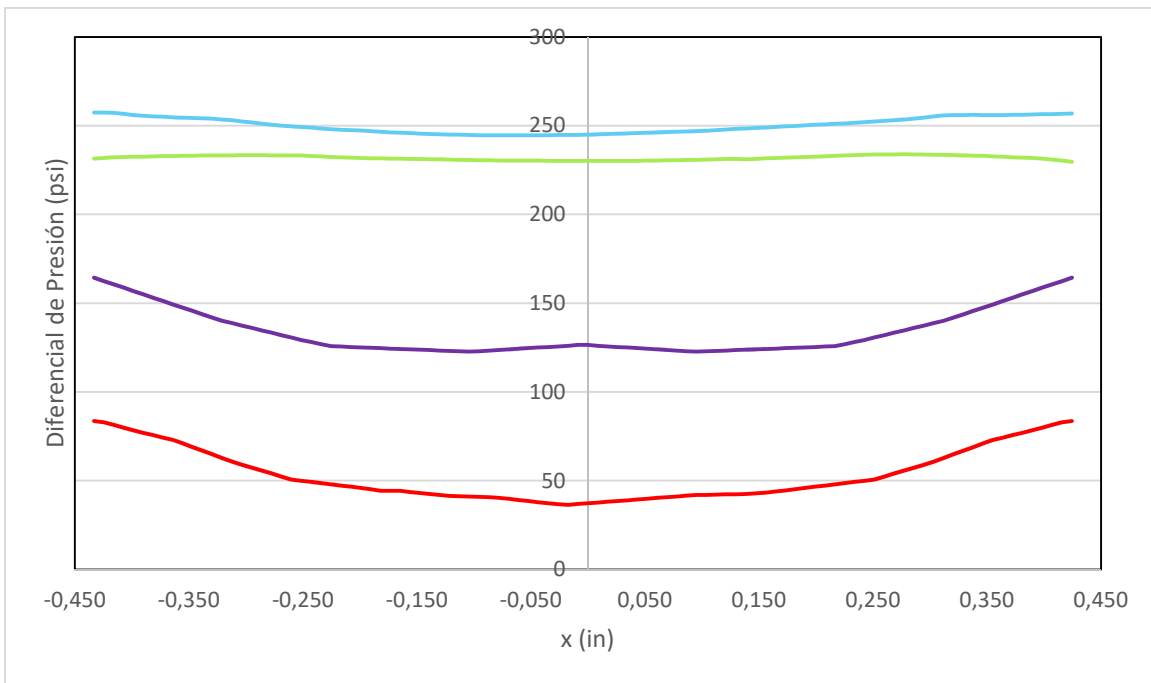


Figura 38. Diferencial de Presión para la broca PDC de 75,14° donde — Entrada del fluido por las boquillas; — Paso del fluido por las boquillas; — Salida del fluido por las boquillas y — Fluido a punto de chocar con la formación.

En la *Figura 38* se presenta una recopilación de los datos obtenidos para la simulación del segundo escenario donde la caída de presión a la entrada de las boquillas va de 35 psi a 245 psi al ser atravesadas para presentar una caída de presión de 230 psi. Al estar a punto de chocar con la formación, el fluido aumenta su presión para llegar a valores de diferencial de presión de 125 psi, siendo este comportamiento más parecido a una perforación sobre balance que a una bajo balance dinámico.

A pesar que fue realizada la modificación de los ángulos de las boquillas, respecto al flujo, de $32,94^\circ$ a $75,14^\circ$ en la búsqueda de la técnica *Dynamic Underbalanced Drilling* los resultados de las simulaciones apuntan a que, al realizar una perforación convencional, con dicha geometría en específico, el comportamiento físico que tendría el fluido de perforación en fondo de pozo sería el de una perforación sobrebalance.

5. Conclusiones

El mallado tetraédrico utilizado para la broca de $31,94^\circ$ arrojó un número de elementos de 3'685.169 con un valor de ortogonalidad promedio de 0,76702 donde sólo el 0,001% de los elementos tenían una calidad aceptable; por su parte, el valor de oblicuidad promedio fue 0,23127 donde el 0,006% de los elementos tenían una calidad mala. A sí mismo, para la broca de $75,14^\circ$ se manejaron 3'410.982 elementos con ortogonalidad promedio de 0,76737 donde sólo el 0,003% de los elementos tenían una calidad aceptable; a su vez, la oblicuidad promedio fue 0,23094 donde el 0,012% de los elementos tenían una calidad mala. Los valores de calidad descritos representan una excelente calidad de malla.

Los resultados de velocidad obtenidos para la broca PDC modificada presentan un comportamiento muy similar a los obtenidos en la simulación de una perforación sobrebalance y no representan los postulados realizados por la técnica *Dynamic Underbalanced Drilling*. Aunque, cabe resaltar que, en la geometría de $75,14^\circ$ a una altura de 14,5 pulgadas, en el anular la velocidad no se pierde completamente, lo cual discrepa de un comportamiento sobrebalance y podría representar un avance en pro a los postulados de la técnica DUBD.

Los resultados de los diferenciales de presión de las simulaciones realizadas a la broca de $75,14^\circ$ no corresponden a los postulados realizados por la técnica *Dynamic Underbalanced Drilling* siendo el comportamiento observado muy similar al obtenido en la perforación OBD: a medida que el fluido atraviesa las boquillas ocurre una caída de presión significativa, al salir de estas, la presión aumenta, evidenciando la condición de sobrebalance.

En la búsqueda de la técnica *Dynamic Underbalanced Drilling* fue realizada la modificación de los ángulos de las boquillas, respecto al flujo, de $31,94^\circ$ a $75,14^\circ$. Los resultados de las simulaciones apuntan a que, al realizar una perforación convencional, con esta geometría en específico, el comportamiento que tendría el fluido de perforación en fondo de pozo sería el de una perforación sobrebalance.

6. Recomendaciones

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 brazos, adicionalmente, probar un arreglo de ángulos diferente a $75,14^\circ$.

Para próximas simulaciones, probar con 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, a diferencia del estado estacionario que se trató en el presente trabajo, esto con la finalidad de ver el comportamiento de la broca propuesta en una perforación con la sarta en movimiento.

CFD proporciona distintos modelos de turbulencia, simular con uno diferente a Standard k-epsilon para el fluido de perforación. Asimismo, considerar modelar el fluido utilizado con características reológicas adicionales a viscosidad y densidad, para asemejarlo más al lodo de perforación.

Referencias Bibliográficas

- Aadnoy, B., Cooper, I., Miska, S., Mitchell, R. F., & Payne, M. L. (2009). *Advanced Drilling and Well Technology*. Richardson, TX: 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>
- ANSYS Advantage Staff. (2018). Gallery: Oil and Gas Industry Applications. 2015.
- Baker Hughes. (2014). *Baker Hughes Drill Bits Catalog*. Recuperado de <https://books.apple.com/mx/book/baker-hughes-drill-bits-catalog/id926514651>
- Batchelor, G. K. (2000). *An Introduction to Fluid Dynamics* (Cambridge Univ.Press). Recuperado de <http://adsabs.harvard.edu/abs/2000ifd..book.....B>
- 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>
- Cornejo Cáceres, J. S. (2018). *Simulación numérica de un separador gas-líquido tipo ciclón cilíndrico utilizando Dinámica De Fluidos Computacional*. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Santander.
- 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>
- González Silva, G. (2012). *Metodologia para aplicar LES ao craqueamento catalítico fluido em um reator riser industrial*. Recuperado de <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/266671>
- González Silva, G., Luz Lisboa, A. C., Velasquez, C., & José, H. (2010). The fluid dynamics of a downer fluidised bed using a cluster-based approach (CBA). *Ingeniería e Investigación*, 30(1), 35–40.
- Hamme, J. (2014). *CFD Modeling of Mud Flow around Drill Bit* (Lulea University of Technology). Recuperado de http://www.academia.edu/15789875/MASTERS_THESIS_CFD_Modeling_of_Mud_Flow_around_Drill_Bit
- Hareland, G., Wu, A., & James, J. A. (2009, enero 1). *Bearing Wear Model for Roller Cone Bits*. Presentado en Middle East Drilling Technology Conference & Exhibition. <https://doi.org/10.2118/125644-MS>
- 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. Presentado en SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition.

<https://doi.org/10.2118/96792-MS>

Jiménez, N. P., Silva, G. G., & Guerrero, A. C. (s. f.). *Estudio fluidodinámico de la combustión no premezclada de coque en regeneradores tipo riser usando CFD*.

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*. Presentado en International Petroleum Technology Conference. <https://doi.org/10.2523/IPTC-10326-ABSTRACT>

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

Napitupulu, E. K. (2014, enero 9). *10 inch PDC Oil Drill Bit*. Recuperado de <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*. Presentado en SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition. <https://doi.org/10.2118/178153-MS>

Petitjean, L., & Couet, B. (1994, enero 1). *Modeling of fracture propagation during overbalanced perforating*. Presentado en SPE Annual Technical Conference and Exhibition. <https://doi.org/10.2118/28560-MS>

- Robinson, L. (2010). Drill Bit Nozzle Pressure Loss. *AADE-10-DF-HO-26*. Presentado en AADE Fluids Conference and Exhibition, Houston, Texas.
- Rodi, W. (2017). *Turbulence Models and Their Application in Hydraulics*.
<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.
- Schlumberger. (2018). Smith Bits Product Catalog. Recuperado 11 de marzo de 2018, de https://www.slb.com/services/drilling/drill_bits/bits_catalog.aspx
- Silva, G. G., Jiménez, N. P., & Salazar, O. F. (2012). Fluid Dynamics of Gas-Solid Fluidized Beds. En *Advanced Fluid Dynamics*. InTech.
- Silva, G. G., Prieto, N., & Mercado, I. (2018). Large Eddy Simulation (LES) Aplicado a un lecho fluidizado gas-sólido. Parte I: Reactor a escala de laboratorio. *Revista UIS Ingenierías*, 17(1), 93-104.
- Smith International. (2002). *Tecnología de Barrenas Impregnadas*. Smith Technologies.
- Tu, J., Yeoh, G. H., & Liu, C. (2018). *Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach*. Butterworth-Heinemann.
- VOSviewer. (2019). VOSviewer (Versión 1.6.11).
- Xamán, J. (2016). *Dinámica De Fluidos Computacional Para Ingenieros*. Palibrio.

Xiong, H., & Shan, D. (2003, enero 1). *Reservoir Criteria for Selecting Underbalanced Drilling Candidates*. Presentado en 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>

Zhenquan, W., & Dongyu, S. (2014). Optimal Design of the Flow Field of Bi-center Bit. *Procedia Engineering*, 73, 345-351. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.06.208>