

**Evaluación fluido-dinámica de la técnica *Dynamic Underbalanced Drilling* para una  
broca PDC utilizando una herramienta de CFD**

**Johan Daivinson López Florez**

**Trabajo de grado para optar por el título de: Ingeniero de Petróleos**

**Director**

**Germán Gonzalez Silva**

**Ph.D. en Ingeniería Química**

**Co-directores**

**Nestor Fernando Saavedra Trujillo**

**MSc. en Ingeniería de Petróleos**

**Natalia Prieto Jiménez**

**Ph.D. en Ingeniería Química**

**Universidad Industrial de Santander**

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas**

**Escuela de Ingeniería de Petróleos**

**Bucaramanga**

**2019**

### Dedicatoria

Este proyecto va dedicado a las personas que gracias a sus enseñanzas, correcciones, consejos y en general toda acción que haya sentado los cimientos para la construcción de una mejor persona, con un carácter definido y una perspectiva de vida esperanzadora. Desde mis profesores de primaria hasta mis colegas de estudio, pero en especial a mis padres; mi madre, Nubia Florez, que sin ella nada de esto sería posible, con sus enseñanzas ha hecho de mí una gran persona, a mi padre, Alberto López, la persona por la que decidí, de forma inesperada, darme la oportunidad de conocer esta bonita carrera de la cual me siento orgulloso, a él este logro y a mi hermosa pareja, Alejandra Tarazona, la persona que llegó en el momento que debía llegar, para darle un rumbo nuevo a mi vida, completamente lleno de felicidad y alegría, ustedes son mis motores de vida, la fuerza que me impulsa cada mañana a superarme y lograr hasta lo imposible.

### Agradecimientos

En primer lugar deseo expresar mi agradecimiento al director de esta tesis, Dr. Germán González Silva, por la dedicación y apoyo que ha brindado a este trabajo, por el respeto a mis sugerencias e ideas, por la dirección y el rigor que ha facilitado el excepcional desarrollo de la misma. Gracias por la confianza ofrecida desde que inició el proyecto.

Así mismo, agradezco a mis Co-directores de tesis, Ing. Natalia prieto Jiménez, su apoyo incondicional, asesoría y asistencia brindada en todo momento que fue necesitado, y en especial Ing. Néstor Fernando Saavedra, pues gracias a su metodología particular de dictar la materia de perforación fue que finalmente conocí el tema de investigación y hoy concretado trabajo de tesis, el cual, con orgullo puedo decirle que ha comenzado por buen camino.

Por su orientación y atención a mis consultas sobre el desarrollo de las simulaciones al Ing. José Luis Gómez, y al Ing. Wilson Raúl Velasco, que a pesar de su trabajo apartaba el espacio para atender mis consultas, un poco más técnicas, alrededor de la base del trabajo, y las sugerencias recibidas.

Todo trabajo de investigación es, en su mayoría, fruto de ideas, proyectos y esfuerzos previos que corresponden a otras personas. En este caso mi más sincero agradecimiento al Dr. Mohamed El Neiri, de la universidad del Cairo, cuyo trabajo sentaron las bases de este y del que estaré siempre en deuda.

A mis colegas y compañeros, Oscar Martínez y Diego Poveda que con su conocimiento contribuyeron con sus ideas y de una forma u otra aportaron su grano de arena, gracias.

Pero un trabajo de investigación es siempre fruto del reconocimiento y apoyo vital que nos ofrecen las personas que nos estiman, sin el cual no tendríamos la fuerza y energía que nos anima a crecer como personas y superarnos como profesionales.

Gracias a mi familia, en especial a mis padres Nubia Florez y Alberto López, quienes me han hecho la persona que soy hoy en día, nunca podré saldar esa deuda pero daré lo mejor de mí para recompensarles, mientras la vida me lo permita.

Gracias a mis amigos, en especial a Tadeo Palacios y Diego Amaya que siempre me han prestado un apoyo moral y humano, necesarios en los momentos difíciles de este trabajo.

Pero sobre todo, gracias a la mujer que ha estado ahí, con su paciencia, comprensión y solidaridad, Alejandra Tarazona, que día y noche estuvo acompañándome en los momentos más amargos y más desgastantes como en los más satisfactorios y reconfortantes, porque en todo momento fuiste mi calma en la tormenta, mi gran amor y mi motor de vida. Sin tu apoyo este trabajo nunca se habría escrito, y es por eso, que este trabajo es también tuyo.

Y para los que quizás se me pasa nombrar, pero que en su momento fueron de gran ayuda y apoyo a este trabajo; a todos, muchas gracias.

**Contenido**

|   | <b>Pág.</b> |
|---|-------------|
| 1. Marco Referencial.....   | 16          |
| 1.1 Técnicas de perforación en la industria petrolera .....                 | 16          |
| 1.1.1 <i>Overbalanced Drilling</i> (OBD).....                               | 16          |
| 1.1.2 <i>Underbalanced Drilling</i> (UBD).....                              | 17          |
| 1.1.3 <i>Managed Pressured Drilling</i> (MPD).....                          | 18          |
| 1.1.4 <i>Dynamic Underbalanced Drilling</i> (DUBD). .....                   | 18          |
| 1.2 Brocas utilizadas en la perforación moderna. ....                       | 19          |
| 1.2.1 Broca de conos rotantes. ....   | 20          |
| 1.2.2 Broca de cortadores fijos. ....                                       | 21          |
| 1.3 Condiciones hidráulicas de una broca de perforación .....               | 22          |
| 1.4 Características reológicas de un fluido de perforación .....            | 24          |
| 1.4.1 Etapas de flujo.....  | 28          |
| 1.5 Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) en la industria petrolera ..... | 29          |
| 2. Modelo Matemático .....  | 32          |
| 2.1 Ecuaciones de conservación .....  | 33          |
| 2.1.1 Ecuación de conservación de masa.....                                 | 33          |
| 2.1.2 Ecuación de conservación de cantidad de momento.....                  | 33          |
| 2.2 Modelo de turbulencia .....   | 34          |

|  |    |
|--|----|
| 2.2.1 Ecuaciones de transporte para el modelo <i>standard k – ε</i> .....    | 35 |
| 2.3 Tratamiento mejorado de pared .....                                      | 35 |
| 2.3.1 Modelamiento de doble capa para el tratamiento mejorado de pared. .... | 36 |
| 2.4 Modelo numérico .....  | 37 |
| 2.4.1 Discretización Espacial.....   | 37 |
| 2.4.1.1 First-Order Upwind.....  | 37 |
| 2.4.1.2 Second-Order Upwind. ....  | 38 |
| 3. Metodología .....   | 39 |
| 3.1 Identificación del problema .....  | 41 |
| 3.2 Pre-Procesamiento .....  | 43 |
| 3.2.1 Geometría.....   | 43 |
| 3.2.2 Malla. ....  | 47 |
| 3.2.3 Modelos físicos. ....  | 49 |
| 3.3 Solución del sistema .....   | 50 |
| 3.4 Post-procesamiento .....   | 51 |
| 4. Análisis y comparación de resultados.....                                 | 51 |
| 4.1 Test de independencia de malla .....                                     | 52 |
| 4.2 Validación del modelo .....  | 56 |
| 4.3 Comparación de modelos.....  | 61 |
| 4.3.1 Velocidad. ....  | 61 |
| 4.3.2 Presión.....   | 66 |
| 5. Conclusiones .....  | 70 |
| 6. Trabajos Futuros .....  | 73 |

---

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| 7. Curriculum Vitae .....        | 74 |
| Referencias Bibliográficas ..... | 76 |

## Lista de Figuras

|  | <b>Pág.</b> |
|--|-------------|
| <i>Figura 1.</i> Broca de conos rotantes y broca de cortadores fijos. (Mitchell & Miska, 2011) .....                               | 20          |
| <i>Figura 2.</i> Broca PDC. (Mitchell & Miska, 2011).....  | 21          |
| <i>Figura 3.</i> Perfil de velocidad de un fluido no newtoniano (laminar) .....  | 25          |
| <i>Figura 4.</i> Efecto de la velocidad de corte sobre la viscosidad efectiva de un fluido no newtoniano.....                      | 26          |
| <i>Figura 5.</i> Efecto de disminución de la viscosidad con el esfuerzo de corte en los fluidos no newtonianos. ....               | 27          |
| <i>Figura 6.</i> Etapas de flujo .....   | 29          |
| <i>Figura 7.</i> Análisis del flujo de un fluido de perforación en una broca tricónica y PDC.. .....                               | 30          |
| <i>Figura 8.</i> Modelo Standard k-Epsilon vs Modelo Standard k-Epsilon con EWT .....  | 36          |
| <i>Figura 9.</i> Metodología .....   | 40          |
| <i>Figura 10.</i> Información de la broca, condiciones hidráulicas y reología del lodo. ....                                       | 42          |
| <i>Figura 11.</i> Plano Geometría Base.....  | 44          |
| <i>Figura 12.</i> Plano geometría modificada .....   | 45          |
| <i>Figura 13.</i> Geometría base .....   | 46          |
| <i>Figura 14.</i> Vista superior de la broca base y broca modificada, previsualizando la modificación de cuatro de seis jets. .... | 47          |
| <i>Figura 15.</i> Configuración de malla.....  | 48          |

|  |    |
|--|----|
| <i>Figura 16.</i> Malla final broca base.....  | 49 |
| <i>Figura 18.</i> Propiedades del fluido .....   | 50 |
| <i>Figura 19.</i> Línea de referencia para test de independencia de malla.....   | 53 |
| <i>Figura 20.</i> Velocidad para cada malla.....   | 54 |
| <i>Figura 21.</i> Representación gráfica para la toma de datos.....  | 54 |
| <i>Figura 22.</i> Análisis Test de independencia de malla.....   | 55 |
| <i>Figura 23. A:</i> Velocidad del fluido a través de los jets. <b>B:</b> En amarillo, línea de referencia para la toma de datos ..... | 57 |
| <i>Figura 24.</i> Caída de presión.....  | 59 |
| <i>Figura 25.</i> Líneas de referencia toma de datos.....  | 60 |
| <i>Figura 26.</i> Velocidad: Caso A vs Caso B.....   | 62 |
| <i>Figura 27.</i> Velocidad en anular broca base .....   | 63 |
| <i>Figura 28.</i> Velocidad en anular broca modificada .....   | 63 |
| <i>Figura 29</i> Velocidad anular: Caso A vs Caso B.....   | 64 |
| <i>Figura 30.</i> Velocidad jet Broca base .....   | 64 |
| <i>Figura 31.</i> Velocidad Jets broca modificada .....  | 65 |
| <i>Figura 32.</i> Promedio velocidad jets: Caso A vs Caso B.....   | 65 |
| <i>Figura 33.</i> Vista interior flujo en Jets.....  | 66 |
| <i>Figura 34.</i> Contorno de presión en la cara de la formación .....   | 67 |
| <i>Figura 35.</i> Contorno de presión en la zona interior de la broca .....  | 68 |
| <i>Figura 36.</i> Diferencial de presión: Caso A.....  | 69 |
| <i>Figura 37.</i> Diferencial de presión: Caso B .....   | 69 |
| <i>Figura 38.</i> Diferencial de presión: Caso A vs Caso B.....  | 70 |

**Lista de Tablas**

|  | <b>Pág.</b> |
|--|-------------|
| Tabla 1. <i>Aplicaciones de CFD en la industria del petróleo y gas</i> .....       | 30          |
| Tabla 2. <i>Resultados Velocidad vs Diferentes mallas</i> .....                    | 53          |
| Tabla 3. <i>Tabla de datos comparativa</i> .....                                   | 56          |
| Tabla 4. <i>Velocidad Jets broca base</i> .....                                    | 58          |
| Tabla 5. <i>Presión anular</i> .....   | 60          |
| Tabla 6. <i>Resumen resultados para las variavles de Velocidad y Presión</i> ..... | 61          |

## Nomenclatura

| SIMBOLO   | NOMBRE                                   | UNIDADES                 |
|---|--|--------------------------|
| $\mu$   | Velocidad                                | <i>ft / s</i>            |
| $\rho$  | Densidad                                 | <i>lb / gal</i>          |
| $t$   | Tiempo                                   | <i>s</i>                 |
| $\nabla$  | Operador diferencial vectorial           |                          |
| $p$   | Presión                                  | <i>psi</i>               |
| $g$   | Gravedad                                 | <i>m / s<sup>2</sup></i> |
| $k$   | Energía cinética turbulenta              |                          |
| $\mu_t$   | Viscosidad turbulenta                    |                          |
| $G_k, G_b, Y_M, S_k, C_{1\varepsilon}, G_{3\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_\mu$ | Constantes de modelo estándar <i>k-e</i> |                          |
| $\rho_m$  | Densidad promedio                        | <i>lb / gal</i>          |
| $a$   | Fracción volumétrica                     |                          |
| $v_m$   | Velocidad promedio                       | <i>ft / s</i>            |
| $\vec{A}$   | Vector de área superficial               |                          |
| $\Gamma$  | Coficiente de difusión                   |                          |

## Resumen

**TÍTULO:** EVALUACIÓN FLUIDO-DINÁMICA DE LA TÉCNICA *DYNAMIC UNDERBALANCED DRILLING* PARA UNA BROCA PDC UTILIZANDO UNA HERRAMIENTA CFD\*

**AUTOR:** JOHAN DAIVINSON LÓPEZ FLOREZ\*\*

**PALABRAS CLAVE:** PERFORACIÓN, OPTIMIZACIÓN, CFD, BROCA, PDC, UBD, DUBD, OBD, ROP, SKIN.

### DESCRIPCIÓN:

Convencionalmente se conocen dos técnicas de perforación: OBD y UBD, cada una con sus ventajas y desventajas. En este proyecto se presenta un nuevo escenario en donde podrían co-existir las dos técnicas de perforación, OBD a lo larga de la sarta y UBD en la zona de la broca, sin alterar el fluido de perforación ni adicionando equipos, logrando aprovechar lo mejor de las dos técnicas. Basado en el principio de Bernoulli se plantea una modificación en los jets de una broca PDC, que por medio de una caída de presión generada en la zona de la broca busca optimizar algunos parámetros en la perforación, tales como aumento de la ROP, disminución del daño a la formación al estar menos tiempo expuesto el hueco abierto, salvando tiempo, ahorrando dinero y permitiendo la entrega de pozos con mayores tasas de producción inicial. A través de la simulación computacional de fluidos y usando datos de una perforación real de un pozo en Colombia se presentan dos simulaciones; la primera con una broca PDC convencional y la segunda con una modificación en cuatro de sus seis jets, y a partir de la comparación de resultados se logra probar el principio del fenómeno que acontece en la zona de la broca logrando un primer paso exitoso para el desarrollo de una posible nueva técnica de perforación más eficiente y novedosa.

---

\* Proyecto de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas Escuela de Ingeniería de Petróleos Director Germán Gonzalez Silva Ph.D. en Ingeniería Química Co-directores Nestor Fernando Saavedra Trujillo MSc. en Ingeniería de Petroleos Natalia Prieto Jiménez Ph.D. en Ingeniería Química

## Abstract

**TITLE:** FLUID-DYNAMIC EVALUATION OF DYNAMIC UNDERBALANCED DRILLING TECHNIQUE FOR A PDC BIT USING A CFD TOOL\*.

**AUTHOR:** JOHAN DAIVINSON LÓPEZ FLOREZ\*\*

**KEYWORDS:** PERFORATION, OPTIMIZATION, CFD, BIT, PDC, UBD, DUBD, OBD, ROP, SKIN.

### DESCRIPTION:

Conventionally two drilling techniques are known: OBD and UBD, each with its advantages and disadvantages. This project presents a new scenario in which the two drilling techniques, OBD along the drill string and UBD in the bit area could co-exist, without altering the drilling fluid or adding equipment, making the best of both techniques. Based on the Bernoulli principle a modification is proposed in the jets of a PDC bit, that by means of a pressure drop generated in the area of the drill seeks to optimize some parameters in the drilling, such as increase of the ROP, reduction of damage by being less exposed to the open hole, saving time, saving money and allowing the delivery of wells with higher initial production rates. Through the computational simulation of fluids and using data from a real well drilling in Colombia, two simulations are presented; the first with a conventional PDC bit and the second with a modification in four of its six jets, and from the comparison of results it is possible to test the principle of the phenomenon that occurs in the area of the drill achieving a successful first step for the development of a possible new technique of perforation more efficient and novel.

---

\* Bachelor Thesis

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas Escuela de Ingeniería de Petróleos Director Germán Gonzalez Silva Ph.D. en Ingeniería Química Co-directores Nestor Fernando Saavedra Trujillo MSc. en Ingeniería de Petroleos Natalia Prieto Jiménez Ph.D. en Ingeniería Química

## 1. Marco Referencial

### 1.1 Técnicas de perforación en la industria petrolera

En la historia de perforación de pozos de petróleo las primeras perforaciones fueron realizadas usando herramientas de percusión, por lo que las primeras torres fueron bajo balance (Con la presión de la formación mayor a la del pozo) y 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, la mayoría de los pozos han sido perforados sobrebalance (Aadnoy, Cooper, Miska, Mitchell, & Payne, 2009).

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

**1.1.2 Underbalanced Drilling (UBD).** Esta técnica es un procedimiento donde se busca mantener la presión hidrostática del pozo menor a la presión de poro de la formación siendo perforada, por lo tanto hay un flujo constante desde la formación hasta la superficie a través del pozo. Esta técnica es aplicada a nuevas perforaciones tanto *onshore* como *offshore*, pozos existentes multilaterales o con *sidetrack*. (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. Los procesos de perforación, completamiento y trabajos de *workover* 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 dado 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 suficientemente grande como 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. (JPT staff, 1998).

**1.1.3 *Managed Pressured Drilling (MPD)*.** La condición que hace especial a MPD es la capacidad de poder controlar la presión en fondo de pozo, mientras se está perforando o conectando. Convencionalmente, el peso del lodo y la fricción en el anular son los principales contribuyentes en la manipulación de la presión de fondo, por lo tanto, cambiar el peso del lodo, así como variar la velocidad de bombeo, modifica los valores de presión de fondo de pozo. MPD ofrece una variable contribuyente adicional, un sistema de presión de respaldo en superficie: *Surface Back Pressure (SBP)* el cual puede ajustar el valor de la presión de fondo de pozo, por lo tanto, una optimización en la perforación puede ser lograda de forma inmediata, evitando el consumo de tiempo mezclando un nuevo lodo mientras se mantienen los parámetros de perforación en el pozo tal como fue planeado. MPD tiene la capacidad de manipular fácilmente el SBP, lo que permite un rápido ajuste respecto a los diferentes cambios de presión en la columna estatigráfica. Esto, por supuesto, mitiga los riesgos y costos asociados con los pozos que tienen una ventana estrecha de perforación. (Dharma, Irawan, & Hidayat, 2016)

**1.1.4 *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, 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.

## **1.2 Brocas utilizadas en la perforación moderna.**

Hay muchas variaciones de diseños de broca disponibles y la selección de esta depende del 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 una larga lista de parámetros de operación incluyendo el peso sobre la broca o 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 1. Las brocas de conos rotantes poseen uno o más conos que contienen cortadores, 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.



*Figura 1.* Broca de conos rotantes y broca de cortadores fijos. (Mitchell & Miska, 2011)

**1.2.1 Broca de conos rotantes.** Las brocas de conos rotantes están clasificadas como 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 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, y adecuadas para una gran variedad de tipos de formación y aplicaciones.

La forma de los dientes de la broca también tiene un gran efecto en la perforación de una broca de conos rotantes. Dientes largos y espaciados uno de otro, son usadas 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. Los pequeños dientes también permiten la construcción de rodamientos más fuertes. El diseño de los insertos y dientes dependen grandemente de la dureza y perforabilidad de la formación (Hareland, Wu, & James, 2009).

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

**1.2.2 Broca de cortadores fijos.** Las brocas 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 al igual que las brocas de diamante hechas del material impregnado y diamante natural. Existe una tercera categoría, la cual también rompe la roca por medio de un proceso de corte el cual está referido como una broca de arrastre, aunque son raramente usadas en la industria hoy (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.

Las brocas PDC, como la mostrada en la figura 2, no tiene partes móviles, es decir, no tiene 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, se aplica menos WOB, aunque mayores velocidades de rotación son requeridas (Bybee, 2005).



Figura 2. Broca PDC. (Mitchell & Miska, 2011)

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 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.

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

### 1.3 Condiciones hidráulicas de una broca de perforación

En una perforación hay 3 condiciones hidráulicas:

- i. Condición estática, donde el fluido y la sarta no se encuentran en movimiento.
- ii. Operación de circulación, donde el fluido está siendo bombeado hacia abajo por la sarta y subiendo por el anular.
- iii. La sarta se encuentra en movimiento, arriba o abajo, a través del fluido.

La determinación de la presión en diferentes puntos del pozo resulta ser bastante compleja cuando el lodo o la sarta están en movimiento debido a que las fuerzas de fricción en el pozo pueden ser muy difíciles de describir matemáticamente. De cualquier forma, estas fuerzas de fricción se ven reflejadas en la densidad equivalente del fluido en circulación o ECD (*Equivalent Circulating Density*), la capacidad de carga que tiene el fluido de perforación para llevar los recortes a superficie, presión óptima de la bomba, tasa de flujo y tamaño de la boquilla en los jets

de la broca durante las operaciones de perforación, es decir las fuerzas de fricción varían en función de estos factores.

Los orificios por los cuales se genera la salida del fluido de perforación de la broca son llamados boquillas. Suelen ser de pequeño tamaño (aproximadamente 0,25 in de diámetro) y, debido a que la presión del fluido dentro de la broca es alta, la velocidad de salida a través de estas es elevada, lo que genera un chorro de alta velocidad. El propósito de las boquillas es mejorar la acción de limpieza del fluido de perforación en el fondo de pozo. Además, antes del uso de las boquillas la vida de las brocas era mucha más corta debido a un desgaste por fricción contra la roca en contacto. Se logra un incremento significativo en la ROP a través de la apropiada selección del tamaño de boquilla. En formaciones consolidadas, el aumento en la ROP se debe principalmente al mejoramiento de la acción de limpieza en el fondo de pozo. En formaciones blandas, el fluido saliente del jet puede destruir el fondo de pozo (Bailey & Peden, 2000).

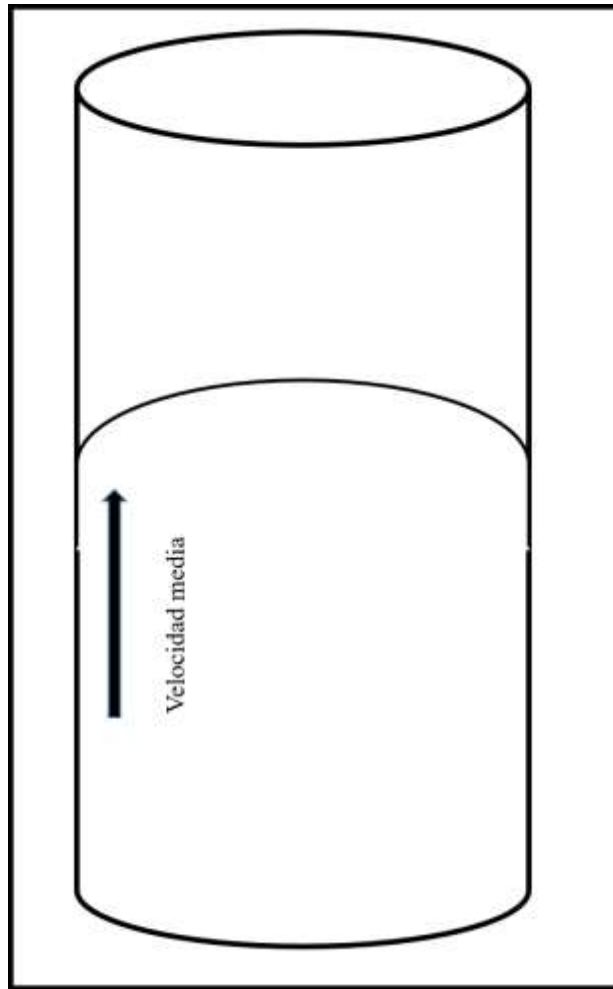
Una broca de perforación PDC, cuenta con más de una boquilla. La caída de presión aplicada a lo largo de todas las boquillas es la misma siempre que los diámetros sean iguales, pues la velocidad es función del área transversal. Si hay una boquilla de mayor diámetro la velocidad disminuye.

En la práctica, generalmente, se asume que: El cambio de presión, debido a un cambio de altura de la boquilla es despreciable, la velocidad despreciable delante de la boquilla, comparado con la velocidad en ella y la presión debido a la fuerza de fricción a través de la boquilla es considerada despreciable.

#### 1.4 Características reológicas de un fluido de perforación

Las propiedades reológicas del fluido de circulación resultan siendo un agente importante del que depende la caída de presión en un sistema, para un sistema A y un sistema B con diferentes propiedades reológicas para el lodo las caídas de presión son diferentes debido a sus desigualdades reológicas como viscosidad, punto de cedencia entre otras. Esta es conocida como pérdida de presión por fricción.

Las características reológicas de un fluido nos sirven para poder calcular las pérdidas de presión por fricción, analizar la contaminación del fluido de perforación y determinar los cambios de presión en el interior del pozo, durante un viaje. Como podemos observar en la figura 3 el fluido de perforación tiende a formar una curvatura de forma cóncava, si lo miramos desde dentro del fluido, debido a la naturaleza del mismo. Esta configuración aplanada en el perfil de velocidad optimiza la eficacia de barrido del fluido para desplazar a otro fluido y también aumenta la capacidad que un fluido tiene para transportar partículas más grandes.



*Figura 3.* Perfil de velocidad de un fluido no newtoniano (laminar)

La figura 4 nos permite observar el comportamiento de un fluido no newtoniano a diferentes esfuerzos y velocidades de corte. Este comportamiento nos permite deducir que la viscosidad no es constante en ningún punto, sino diferente a cada velocidad de corte.

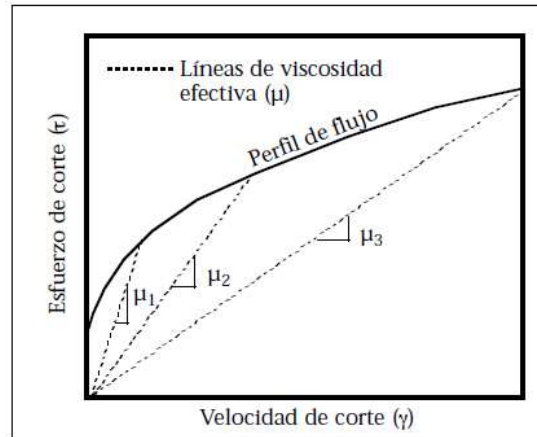


Figura 4. Efecto de la velocidad de corte sobre la viscosidad efectiva de un fluido no newtoniano.

Para describir la viscosidad de un fluido no newtoniano a una velocidad de corte en particular, se usa una “viscosidad efectiva”. La viscosidad efectiva se define como la relación (pendiente) de esfuerzo de corte a velocidad de corte, a una velocidad de corte determinada, y se ilustra como la pendiente de una línea trazada desde la curva de esfuerzo de corte (a la velocidad de corte considerada) hasta el punto de origen. Como se indica, la mayoría de los fluidos no newtonianos demuestran un comportamiento de “disminución de la viscosidad con el esfuerzo de corte”, de manera que la viscosidad efectiva disminuye cuando la velocidad de corte aumenta.

Como se muestra en la figura 5, cuando se traza la viscosidad efectiva junto a la curva de esfuerzo de corte velocidad de corte, es fácil observar la naturaleza de disminución de la viscosidad con el esfuerzo de corte que exhiben la mayoría de los fluidos de perforación.

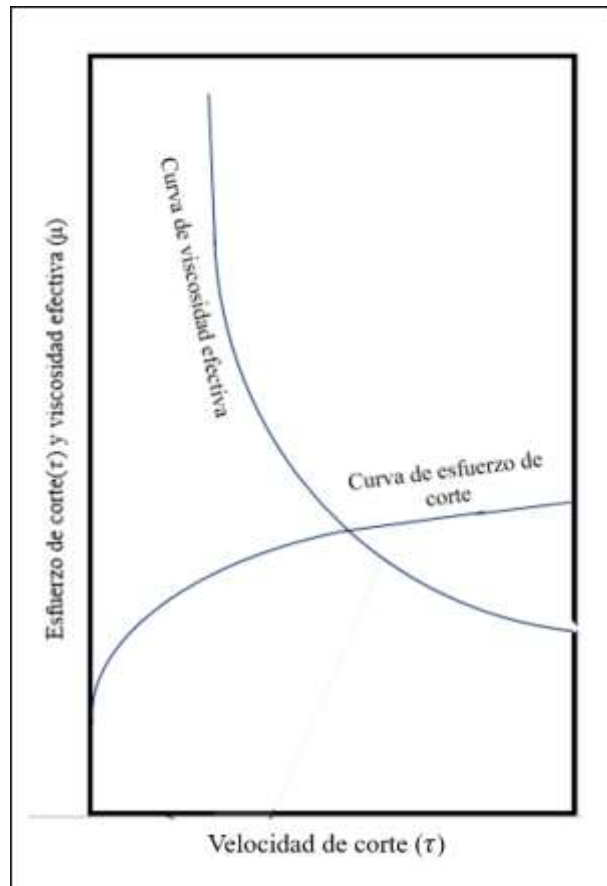


Figura 5. Efecto de disminución de la viscosidad con el esfuerzo de corte en los fluidos no newtonianos.

La disminución de la viscosidad con el esfuerzo de corte tiene implicaciones muy importantes para los fluidos de perforación, pues a altas velocidades la viscosidad disminuye progresivamente hasta alcanzar valores bajos de viscosidad. Esto reduce la presión de circulación y las pérdidas de presión, además a velocidades de corte más bajas dentro del espacio anular, el lodo tiene una viscosidad más alta que facilita la limpieza del pozo y a una velocidad ultra baja, la viscosidad del lodo alcanza su más alto nivel, y cuando el lodo no está circulando, este desarrolla esfuerzos de gel que contribuyen con la suspensión de los materiales densificantes y de los recortes (IAP, 2014).

**1.4.1 Etapas de flujo.** El fluido de perforación está sometido a una variedad de configuraciones del flujo durante el proceso de perforación de un pozo. Estas configuraciones del flujo se pueden definir en seis etapas, como lo muestra la figura 6:

En la primera etapa no existe flujo, pues debido a sus características reológicas este resiste a fluir, por lo que se hace necesario aplicar una cantidad de energía determinada para que inicie el movimiento, seguido de la aplicación de una presión inicial el flujo comienza con forma de tapón, a medida que aumenta el caudal se comienza a reducir el tapón en el centro del fluido, llegamos a la transición de flujo tapón a flujo laminar, en la siguiente etapa eventualmente hará la transición completa de flujo tapón a flujo laminar, existe entonces un flujo ordenado completo, a medida que aumenta el caudal el flujo comienza a descomponerse iniciando la transición de flujo laminar a flujo turbulento y la etapa final es la completa descomposición del flujo ordenado dando paso a un flujo turbulento en su totalidad.

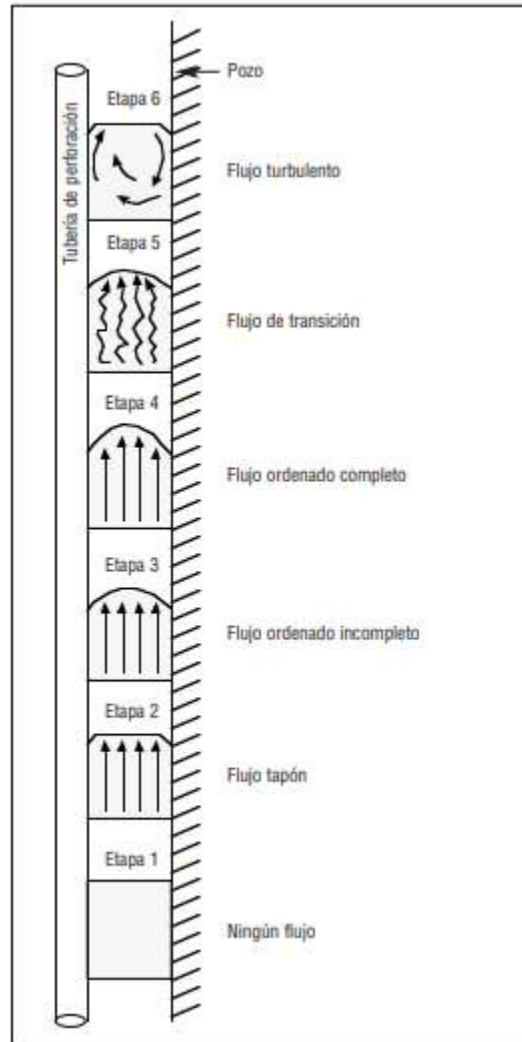


Figura 6. Etapas de flujo

### 1.5 Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) en la industria petrolera

La Dinámica Computacional de Fluidos, CFD por sus siglas en inglés (Computational Fluid Dynamics) 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 tabla 1 presenta algunas aplicaciones de CFD en la Industria del Petróleo y Gas.

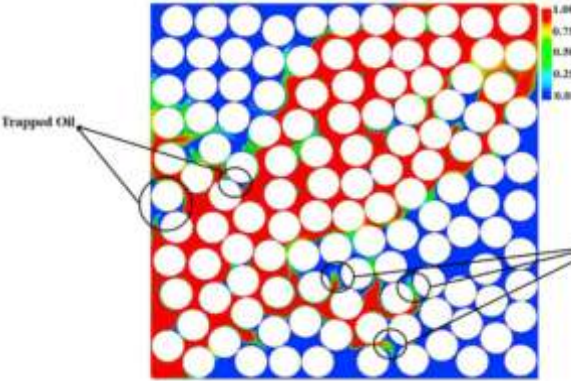
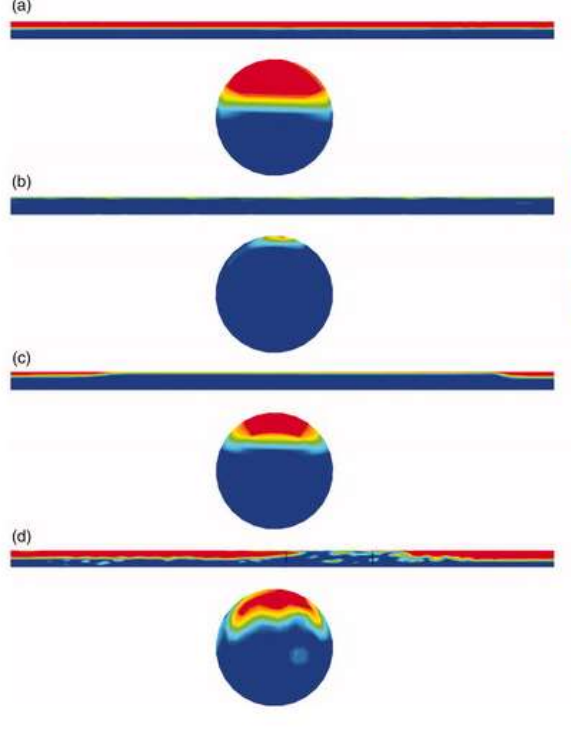


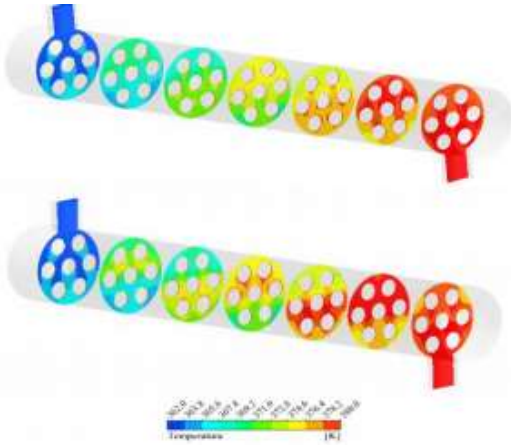
Figura 7. Análisis del flujo de un fluido de perforación en una broca tricónica y PDC..

Tabla 1.

Aplicaciones de CFD en la industria del petróleo y gas

| Aplicación                              | Descripción   | Ilustración |
|---|---|-------------|
| ESP convencional para altas velocidades | El estudio actual evalúa el rendimiento de la etapa de bombeo estándar a altas velocidades de rotación utilizando el método de dinámica de fluidos computacional (CFD). El rendimiento hidráulico y el empuje axial se caracterizan |             |

| Aplicación  | Descripción   | Ilustración   |
|---|---|---|
| <p>Modelado y validación de CFD para flujo de aire-aire de dos fases de viscosidad media en tuberías horizontales</p> | <p>como una función de la velocidad de rotación.</p> <p>Este estudio presenta los resultados de una simulación de dinámica de fluidos computacional (CFD) del flujo de aceite-aire de viscosidad media en dos fases en una tubería horizontal de 50,8 mm de diámetro interno.</p> |   |
| <p>Recuperación mejorada de petróleo extra pesado utilizando nanopartículas metálicas</p>                             | <p>El estudio actual utilizó una nueva técnica de CFD para simular las nanopartículas metálicas / inyección de vapor en un micromodelo 2D .</p>   |  |

| Aplicación  | Descripción  | Ilustración  |
|---|--|--|
| Análisis de intercambiadores de calor de coraza y tubos | En este estudio térmico se utilizaron dos intercambiadores de coraza y tubos con inclinaciones de deflectores de 0° y 20° con respecto a la sección transversal, el agua fluía por los tubos y un hidrocarburo liviano, de gran importancia en refinería, por la coraza. |  |

Nota. Adaptado de: (Gharibshahi, Jafari, & Ahmadi, 2019; Pinilla et al., 2019)

## 2. Modelo Matemático

Con el fin de estudiar la interacción del fluido de perforación a través de la broca y entre el espacio anular es necesaria la implementación de técnicas de Dinámica computacional de fluidos. El cual sirve para describir el comportamiento fluido-dinámico de la sustancia generada a partir de propiedades ya conocidas del fluido de perforación y por medio de ecuaciones diferenciales parciales de gran complejidad, que son resueltas por medio del método de volúmenes finitos, 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 conservación

**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:

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

Donde  $S_m$  es la masa añadida a la fase continua de la fase dispersa.

### 2.1.2 Ecuación de conservación de cantidad de momento

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

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

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  $\mu$  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. Además, 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 conservación. 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 esta aproximación, 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 la turbulencia.

Estos modelos se dividen en dos grupos *Reynolds Average Navier – Stokes* (RANS) y *Large Eddy Simulation*, (LES); adicionalmente pueden ser clasificados por el número de ecuaciones que utilizan. El modelo de turbulencia implementado en las simulaciones del presente trabajo es el *standard  $k - \epsilon$  model*, el cual funciona resolviendo un modelo de dos ecuaciones de transporte que determina una longitud turbulenta para una escala de tiempo. Este modelo se ha convertido en el más usado a nivel ingenieril para el cálculo flujos desde que fue propuesto por *Launder y spalding* (Szablewski, 1973)

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) =$$

$$\left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (8)$$

Donde,

$$C_1 = \max \left[ 0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (9)$$

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 boyanza,  $Y_M$  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,  $\sigma_k$  y  $\sigma_\varepsilon$  son los números de turbulencia Prandtl para  $k$  y  $\varepsilon$ , respectivamente,  $S_k$  y  $S_\varepsilon$  son términos definidos por el usuario (Shih, 1994).

### 2.3 Tratamiento mejorado de pared

Antes de entrar a definir lo que es el tratamiento mejorado de pared, vamos a exponer la razón de porqué es importante la implementación de un modelo numérico para predecir de manera correcta el flujo cercano a esta. Los flujos turbulentos se ven significativamente afectados por la presencia de paredes o muros. Claramente, el campo de la velocidad media es afectado por la condición de no-deslizamiento que tiene que ser satisfecha en la pared. De cualquier forma, la turbulencia cambia por la presencia del muro o pared. Muy cerca a la pared, la amortiguación viscosa reduce las fluctuaciones de la velocidad tangencial, mientras que el bloqueo cinemático reduce las

fluctuaciones normales. A lo largo de la parte externa de la región cercana a la pared, la turbulencia aumenta rápidamente por la producción de energía cinética turbulenta debido a los grandes gradientes de velocidad media. El modelamiento cercano a la pared impacta significativamente la fidelidad de las soluciones numéricas, en tanto como las paredes son la fuente principal de vorticidad y turbulencia. Por lo tanto, una representación precisa del flujo en la región cercana a la pared determina exitosamente la predicción de flujos turbulentos.

El tratamiento mejorado de pared, entonces, es un método de modelamiento cercano a la pared para la ecuación  $\varepsilon$  ( $EWT - \varepsilon$ ), como se observa en la figura 8, que combina el desarrollo de un modelo de doble capa. 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. (H. Werner & H. Wengle, 1991)

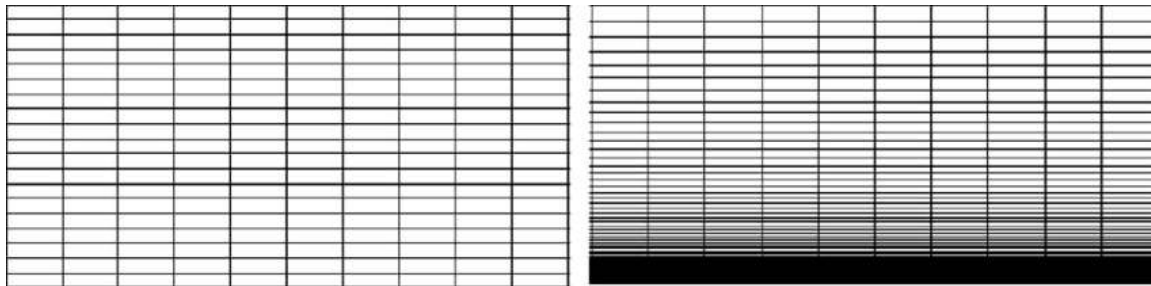


Figura 8. Modelo Standard k-Epsilon vs Modelo Standard k-Epsilon con EWT

**2.3.1 Modelamiento de doble capa para el tratamiento mejorado de pared.** En el modelo de pared cercana, 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  $\varepsilon$  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 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  $\varphi$ , escrita en forma integral para un volumen de control arbitrario  $V$ , mostrada a continuación:

$$\int_V \frac{\partial \rho \varphi}{\partial t} dV + \oint \rho \varphi \vec{V} \cdot d\vec{A} = \oint \Gamma_\varphi \nabla \varphi \cdot d\vec{A} + \int_V S_\varphi dV \quad (10)$$

**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  $\varphi_f$  se establece igual al valor del centro de la celda  $\varphi$  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  $\varphi_f$  se calcula utilizando la siguiente expresión:

$$\varphi_{f,SOV} = \varphi + \nabla \varphi \cdot \vec{r} \quad (11)$$

Donde  $\varphi_f$  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 (T. J. Barth & D. Jespersen, 1989).

### 3. Metodología

En el presente capítulo se observa la metodología aplicada para realizar la simulación numérica de la hidráulica de una perforación con broca PDC de seis aletas y seis jets, como se observa en la figura 9. En la primera etapa se identifica el problema, sobre el cual se define el dominio y alcance de trabajo de la simulación. Luego, se procede a construir la geometría utilizando una herramienta de diseño asistido por computadora (CAD), a continuación se genera una malla, la cual permite discretizar el espacio físico que el fluido atravesará. Finalmente, se construyen los modelos matemáticos computacionales del simulador y la selección de modelos físicos que reproducen los fenómenos físicos que envuelve, en este caso, la interacción del fluido de perforación con la broca; este conjunto de acciones se conoce como la etapa de “pre-procesamiento”.

La segunda etapa consiste en la resolución de los modelos físicos establecidos (*solver*), sobre el espacio físico delimitado (*geometría*), a través de la solución de modelos matemáticos sobre cada nodo construido (*malla*) del simulador computacional, el cual en base a los datos previamente ingresados (entrada y salida del fluido, velocidad inicial, condiciones reológicas del fluido, entre otros) resuelve modelos.

En la tercera etapa se observa y analizan los resultados obtenidos de dicha solución del sistema para poder validar con certeza el conjunto de acciones previamente realizadas, y de esta forma finalmente proceder a realizar las dos respectivas simulaciones, la primera con una broca PDC sin modificar, y la segunda con una broca PDC con sus jets modificados para finalizar con la comparación de los resultados.

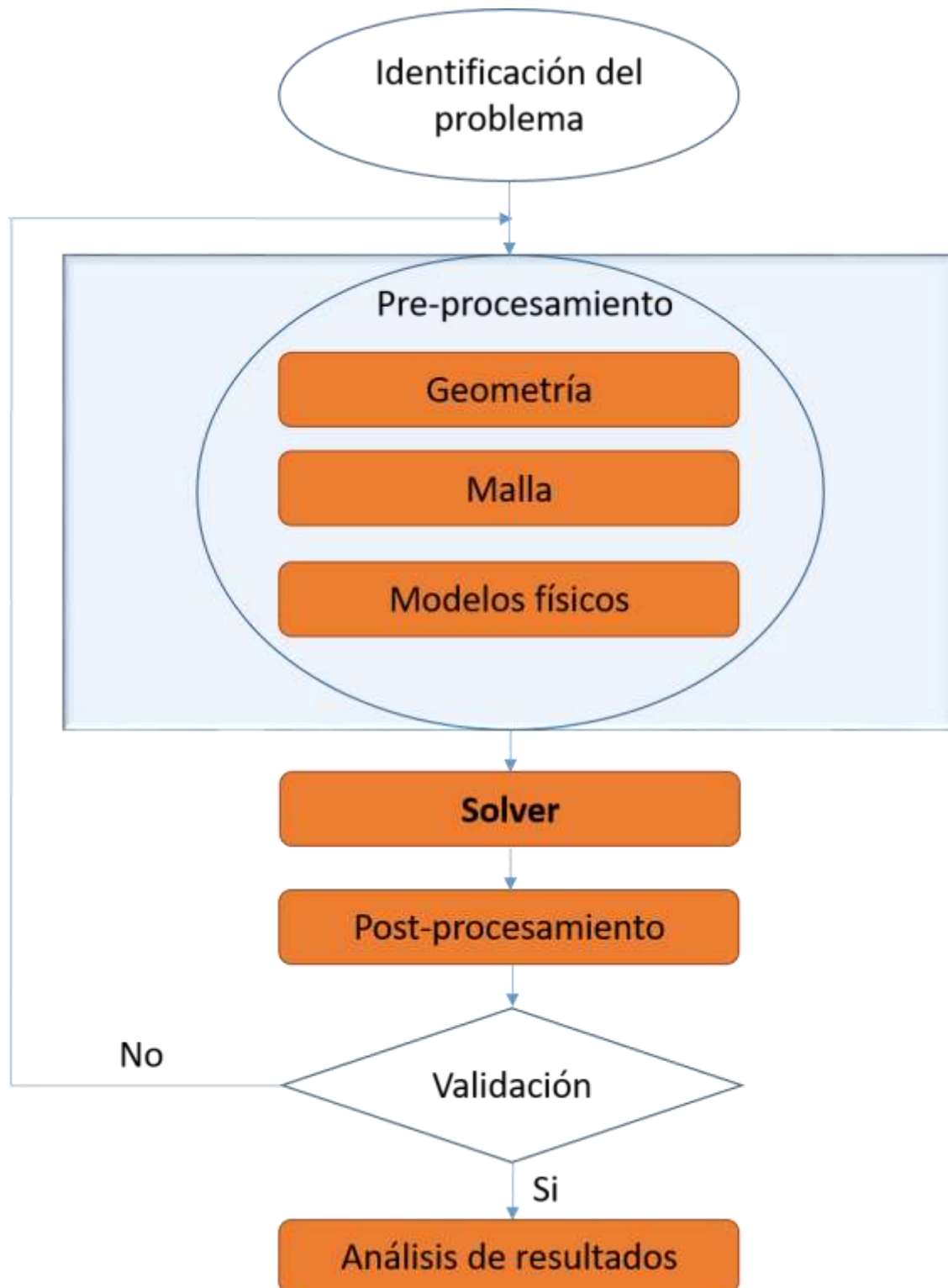


Figura 9. Metodología

### 3.1 Identificación del problema

En la actualidad, para las actividades de perforación en Colombia se realiza en su gran mayoría bajo la técnica de sobrebalance (OBD) por ser la más desarrollada y confiable, a pesar de sus ya conocidas ventajas esta técnica trae consigo una serie de problemas e inconvenientes que llegan, finalmente, a generar perjuicios en el periodo de producción. En el presente trabajo se propone realizar una modificación a los jets de la broca que permita cambiar la hidráulica de la misma y consecuentemente posibilite una serie de ventajas al momento de la perforación, sin alterar el fluido de circulación, ni la estructura, nada en absoluto a diferencia de un ligero cambio de ángulo de los jets. La validación del modelo se realizará comparando los resultados en el post-procesamiento con datos de una perforación real de un pozo en Colombia.

Pero antes se describirá el escenario de perforación sobre el cual se va a trabajar: el yacimiento en el que se va a desarrollar el pozo está ubicado en la cuenca de los llanos orientales el objetivo principal estará a una profundidad de 9418 ft (TVD) y una profundidad final de 9886 ft alrededor de las formaciones del cretácico (Fm Chipaque) y Terciario (T2), la unidad de reservorio es la K1 inferior con Areniscas de grano fino a grueso con intercalaciones de lodolitas, la roca generadora es la formación Gachetá – Chipaque (Cretácico superior), con una trampa de tipo estructural, anticlinal asociado al bloque alto de una falla de inversión. La profundidad la cual se va a realizar la simulación será a una profundidad de 7873 ft (TVD), correspondiente a una Lutita donde predomina la arcillolita. Esta unidad tiene una presión de poro mínima de 9.5 y máxima de 10.9 (ppg). Se ha realizado correlacionamiento de pozos y en base a estos se han definido la hidráulica y la reología del lodo para dicha unidad de la siguiente forma:

| Hydraulics               |             | Bit Information         |             |      |
|--------------------------|-------------|-------------------------|-------------|------|
| Calc. Pump Pressure      | 2682        | Size (in)/ Type:        | 10,0 / TK59 |      |
| Bit Loss (psi/%)         | 448,1/16,7  | Nozzles                 | Number      | Size |
| DS Loss (psi/%)          | 1365/50,9   |                         | 6           | 18   |
| Ann Loss (psi/%)         | 82,9/3,9    |                         |             |      |
| Bit HSI                  | 1,90        | TFA (in <sup>2</sup> ): | 1,2425      |      |
| ECD Shoe (lb/gal)        | 12,3        | Jet vel (ft/s):         | 127         |      |
| ECD TD (lb/gal)          | 12,4        | HHP @ Bit               | 237,01      |      |
| Va DP-OH/DP-Csg (ft/min) | 161,7/161,6 | Bit Depth (ft)          | 7873        |      |
| CVa DP-OH (ft/min)       | 368,9       | Top - Formation:        | T1          |      |
| Va DC-OH/DC-Csg (ft/min) | 178,3/      |                         |             |      |
| CVa DC-OH (ft/min)       | 377,9       |                         |             |      |
| Qc - DP (gal/min)        | 1938,7      |                         |             |      |
| Qc - DC (gal/min)        | 1801,1      |                         |             |      |

| Properties                        |                        |                  | Mud Type: Q MAX ACF |           |           |
|-----------------------------------|------------------------|------------------|---------------------|-----------|-----------|
| Sample From                       |                        | Program          | PIT                 | PIT       | PIT       |
| Time Taken                        |                        |                  | 06:00               | 14:00     | 23:00     |
| FlowLine Temp                     | *F                     |                  | 140                 | 144       | 149       |
| Mud Weight                        | lb/gal                 | 11 - 12,2        | 12,1                | 12,2      | 12,2      |
| Funnel Viscosity                  |                        | 45 - 60          | 58                  | 55        | 58        |
| Rheology Temp                     | *F                     |                  | 120                 | 120       | 120       |
| Plastic Viscosity                 | cps                    | -                | 25                  | 25        | 25        |
| Yield Point                       | lbf/100ft <sup>2</sup> | 19 - 30          | 28                  | 27        | 28        |
| LSYP                              |                        | -                | 11                  | 11        | 11        |
| Gel 10 Sec/Gel 10 Min/Gel 30 Min  |                        | 7/10/13-13/20/30 | 11/18/26            | 13/19/26  | 12/22/29  |
| R600/R300                         |                        |                  | 78/53               | 77/52     | 78/53     |
| R200/R100                         |                        |                  | 43/30               | 42/32     | 42/32     |
| R6/R3                             |                        | -                | 13/12               | 13/12     | 13/12     |
| pH                                |                        | 9 - 10,2         | 9,5                 | 9,8       | 9,6       |
| Alkal Mud (Pm)                    |                        |                  | 0,9                 | 0,7       | 0,65      |
| Pf/Mf                             |                        |                  | 0,3/1,2             | 0,2/1,3   | 0,18/1,2  |
| API Filtrate/API Cake Thickness   | ml/32in                | 8 - 5            | 5/1                 | 4,6/1     | 4,8/1     |
| HTHP filtrate/HTHP cake thickness | ml/32in                | -                | /                   | /         | 15,8/1    |
| Water/Oil                         | % Vol/% Vol            |                  | 83,2/1              | 83/1      | 83/1      |
| Total Solids                      |                        | 0 - 16           | 15,8                | 16        | 16        |
| Avg Solids Density                |                        |                  | 3,9                 | 3,9       | 3,9       |
| LGS/LGS Mass                      | % Vol/lb/bbl           |                  | 3,6/34,5            | 3,3/31    | 3,3/30,9  |
| Wt. Matl/Wt Matl Mass             | % Vol/lb/bbl           |                  | 12,13/178,6         | 12,71/187 | 12,71/187 |
| Sand Content                      | % Vol                  | -                | 0,25                | 0,25      | 0,25      |
| MBT                               | lb/bbl                 | 0 - 22,5         | 18,2                | 20        | 20        |
| Chlorides                         | mg/L                   | -                | 1100                | 1150      | 1200      |
| Calcium                           | mg/L                   | -                | 140                 | 160       | 150       |

Figura 10. Información de la broca, condiciones hidráulicas y reología del lodo.

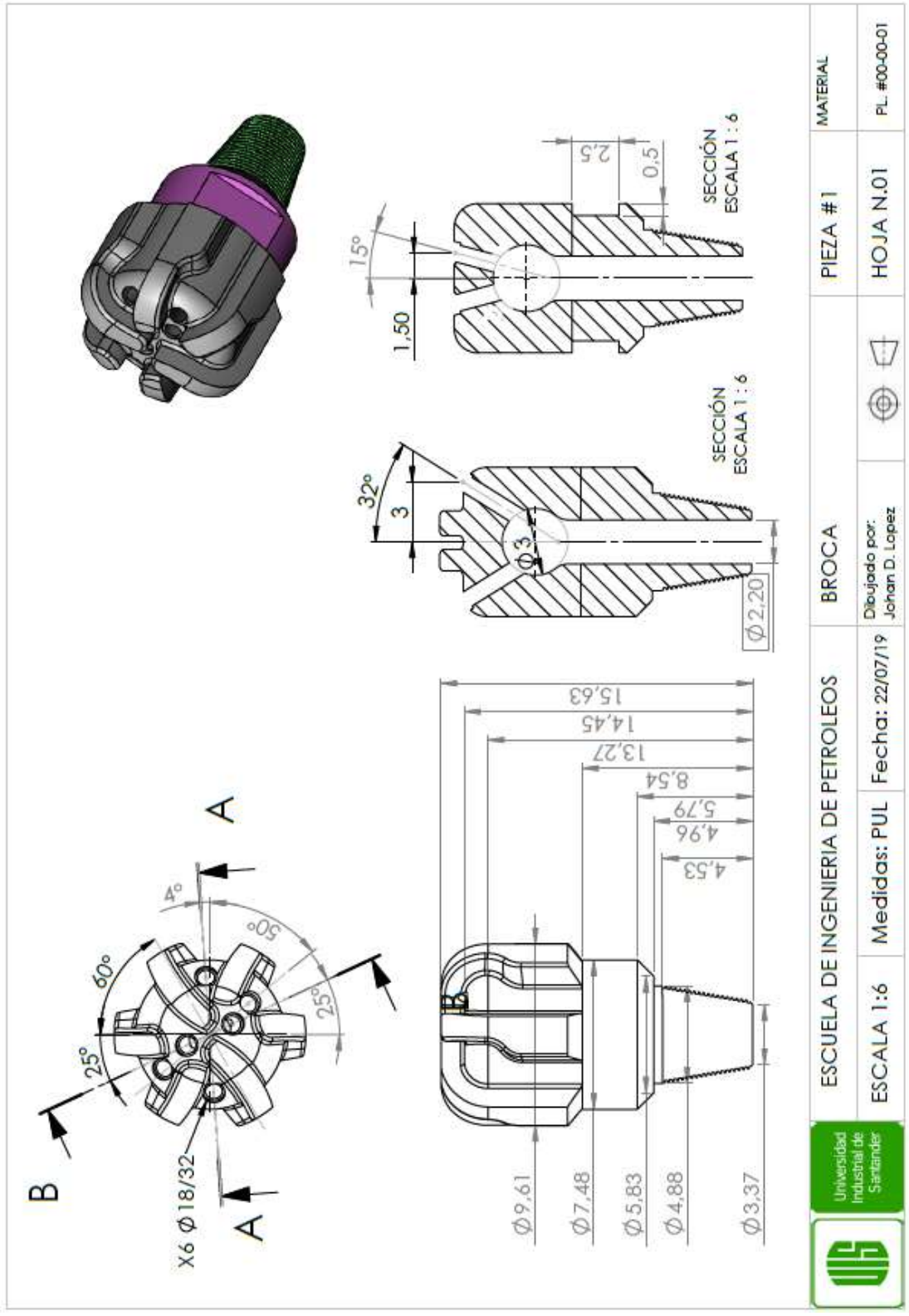
Basado en la información obtenida y mostrada en la figura 10 se han definido las condiciones hidráulicas y las características reológicas del lodo.

### 3.2 Pre-Procesamiento

La primera etapa para la realización de la simulación, consiste en la construcción del dominio físico en donde se evaluarán posteriormente los fenómenos hidráulicos de una perforación convencional, seguido de la discretización de este espacio físico por medio de la construcción de una malla, un paso muy importante que determinará la fidelidad de la simulación. También se definirán los modelos físicos que representen apropiadamente los fenómenos físicos reales de la hidráulica de una perforación convencional, se define la zona de entrada y salida del fluido, además de sus propiedades y las condiciones de frontera del espacio físico.

**3.2.1 Geometría.** Antes de realizar la construcción de la geometría en tres dimensiones, se debió determinar qué tamaño de broca debería usarse para validar el modelo, se tomó la decisión de construir una broca de 10 in debido a que era la broca usada en la información otorgada por Ecopetrol, la cual es una broca de 10 in /TK59 con seis jets.

En la figura 11 podemos observar el diseño original de la geometría medido en pulgadas, seguido de la figura 12, la cual muestra al detalle la modificación realizada. Paso siguiente se exportó a la herramienta de diseño *DesignModeler* para continuar con la representación del espacio físico de una perforación convencional en la zona de la broca luciendo finalmente como se observa en la figura 13.



|   |  |  |  |  |  |   |  |                           |  |
|---|--|--|--|--|--|---|--|---------------------------|--|
|  |  | ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEOS<br>ESCALA 1:6 |  | BROCA<br>Dibujado por:<br>Johan D. Lopez |  | PIEZA #1<br>HOJA N.01   |  | MATERIAL<br>PL. #00-00-01 |  |
|   |  | Fecha: 22/07/19                                  |  | Medidas: PUL                             |  |  |  |                           |  |

Figura 11. Plano Geometría Base

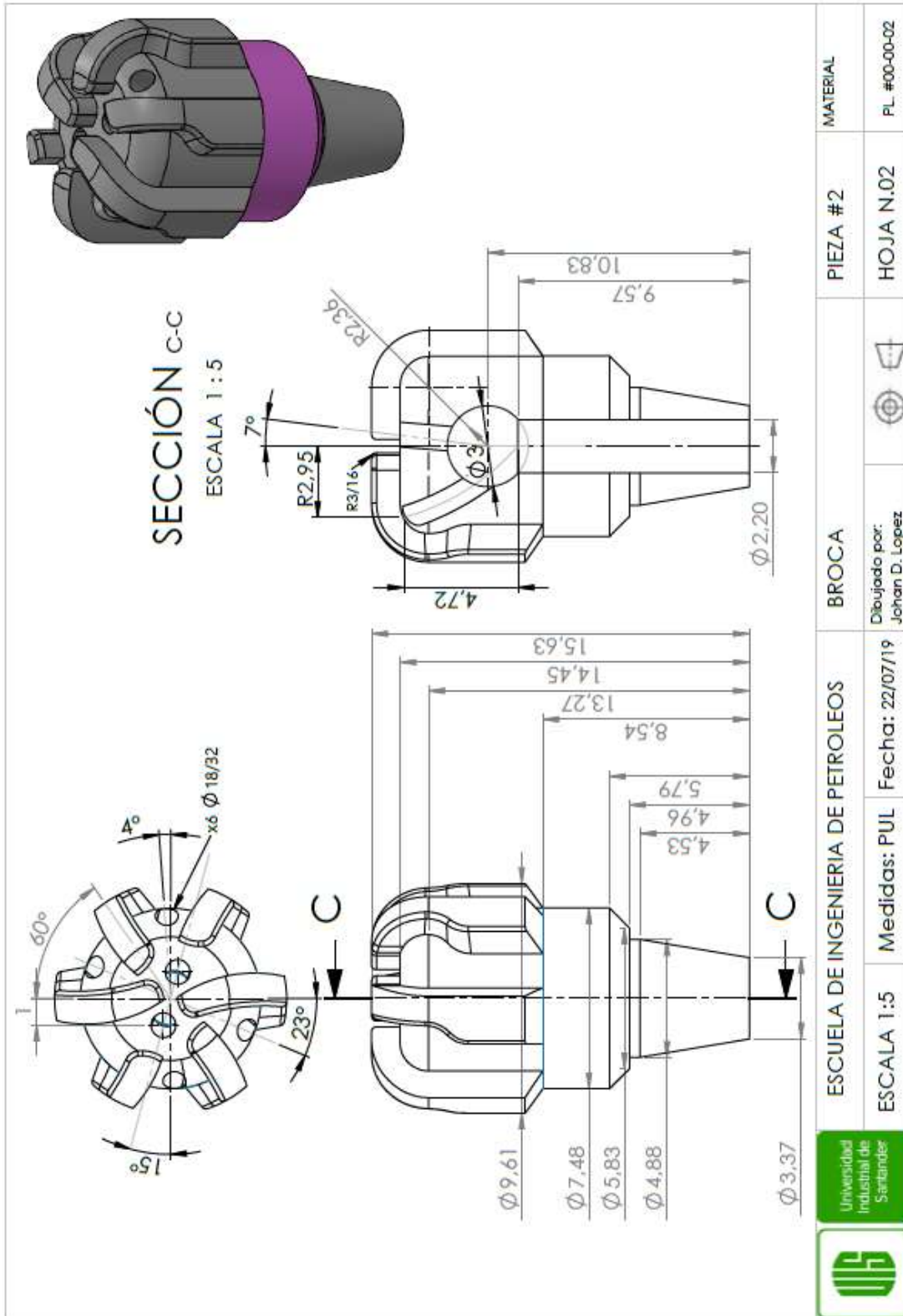
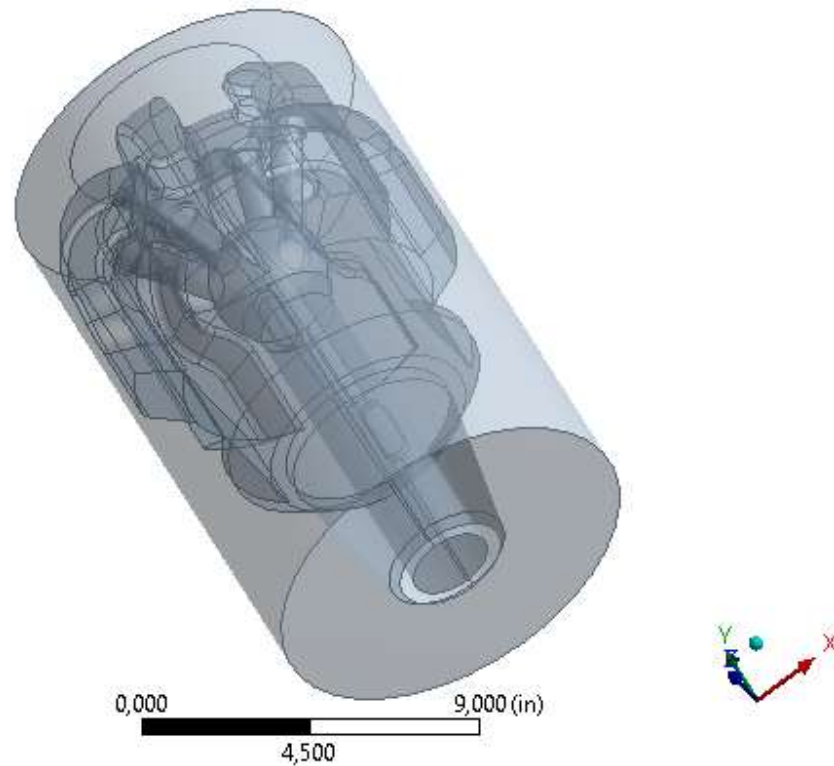


Figura 12. Plano geometría modificada



*Figura 13.* Geometría base

Se realizó la construcción y diseño de una Geometría (**Figura 14**) correspondiente al mismo espacio físico con una variación en los jets, el cual, según planteamientos de El Neiri, Dahab, & Abdulaziz, (2016), quienes querían lograr un cambio en la hidráulica de la broca, favoreciendo y optimizando algunos aspectos de la perforación. Esta segunda modificación sobre los jets de la broca no tiene base estructural de diseño que pueda respaldarse debido a que las empresas se guardan con ahínco esta información, sin embargo, el diseño presentado se obtuvo de una deducción a partir de modelos de flujo ya conocidos.

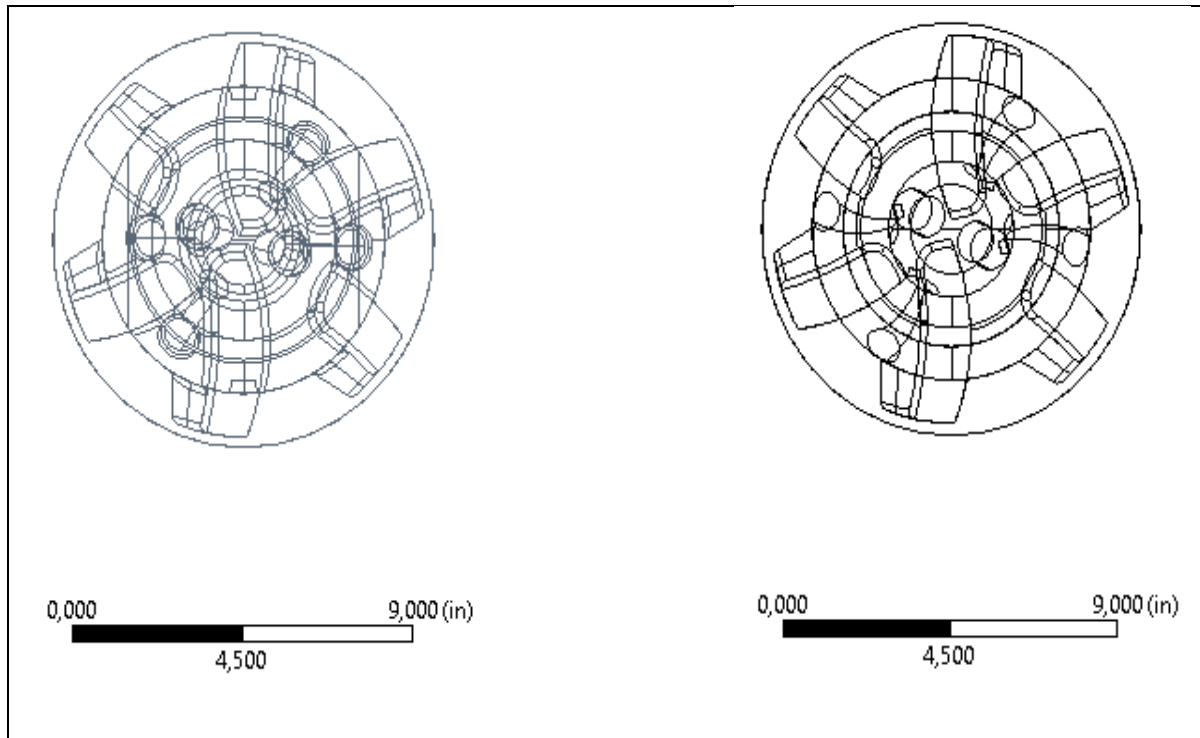


Figura 14. Vista superior de la broca base y broca modificada, previsualizando la modificación de cuatro de seis jets.

**3.2.2 Malla.** Para este caso en particular lo primero que debe hacerse es marcar en la ventana *defaults* y seleccionar para preferencias físicas “CFD”, de esta forma configurará el *solver* para solucionar alrededor de fluidos, para el ensamble de mallado se escogió el método de tetraedros pues este se acomoda mejor a espacios cerrados con curvatura pronunciada, para la ventana de *Quality* se seleccionó un suavizamiento de malla medio, para la función de crecimiento de celdas (*Sizing*) se escogió por proximidad y curvatura debido a la compleja geometría y finalmente se le aplicó una relevancia de 20 (escala de -100 a 100), que indica el nivel de refinamiento general de la malla, donde el menor valor indica alta velocidad de mallado y el mayor valor indica alta exactitud de mallado. En la figura 15 se muestra la configuración para la generación de la malla.

Lo nombrado anteriormente fueron los resultados de un test de independencia de malla, del cual profundizaremos en el siguiente capítulo, usado para encontrar una malla apta que discretice de

forma correcta el espacio físico en el que se realizará la simulación, esto se hace con la finalidad de encontrar el número de elementos y nodos mínimos necesarios para lograr una convergencia correcta de la simulación.

Para la malla de la segunda geometría se realizó exactamente el mismo proceso de construcción. En las siguientes ilustraciones (figura 16, figura ) se observan los resultados.

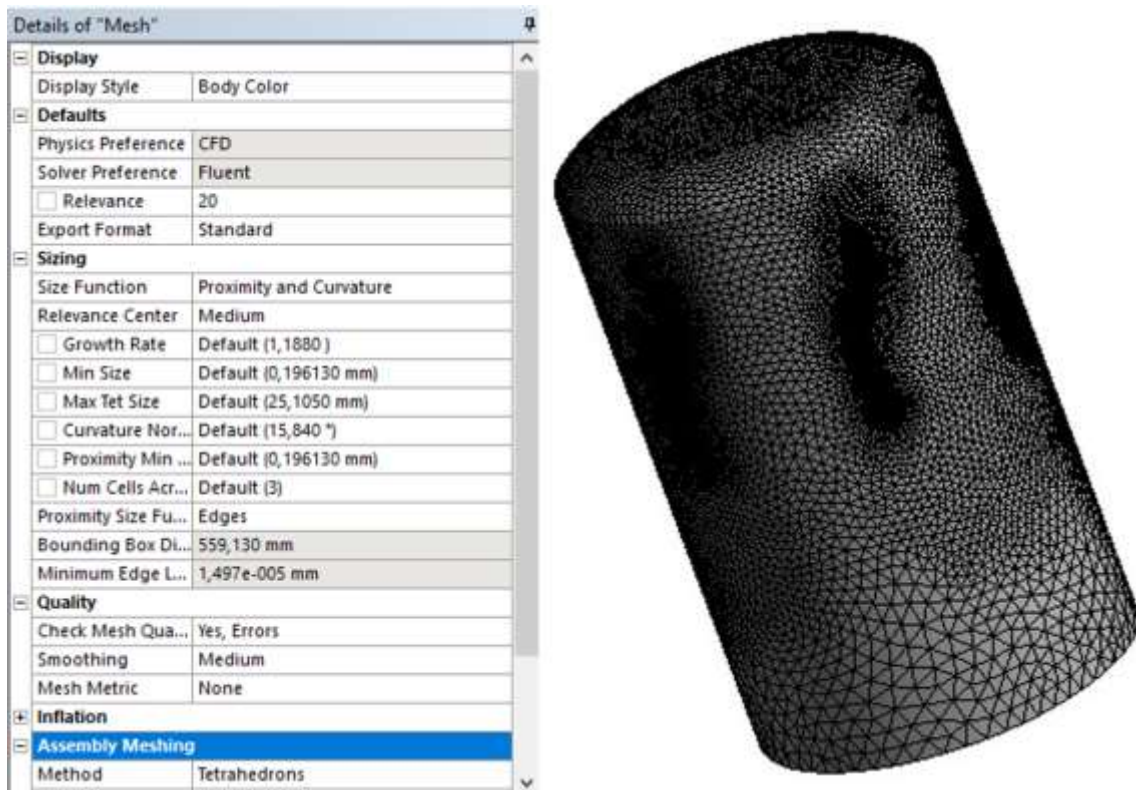


Figura 15. Configuración de malla

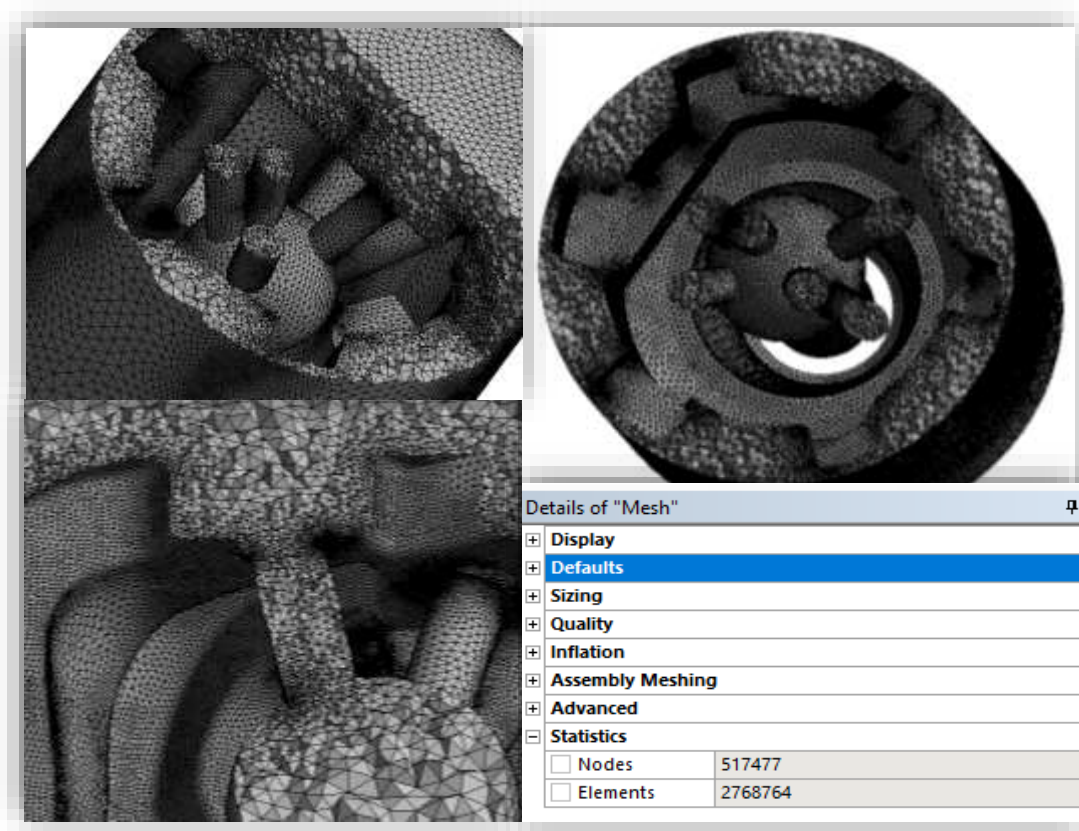


Figura 16. Malla final broca base

**3.2.3 Modelos físicos.** Ya hemos establecido el dominio físico (figura 13), y lo hemos discretizado (figura 15), ahora para poder determinar los parámetros correctos en nuestro *set-up* debemos entender los fenómenos físicos los cuales queremos analizar con la simulación, en esta investigación queremos representar un proceso de perforación sobrebalance a una profundidad de aproximadamente 7873 ft (TVD) con un fluido de circulación de 12,4 ppg para una broca PDC de 10 in con 6 jets y otra homologa con una leve modificación en sus jets; Por lo tanto, se deberá tener en cuenta la turbulencia, velocidad y presión generada por el fluido así como sus propiedades, el área de entrada y salida (*inlet – outlet*), la presión que esta ejerce sobre las paredes del pozo y la gravedad, datos como la velocidad de entrada del fluido al sistema, y las propiedades se

obtuvieron de la figura 18. Los modelos matemáticos usados para representar este comportamiento fluido-dinámico se han establecido en el capítulo anterior (2. Modelo Matemático).

| Hydraulics          |            | Properties        |        |             | Mud Type: Q MAX ACF |       |       |
|---------------------|------------|-------------------|--------|-------------|---------------------|-------|-------|
| Calc. Pump Pressure | 2871       | Sample From       |        | Program     | PIT                 | PIT   | PIT   |
| Bit Loss (psi/%)    | 478,1/16,7 | Time Taken        |        |             | 06:00               | 14:00 | 23:00 |
| DS Loss (psi/%)     | 1462/50,9  | Depth (MD)        | ft     | 1000 - 9656 | 6920                | 7396  | 7851  |
| Ann Loss (psi/%)    | 110,9/3,9  | Depth (TVD)       | ft     | -           | 6397                | 6811  | 7218  |
| Bit HSI             | 1,90       | FlowLine Temp     | °F     |             | 140                 | 144   | 149   |
| ECD Shoe (lb/gal)   | 12,3       | Mud Weight        | lb/gal | 11 - 12,2   | 12,1                | 12,2  | 12,2  |
| ECD TD (lb/gal)     | 12,4       | Funnel Viscosity  |        | 45 - 60     | 58                  | 55    | 58    |
|                     |            | Rheology Temp     | °F     |             | 120                 | 120   | 120   |
|                     |            | Plastic Viscosity | cps    | -           | 25                  | 25    | 25    |

Figura 17. Propiedades del fluido

### 3.3 Solución del sistema

En esta etapa, el software de simulación fluido-dinámica (CFD) resolverá para cada nodo de la malla los modelos matemáticos mediante el método de volúmenes finitos. Existen dos métodos numéricos de resolución para FLUENT, basado en la presión y basado en la densidad. Para este caso en particular utilizaremos el método numérico de tipo basado en presión (pressure-based), emplea un algoritmo que pertenece a una clase general de métodos llamado “*el método de proyección*”. En este método el campo de velocidad se logra resolviendo la ecuación de presión derivada de las ecuaciones de conservación de masa y momento. Esta configuración es la más apropiada para fluidos incompresibles o levemente compresibles, en estado estable con una formulación de velocidad absoluta.

### 3.4 Post-procesamiento

Para realizar la siguiente etapa de las simulaciones se emplea la herramienta de CFD- Post, la cual permite visualizar y analizar los resultados mediante la creación de planos, contornos, líneas de flujo, datos, perfiles y gráficas de las variables a estudiar, en este caso velocidad y presión. Los resultados y su respectivo análisis se presentan en el siguiente capítulo.

## 4. Análisis y comparación de resultados

En el presente capítulo se exponen los resultados de las simulaciones, el análisis de las variables y la evaluación comparativa entre las dos geometrías anteriormente presentadas. El punto de partida fue el desarrollo de un test de independencia de malla con la finalidad de encontrar la cantidad mínima necesaria de volúmenes de control para encontrar, de esta forma, una solución al sistema independientemente de la malla que se tenga, es decir, que la malla no sea una variable en los resultados obtenidos. Luego, se debió hacer la validación del modelo construido en el software con datos reales de una perforación. Seguido de la realización del segundo caso bajo los mismos parámetros modificando ligeramente los jets de la broca PDC para terminar con la evaluación y comparación de resultados con los propuestos por (El Neiri et al., 2016) en su planteamiento de una nueva técnica de perforación.

#### 4.1 Test de independencia de malla

Para realizar el test de independencia de malla se recomienda realizar un mallado automático, correr la simulación con los modelos físicos correctos y observar en “los residuales” del *solver* un nivel estable, después se tiene que extraer los resultados de una variable en una zona específica y repetir el proceso refinando la malla, obteniendo de esta forma una cantidad mayor de volúmenes de control paso a paso y, en teoría, mejorando la malla; hasta lograr mediante una representación gráfica de la variable escogida sobre la zona determinada contra las diferentes mallas obtenidas una tendencia sostenida del valor de la variable, como se observa en la figura 22.

Para este caso se decidió medir la variable de velocidad absoluta del fluido de circulación sobre una línea construida, partiendo del centro de la geometría (0,0-0,0-0,0) hasta chocar con la parte superior interna de la esfera que conecta con los jets (0,0-0,254-0,0) en dirección  $y$ , como se observa en la figura 19 y graficar los datos obtenidos contra las diferentes mallas construidas, la decisión de tomar esta línea como zona de referencia se hizo necesaria por la turbulencia que se espera obtener a partir de la salida de los jets y por consiguiente posible imprecisión debido a la imposibilidad de predecir el comportamiento turbulento más allá de dicho punto.

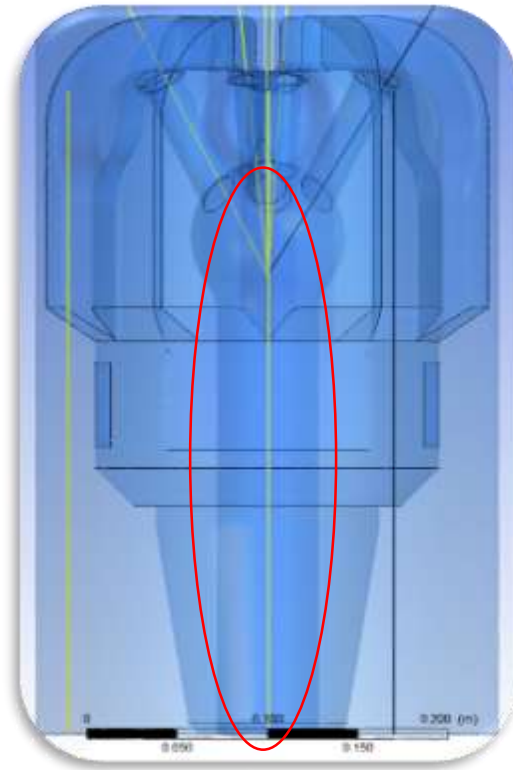


Figura 18. Línea de referencia para test de independencia de malla

La Tabla 2 muestra la cantidad de elementos reales de su respectiva malla además de los resultados obtenidos en los puntos mencionados sobre la primera fila, cabe mencionar que la línea midió 12 in y se tomaron 32 muestras, ósea un valor cada 0,375 in.

Tabla 2.

*Resultados Velocidad vs Diferentes mallas*

| Malla | # elem<br>reales | No. Dato         |        |         |         |         |        |        |
|-------|------------------|------------------|--------|---------|---------|---------|--------|--------|
|       |                  | 1                | 5      | 10      | 15      | 20      | 25     | 30     |
|       |                  | Velocidad [Ft/s] |        |         |         |         |        |        |
| 1     | 984.516          | 98,425           | 99,739 | 102,264 | 104,455 | 106,338 | 98,889 | 70,982 |
| 2     | 1.286.454        | 98,425           | 99,131 | 100,186 | 101,276 | 102,337 | 91,220 | 64,959 |
| 3     | 1.630.914        | 98,425           | 98,985 | 99,859  | 100,833 | 101,808 | 92,329 | 62,143 |

| Malla | # elem<br>reales | No. Dato |        |         |         |         |        |        |
|-------|------------------|----------|--------|---------|---------|---------|--------|--------|
|       |                  | 1        | 5      | 10      | 15      | 20      | 25     | 30     |
| 4     | 2.768.764        | 98,425   | 99,491 | 100,627 | 101,539 | 102,488 | 92,360 | 62,052 |
| 5     | 3.777.251        | 98,425   | 99,440 | 100,554 | 101,491 | 102,422 | 91,075 | 62,224 |

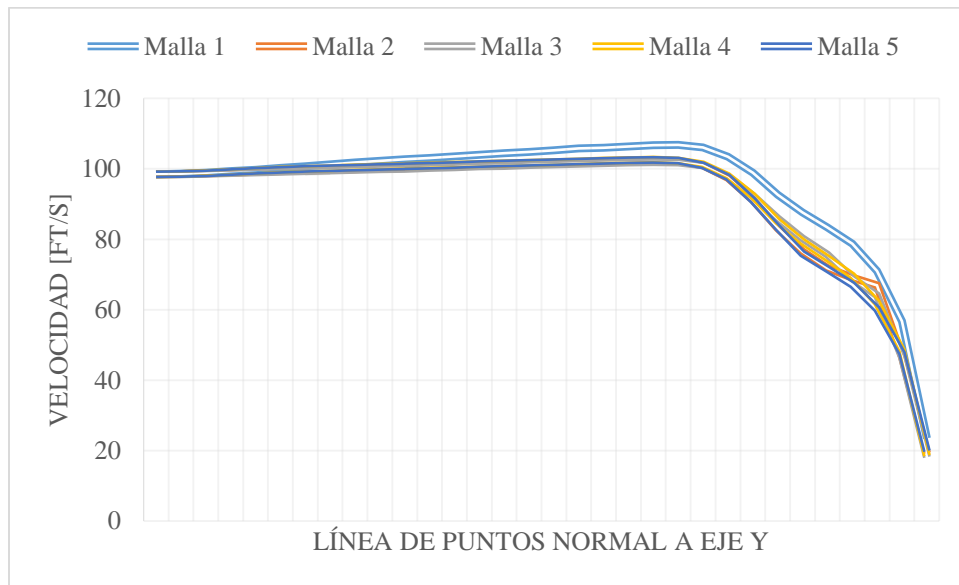


Figura 19. Velocidad para cada malla.

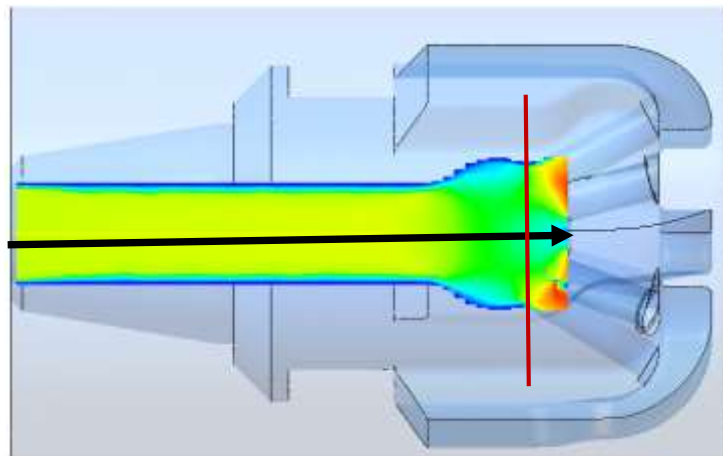
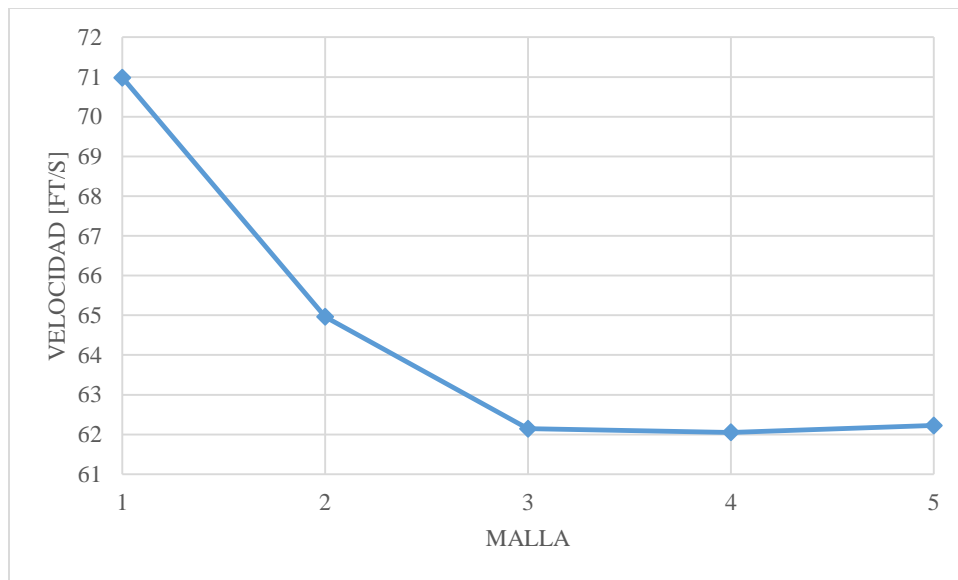


Figura 20. Representación gráfica para la toma de datos.

En las figura 20 y figura 21 se observa el comportamiento del fluido de circulación a partir de la entrada de este a cerca de 100 ft/s obteniendo un leve aumento hasta ingresar a la esfera que distribuye el fluido hacia los jets obteniendo una caída de velocidad hasta pasar por debajo de los 20 ft/s al chocar con la pared interna de la esfera, además se observa como varía la velocidad del fluido en función del refinamiento de la malla.

En la figura 22 se observa el análisis sobre la línea roja trazada en la figura 21, comparando la velocidad sobre un mismo punto para las cinco diferentes mallas construidas llegando a la conclusión que a partir de la malla #3 con **1.630.914** números de elementos reales se obtiene una estabilización del resultado.



*Figura 21.* Análisis Test de independencia de malla

Con la información obtenida de este test se pudo establecer que una malla que contenga al menos **1.630.914** elementos reales o volúmenes de control permitirá obtener resultados que no dependan del refinamiento de la malla.

## 4.2 Validación del modelo

La validación del modelo se realizó mediante la comparación de los resultados obtenidos de la simulación con los datos reales de una perforación sobrebalance partiendo de mismos valores, como se presenta en la **Tabla 3**

Tabla 3.

*Tabla de datos comparativa*

| Datos de entrada |                  |                    | Resultados     |                  |            |
|------------------|------------------|--------------------|----------------|------------------|------------|
| Parámetro        | Perforación real | Simulación         | Parámetro      | Perforación real | Simulación |
| Broca            | 10 [in]          | 10 [in]            | Jet Vel [Ft/s] | 127              | 122,87     |
| Jets             | 6                | 6                  | Bit loss [Psi] | 448,1            | 424,3      |
| Flujo total      | 1171,5 [gal/min] | 98,4252 [Ft/s]     |                |                  |            |
| Peso lodo        | ECD= 12,4 ppg    | 1318,92<br>[Kg/m3] |                |                  |            |
| $\mu$ lodo       | 25 [Cp]          | 25 [Cp]            |                |                  |            |
| Presión          | 4779 [Psi]       | 32950000 [pa]      |                |                  |            |

La construcción de la broca como ya se ha mencionado es de 10 in con seis jets de 18/32 y una TFA (in<sup>2</sup>): 1,2425, el flujo total es de 1171,5 [gal/min] y sirvió como dato para ingresar la velocidad de entrada al sistema en la simulación, el peso y viscosidad del lodo fueron los datos necesarios para crear la sustancia que fluye en el sistema y la presión anular en fondo de pozo sirvió como dato para el sistema de “presión de operación”.

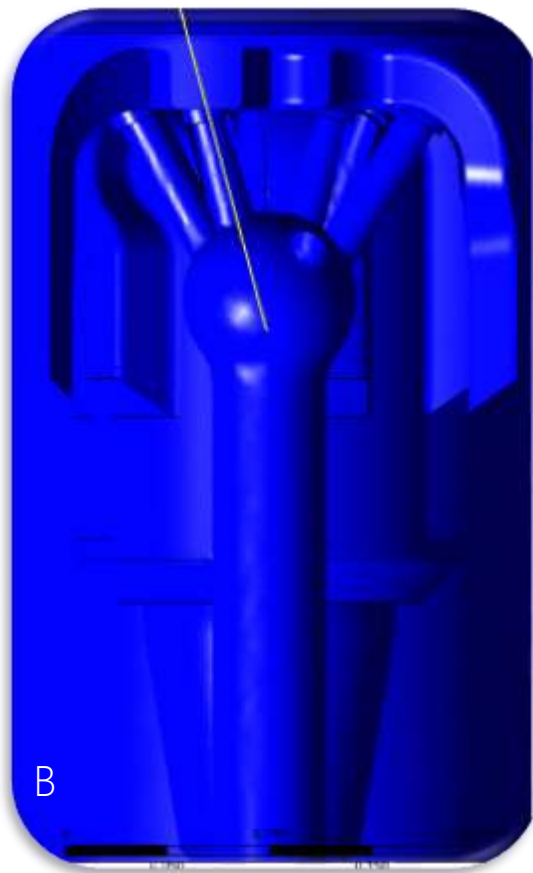
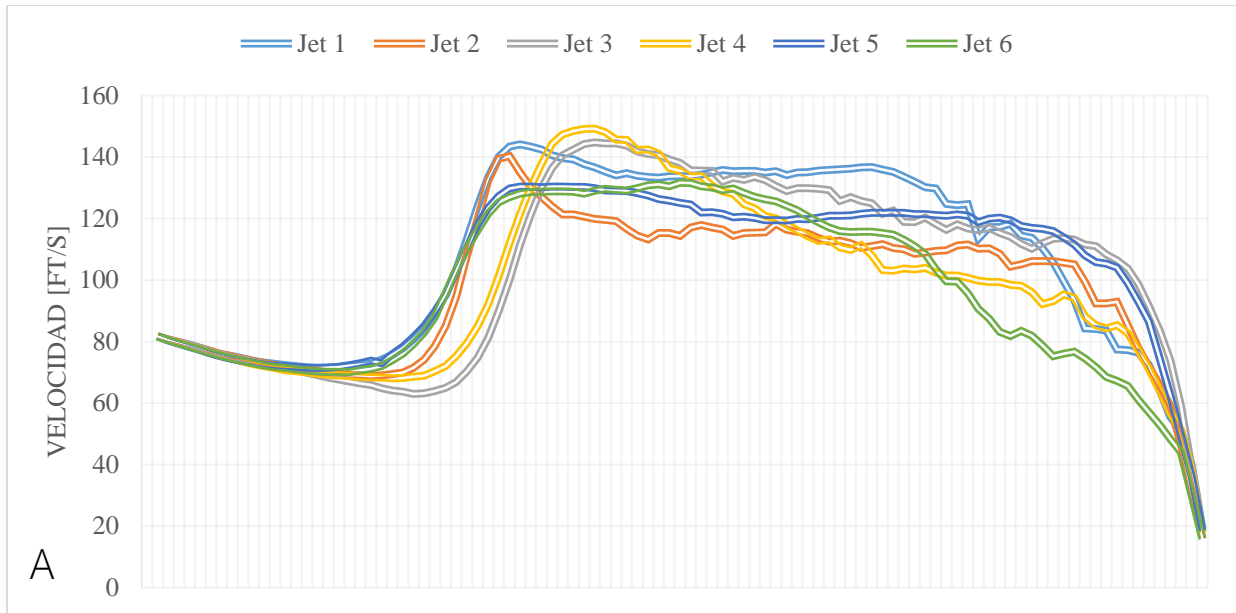


Figura 22. **A:** Velocidad del fluido a través de los jets. **B:** En amarillo, línea de referencia para la toma de datos

La extracción de datos se hizo sobre la línea amarilla que va desde el centro de la esfera hasta la pared del hueco abierto (una para cada Jet), a la cual se le tomaron 100 muestras por cada línea. Como se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** la velocidad del fluido de circulación en el centro de la esfera es de aproximadamente 81,2 ft/s y al ingresar a los jets aumenta hasta los 140 ft/s para descender sostenidamente y terminar chocándose con la formación disminuyendo hasta unos 18,4 ft/s.

La velocidad promedio de circulación a través de los Jets es de 128,2 [Ft/s] como se observa en la tabla 4.

Tabla 4.

*Velocidad Jets broca base*

| Jet                     | Color             | Dato No. |         |         |         |         |         |         | Promedio   |
|-------------------------|-------------------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|------------|
|                         |                   | 40       | 45      | 50      | 55      | 60      | 65      | 70      |            |
| <b>Velocidad [Ft/s]</b> |                   |          |         |         |         |         |         |         |            |
| 1                       | <b>Azul</b>       | 144,102  | 139,248 | 134,767 | 133,841 | 135,423 | 134,101 | 136,021 | 136,786    |
| 2                       | <b>Naranja</b>    | 135,013  | 121,386 | 116,653 | 114,367 | 114,387 | 116,322 | 112,811 | 118,705    |
| 3                       | <b>Gris</b>       | 111,590  | 142,465 | 143,671 | 138,092 | 133,219 | 128,904 | 125,674 | 131,945    |
| 4                       | <b>Amarillo</b>   | 121,535  | 148,530 | 145,617 | 135,514 | 128,015 | 118,043 | 110,631 | 129,698    |
| 5                       | <b>Azul claro</b> | 130,365  | 130,318 | 128,995 | 125,107 | 120,457 | 119,400 | 120,896 | 125,077    |
| 6                       | <b>Verde</b>      | 128,123  | 128,698 | 129,200 | 131,668 | 129,763 | 124,120 | 115,926 | 126,785    |
|                         |                   |          |         |         |         |         |         |         | 128,166104 |

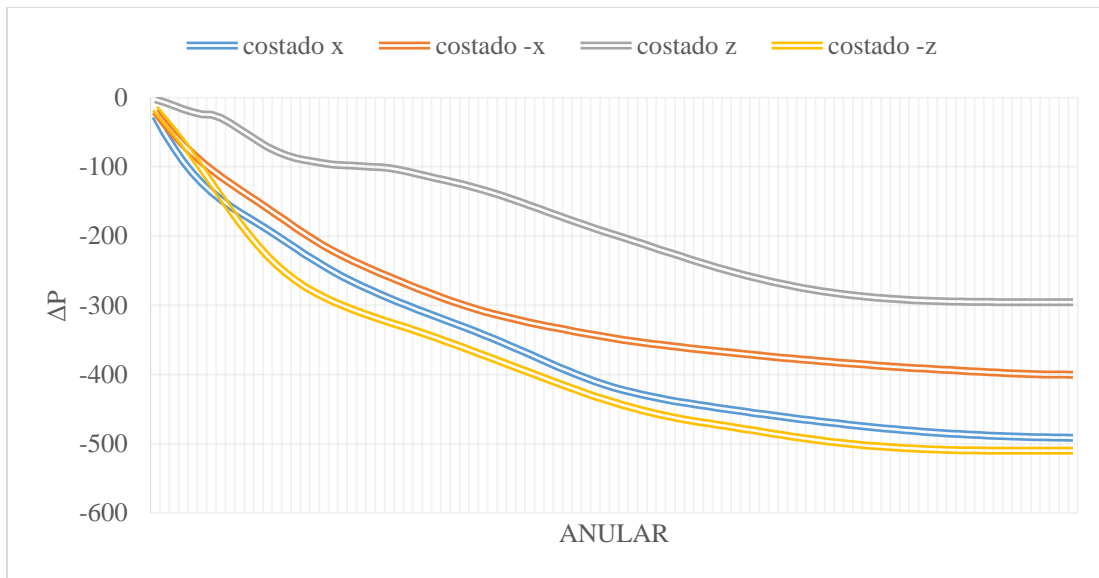


Figura 23. Caída de presión

Es válido resaltar que para el solver con configuración *pressure-based*, para la variable de presión me indica el delta, ósea la diferencia de presión que existe entre el punto medido y la entrada al sistema, por lo tanto para hallar la caída de presión total del sistema se realizaron 4 líneas paralelas a la broca en el espacio anular, se extrajeron y se realizó una sumatoria para cada línea por separado en Excel para llegar a la figura24, y finalmente se promediaron estos valores con la finalidad de validar el modelo y además de mostrar que la caída de presión varía dependiendo en la zona que lo tomes, debido principalmente a la configuración de los jets, pues se evidencia una relación entre la caída de presión y la zona en la cual se mide, como se muestra en la figura 25. La línea verde y morada se encuentra en uno de los dos costados donde no hay jet y las 4 restantes se encuentran en costados donde hay Jet.

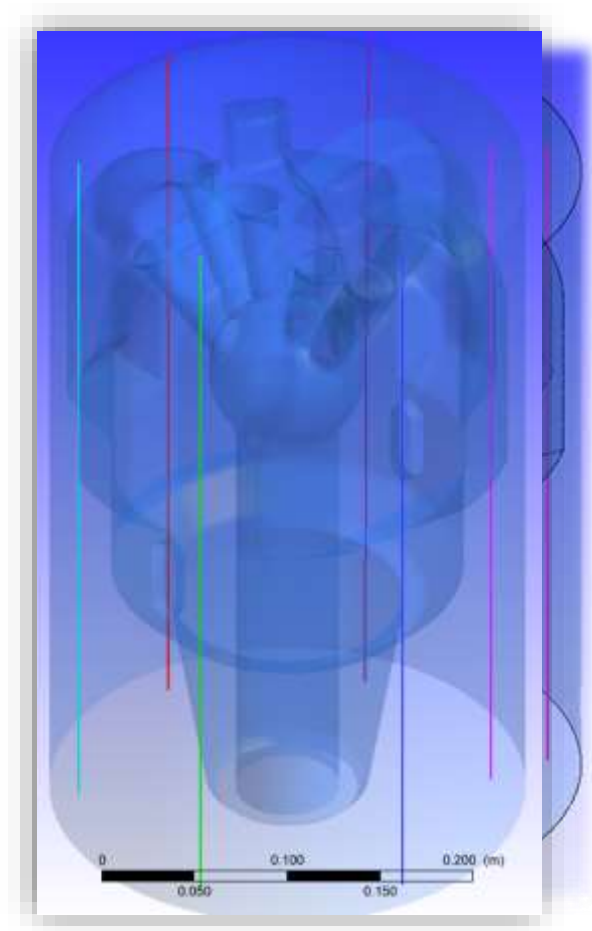


Figura 24. Líneas de referencia toma de datos

Tabla 5.

*Presión anular*

| Línea         | Color         | Dato No. |          |          |          |          |          |          |
|---------------|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|               |               | 10       | 25       | 40       | 55       | 70       | 85       | 100      |
| Presión [PSI] |               |          |          |          |          |          |          |          |
| 1             | <b>Azul</b>   | -165,622 | -284,090 | -365,086 | -434,730 | -464,529 | -484,434 | -491,345 |
| 2             | <b>Roja</b>   | -132,968 | -253,373 | -321,992 | -357,171 | -378,114 | -392,894 | -400,305 |
| 3             | <b>Verde</b>  | -45,684  | -100,466 | -151,003 | -219,995 | -274,515 | -294,110 | -295,651 |
| 4             | <b>Rosada</b> | -180,339 | -320,066 | -392,324 | -458,026 | -491,434 | -508,582 | -509,933 |
| Promedio      |               |          |          |          |          |          |          | -424,309 |

### 4.3 Comparación de modelos

A continuación se mostrarán resultados de las dos simulaciones fluido-dinámicas realizadas y basado en los postulados de (El Neiri et al., 2016) efectuaremos un análisis comparativo con la finalidad de saber si, en base a una modificación en la hidráulica existe o no una optimización en la perforación. A partir de este momento llamaremos caso A la simulación con la broca base y caso B la simulación con la broca modificada.

Tabla 6.

*Resumen resultados para las variavles de Velocidad y Presión*

| Lugar           | VELOCIDAD [ft/s] |            |         |                |            |       | Δ PRESIÓN [Psi] |            |       |
|-----------------|------------------|------------|---------|----------------|------------|-------|-----------------|------------|-------|
|                 | Jets             |            |         | Espacio anular |            |       | Espacio anular  |            |       |
|                 | Inicial          | Mayor      | Final   | Inicial        | Mayor      | Final | Inicial         | Mayor      | Final |
| <b>Zona</b>     |                  | diferencia |         |                | diferencia |       |                 | diferencia |       |
| <b>Caso A</b>   | 101,7            | 120,6      | 119,7   | 35,8           | 7,8        | 12,6  | 0               | 145,3      | 495,2 |
| <b>Caso B</b>   | 81,2             | 61,9       | 95,6    | 26,7           | 18,4       | 15,4  | 0               | 0,43       | 334,5 |
| <b>% Cambio</b> | -20,15%          | -48,67%    | -20,13% | -25,4%         | 135,9%     | 22,2% | 0               | 99,7%      | 32,4% |

En el caso B la velocidad en Sin embargo, logro El caso B obtuvo una caída  
 Jets disminuyó respecto al sostenerse de mejor forma de presión con respecto al  
 caso A en el anular caso A.

En la tabla 6 se muestran los resultados obtenidos en puntos críticos, los cuales serán expuestos con mayor profundidad a continuación.

**4.3.1 Velocidad.** En el caso A se observa una caída de velocidad en el anular, mayor a la caída de velocidad en el mismo espacio del caso B, a causa del choque abrupto del fluido de circulación

contra la cara de la formación debido a la configuración de los jets los cuales apuntan casi directamente hacia la cara del hueco abierto. También se evidencia en el segundo caso una disminución de la velocidad a través de los jets, sin embargo, por el ángulo en que contacta la formación su disminución en la velocidad al salir de los jets es menor en comparación con el caso A como se observa en la figura 26.

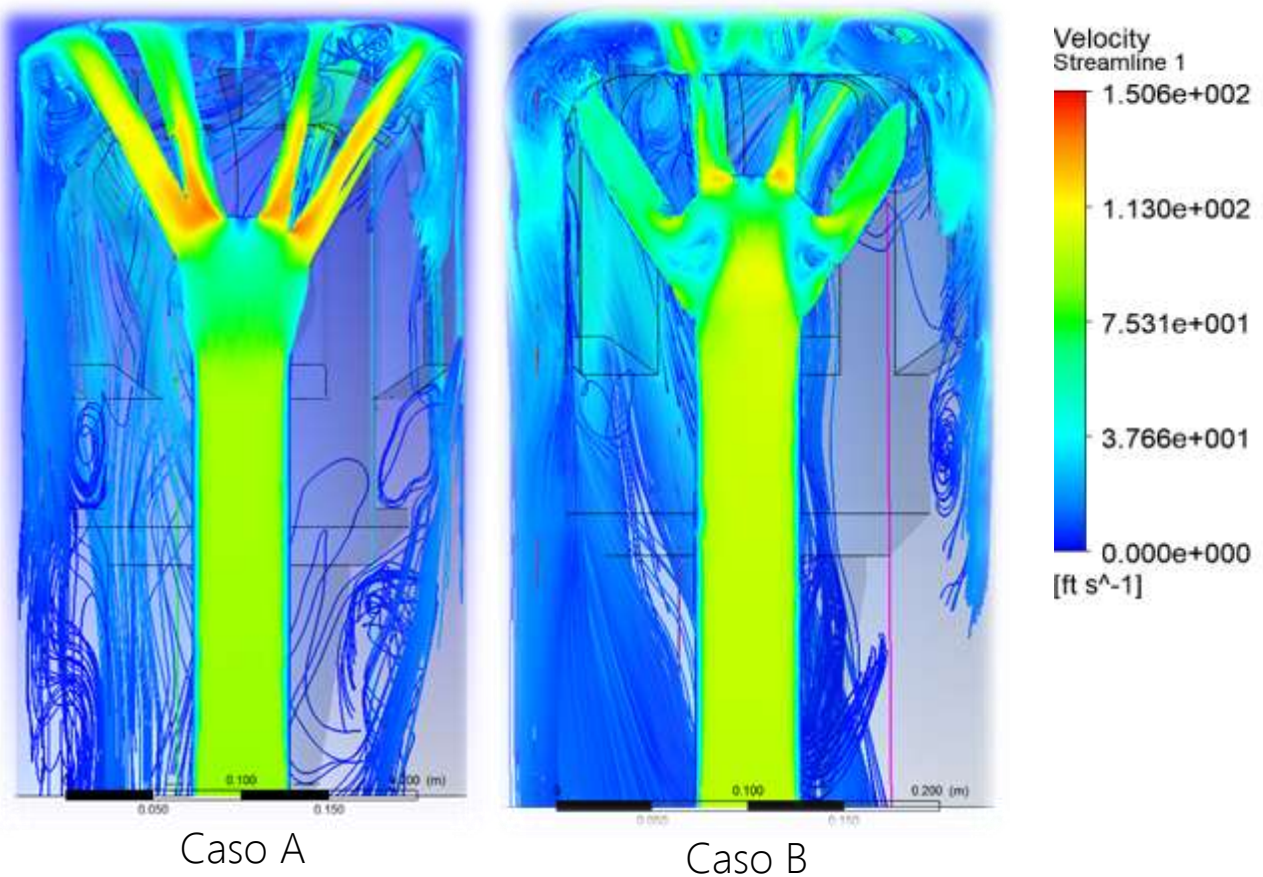


Figura 25. Velocidad: Caso A vs Caso B

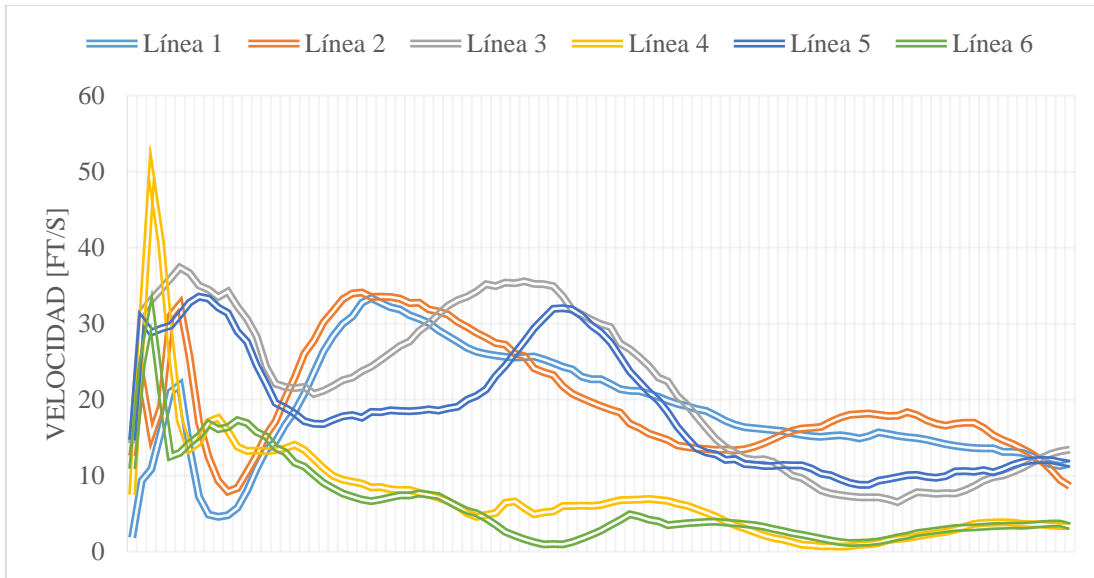


Figura 26. Velocidad en anular broca base

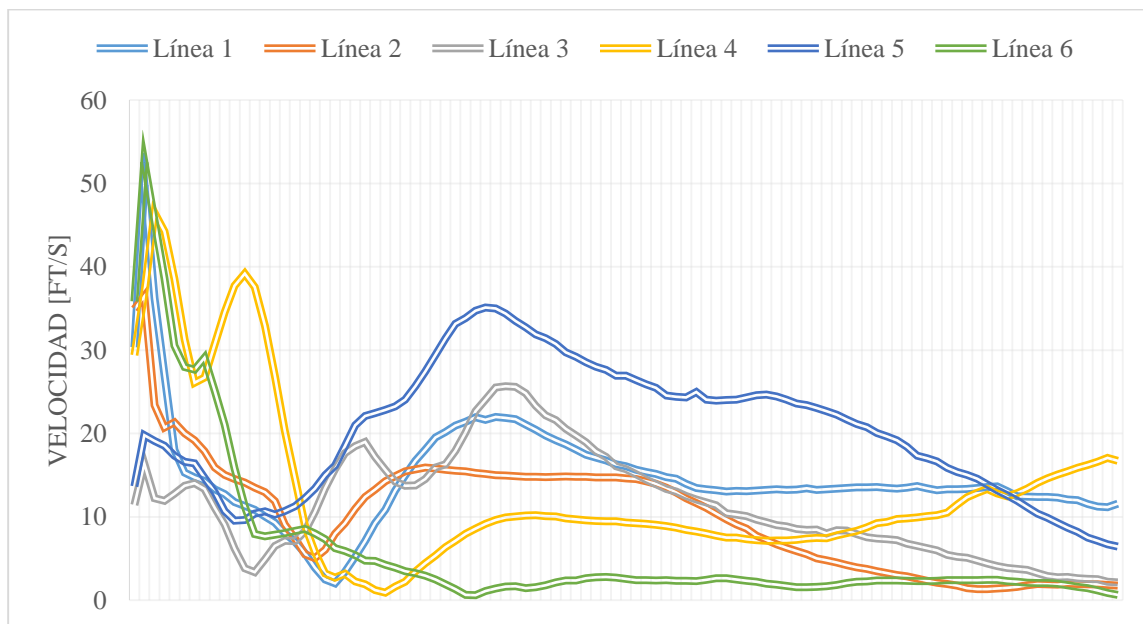


Figura 27. Velocidad en anular broca modificada

De las gráficas anteriores (figura 27 y figura 28) Podemos confirmar que existe un patrón de flujo tanto en el caso A como en el caso B para las zonas opuestas medidas; línea 1 – línea 2, línea

3 – línea 5, línea 4 – línea 6. En general en el caso B se evidencia un mayor sostenimiento de la velocidad que en el caso A.

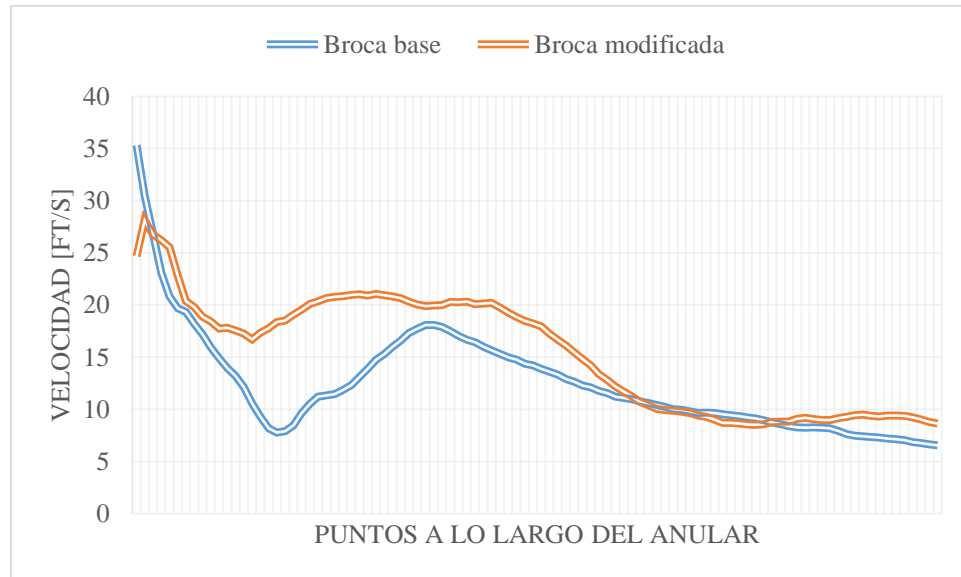


Figura 28 Velocidad anular: Caso A vs Caso B

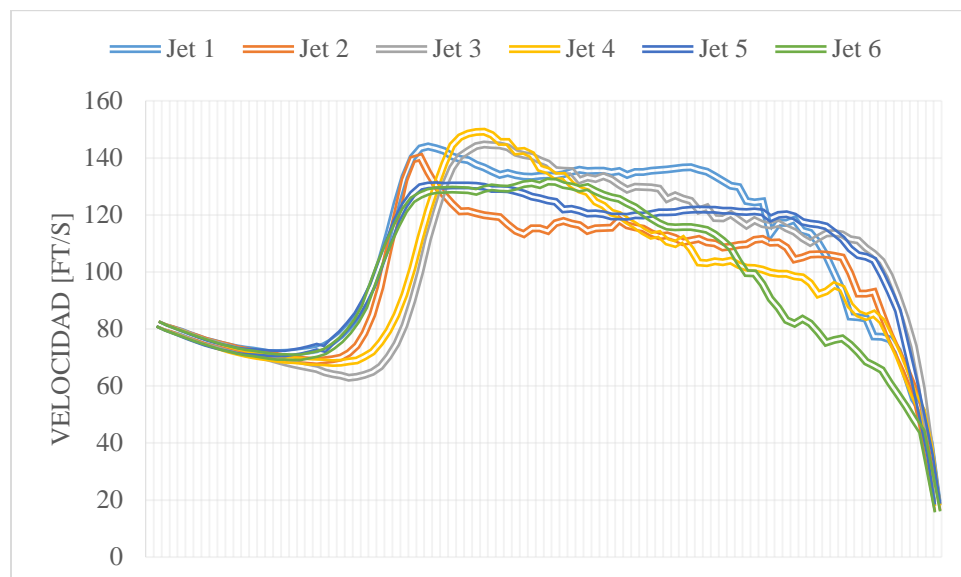


Figura 29. Velocidad jet Broca base

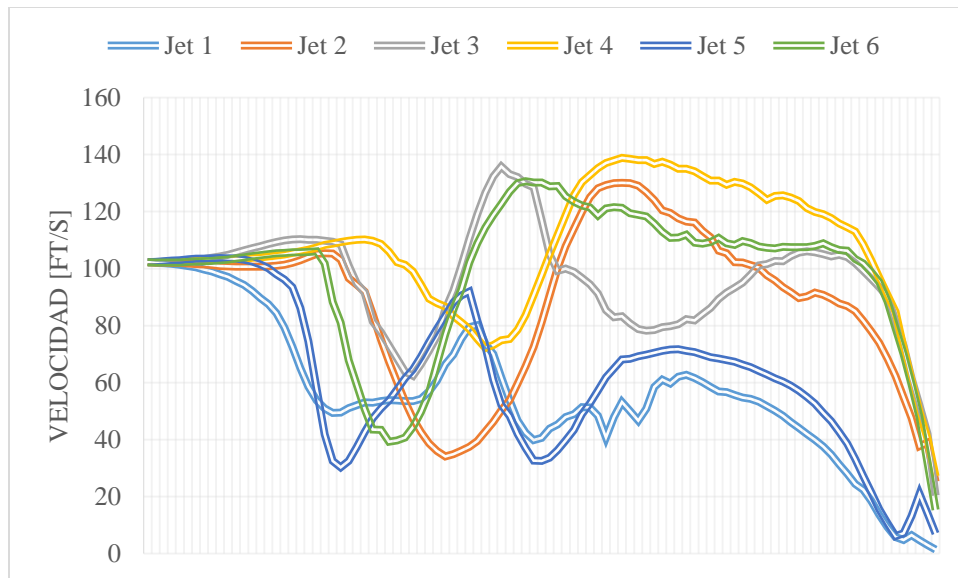


Figura 30. Velocidad Jets broca modificada

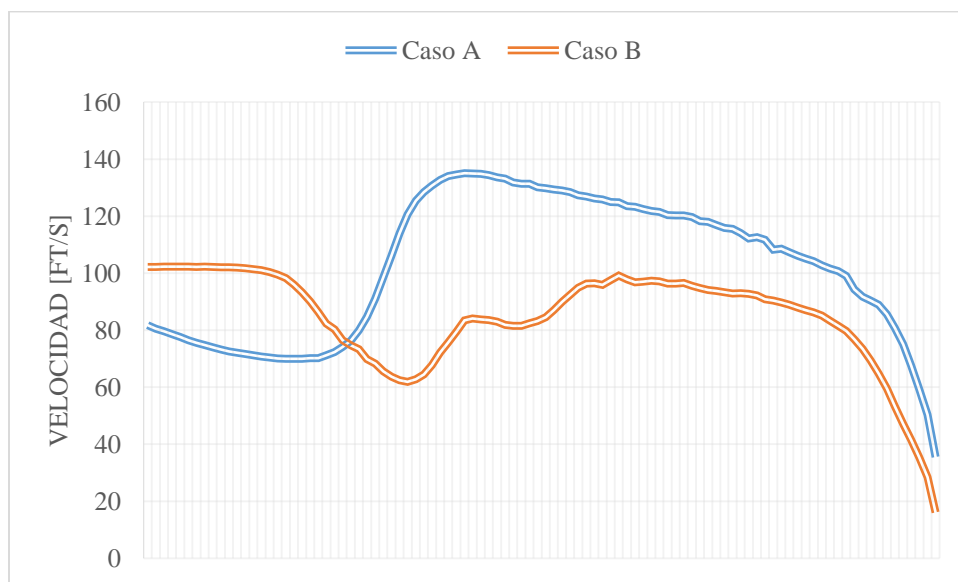


Figura 31. Promedio velocidad jets: Caso A vs Caso B

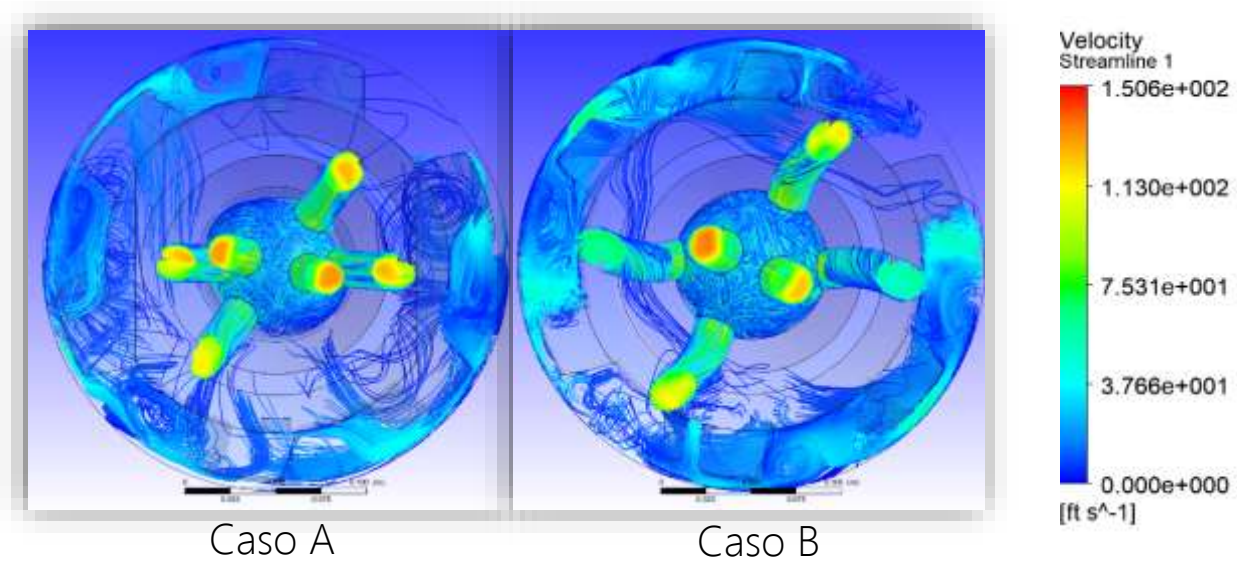


Figura 32. Vista interior flujo en Jets

Se evidencia en el caso B una disminución en la velocidad a través de las Jets (figura 32), sin embargo debido al ángulo en que el fluido contacta la formación esta velocidad se sostiene en el espacio anular en mayor medida que en el caso A (figura 29).

Se observa en la figura 33 como la velocidad en los Jets del caso B es menor que en el caso A, además en el caso B se genera una leve vorticidad debido a la curvatura y posicionamiento del Jet.

De forma general la modificación en los ángulos de los jets surtieron un efecto positivo para la conservación de velocidad del fluido, por lo tanto conservación de su energía cinética lo que contribuye, según (El Neiri et al., 2016) a una disminución en la presión en fondo de pozo en relación al caso A.

**4.3.2 Presión.** Al observar los resultados de la simulación con la variable de presión se confirma el comportamiento presentado con la velocidad, pues el caso B al mantener en mayor medida su energía cinética, se obtiene una mayor caída de presión en la zona como se observa en la figura 34.

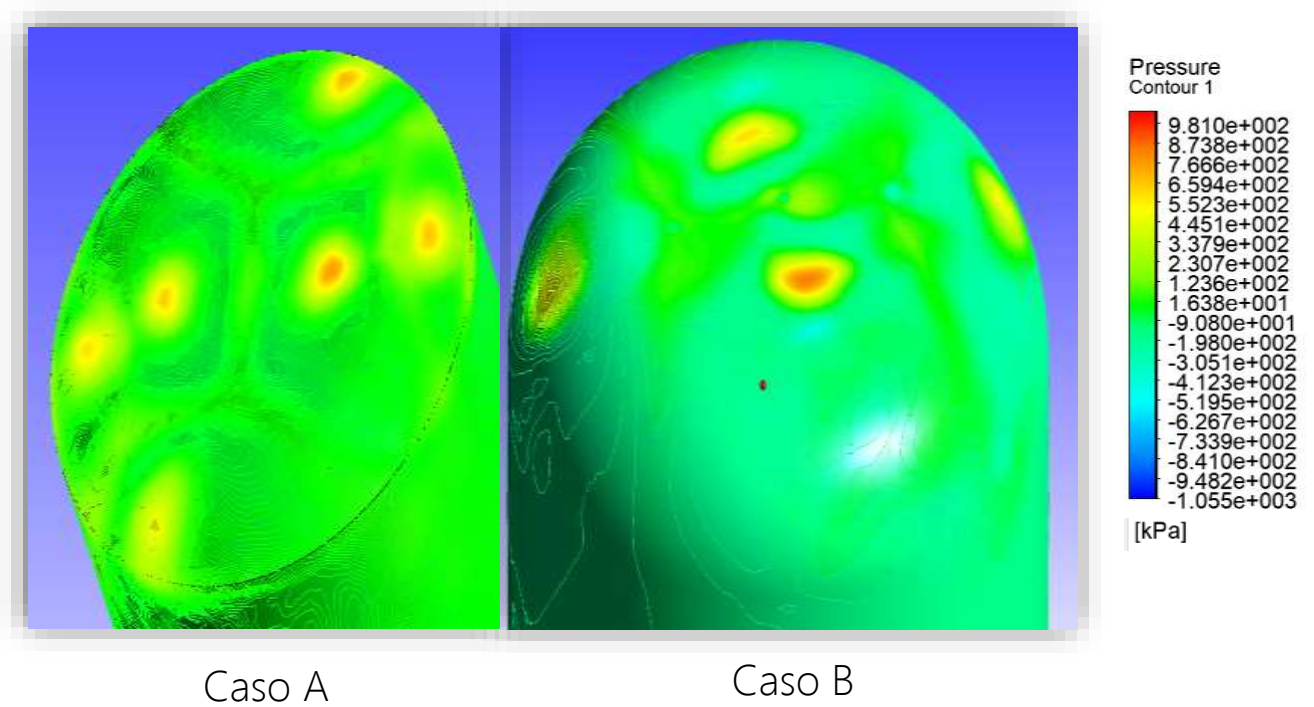


Figura 33. Contorno de presión en la cara de la formación

Los contornos de presión observados en la figura 34 muestran una disminución en los valores para el caso B, además se evidencia como en el caso A aumenta la presión en la zona donde el fluido expulsado del jet contacta frontalmente la formación a diferencia del caso B en el que no es tan marcada.

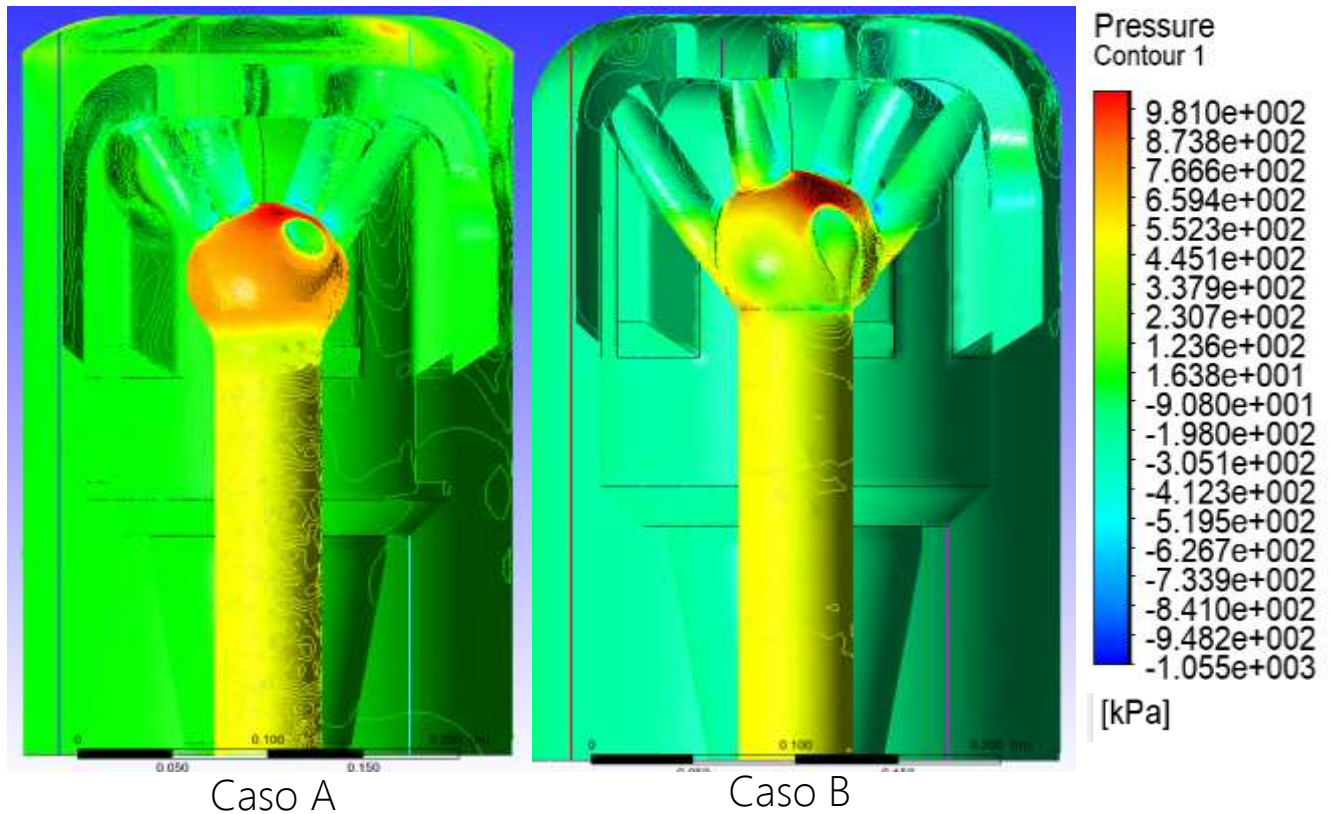


Figura 34. Contorno de presión en la zona interior de la broca

De igual forma la figura 35 muestra para el caso B como cambia la distribución de presión ejercida por el fluido debido a la re-organización de la ubicación de 4 de los 6 jets, esto indica que el fluido evacua la esfera de una forma más eficiente evitando acumularse en mayor medida generando esta disminución de presión en la esfera mostrado en el caso B.

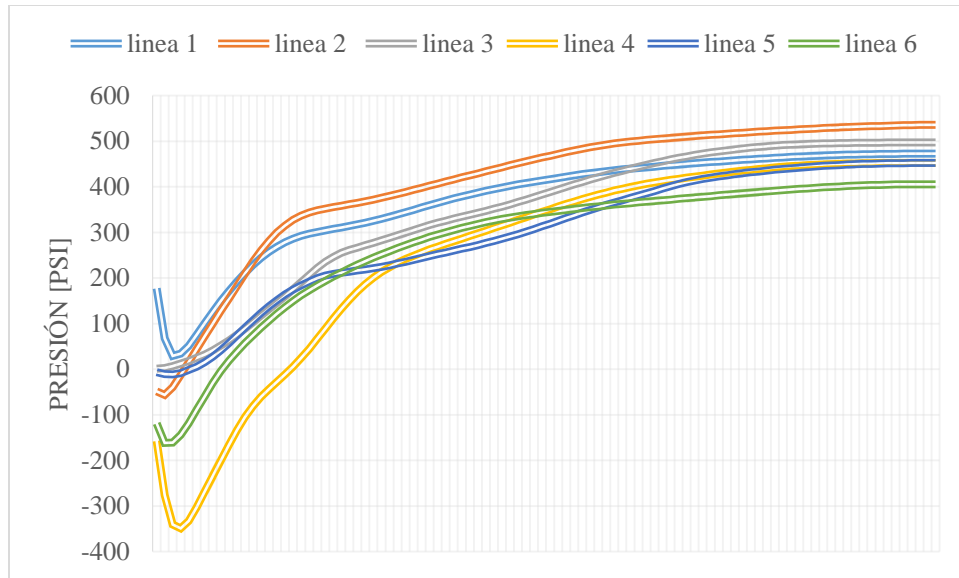


Figura 35. Diferencial de presión: Caso A

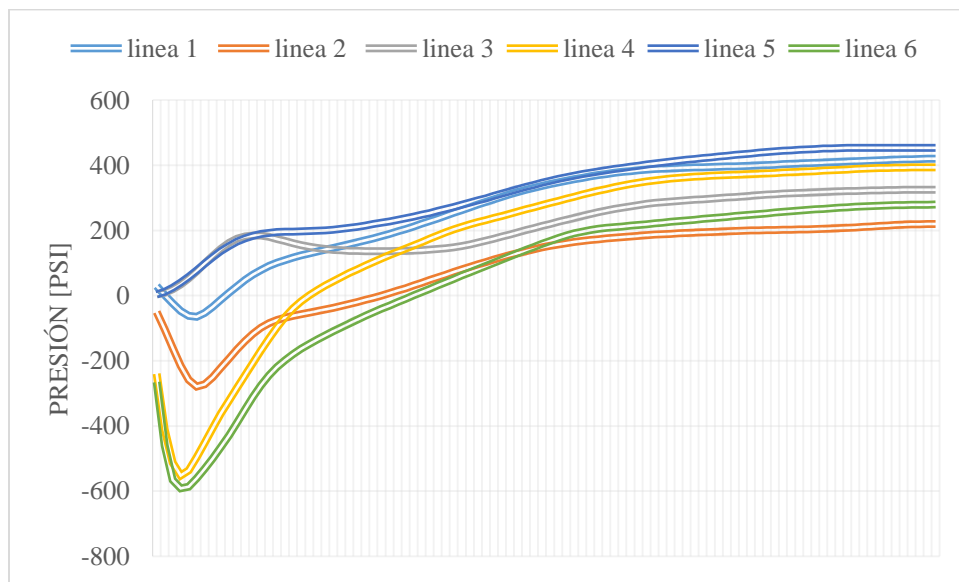


Figura 36. Diferencial de presión: Caso B

Se observa una mayor caída de presión para algunas zonas en el caso B, logrando un diferencial de presión mayor que en el caso A.

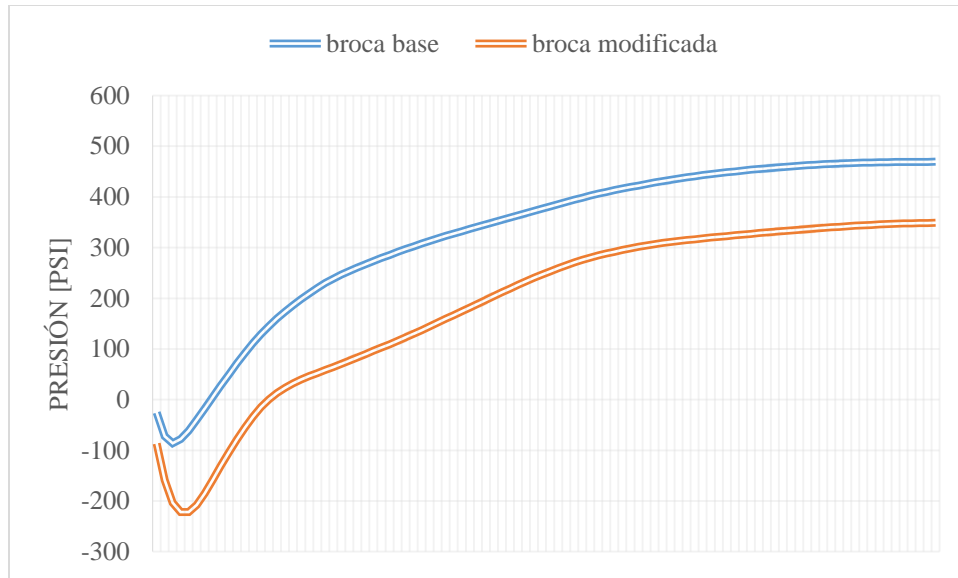


Figura 37. Diferencial de presión: Caso A vs Caso B

En la figura 38, al realizar un promedio general se ve con más claridad que la modificación en los jets de la broca para el caso B logra una disminución en la presión en la zona anular y para el final de la gráfica que corresponde a la salida del sistema el “*bit loss*” o pérdida de presión en la broca es de 348 [psi] para el caso B contra 469 [psi] para el caso A, esto indica que la correlación planteada por (El Neiri et al., 2016) basado en el principio de Bernoulli es correcta y aplica para escenarios de perforación.

## 5. Conclusiones

Con base en el trabajo realizado por (El Neiri et al., 2016) se diseñaron y llevaron a cabo dos simulaciones computarizadas, se validaron los modelos y resultados con información proveniente

de un pozo de Colombia, mediante la representación del mismo escenario y posterior comparación de resultados claves para verificar la fidelidad del modelo construido y comprobar el correcto funcionamiento de los modelos matemáticos usados para reproducir la fluido-dinámica en una broca PDC de 10 in y lograr evidenciar el comportamiento coherente en un caso real, se procedió a realizar la simulación del caso B usando la misma configuración, analizando y comparando resultados.

Las modificaciones realizadas para la geometría del caso B fueron determinadas utilizando un modelo de razonamiento deductivo basado en conclusiones lógicas a partir de una serie de premisas o principios, a causa de la poca o nula información que puede encontrarse sobre la razón técnica u operativa para la construcción de los jets. Se modificaron entonces 4 de los 6 jets: se tomó la decisión de no modificar los 2 jets que apuntan directamente hacia la cara del hueco abierto debido a que estos cumplen algunas funciones entre ellas la de limpiar los recortes que se acumulan en los espacios entre aletas en la parte delantera de la broca, además de lubricarla, los otros 4 sufrieron leves modificaciones en sus respectivas ubicaciones de salida de fluido del jet abriendo un poco más el ángulo con referencia al eje  $y$ , y construyéndole una curvatura abierta en dirección contraria a la dirección de giro de la broca.

Luego de simular los mismos escenarios con la variación de la geometría se estudiaron las variables de presión y velocidad a fin de comparar el cambio positivo o negativo que pudiera existir.

Con los contornos de velocidad del fluido (figura 26) se logró evidenciar que en el caso B se reduce la velocidad del fluido a lo largo de los jets, sin embargo debido a la modificación y el ángulo en que esta contacta la formación, se logra sostener de mejor forma la velocidad a lo largo del anular hasta encontrar la salida del sistema en la simulación y esto lo confirman los números,

pues la velocidad al inicio de entrada a los jets para el caso A fue en promedio de 81,4 [Ft/s] y para el caso B de 102,6 [Ft/s], a lo largo de los jets en promedio para el caso A fue de 127,1 [Ft/s] y para el caso B fue de apenas 86,5 [Ft/s], sin embargo los datos de velocidad tomados en la zona anular del sistema nos dice que en la cara de la formación, para el caso A, la velocidad era en promedio 26,9 [Ft/s] y cayó hasta los casi 6,1 [Ft/s] promediando a lo largo de su recorrido una velocidad de 12,7 [Ft/s], mientras que para el caso B los valores correspondientes fueron de 24,6 [Ft/s] en la cara de la formación y 8,6 [Ft/s] a la salida del sistema, la diferencia estuvo en como en el caso B la velocidad se mantuvo a lo largo del espacio anular en algunos puntos llegando a tener hasta un 57% más velocidad, como se observa en la figura 29.

Con los contornos de presión en la formación (figura 34) se logró evidenciar que en el caso B la presión a lo largo de todo el sistema es menor que en el caso A, y al ver los contornos de presión en la parte interior de la broca (figura 35) se logra observar como hay una mejor distribución de la presión en la esfera que distribuye el fluido a los jets para el caso B, finalmente los números confirman lo anteriormente enunciado, pues de forma general en los dos casos existe un comportamiento análogo, con la diferencia que para el caso B en general hay una disminución de la presión de un 35,8%.

Se puede concluir que, según El Neiri et al., (2016), si puede lograrse una mayor conservación de la energía cinética, con la velocidad como su variable principal, provocando la disminución de la energía potencial elástica, con la presión como su variable principal, al modificar de forma correcta los jets de una broca, lo que conduciría potencialmente a la optimización en general de la perforación.

Las herramientas de simulación computarizada resultan ser una herramienta de grandioso valor la cual debería ser explotada en mayor medida por las instituciones de educación superior,

brindándole a sus estudiantes una ventaja a la hora de plantear y resolver problemas “cotidianos” en el mundo de la ingeniería, por no nombrar todas sus demás ventajas al momento de desarrollar proyectos de innovación e investigación.

## 6. Trabajos Futuros

Para la realización de proyectos complementarios se recomienda analizar aspectos geomecánicos evaluando principalmente la interacción con las rocas y como cambian los esfuerzos al redistribuirse las zonas de presión generadas por el fluido, analizar posibles diferentes fenómenos en el pozo como lavado de hueco entre otros, realizar un análisis dinámico de los esfuerzos y deformaciones sobre la broca.

Se recomienda igualmente agregarle al modelo de simulación un trazado de partículas, para de esta forma simular los recortes y evaluar el comportamiento reológico del fluido, si este obtiene cambios notorios o no.

Realizar experimentos en laboratorio donde se evalúen los diferentes comportamientos fluido-dinámicos para diferentes configuraciones de jets, evaluando como afecta la hidráulica de la perforación en general.

## 7. Curriculum Vitae

JOHAN DAIVINSON LÓPEZ FLOREZ

[Jlopez94@hotmail.es](mailto:Jlopez94@hotmail.es)

### EDUCACIÓN

Pregrado, Ingeniería de petróleos, Universidad Industrial De Santander, Bucaramanga, 2019.

Integrante Grupo de investigación en modelamiento de procesos de hidrocarburos (GMPH).

Integrante Semillero de investigación en nanotecnología, modelado y simulación numérica aplicada en CFD.

### EXPERIENCIAS ACADÉMICAS

**Comité Organizador, Universidad Industrial de Santander, 8 – 12 Octubre 2018**

Semana Técnica Internacional de Ingeniería de Petróleos XVI.

**Asistente, Centro de Convenciones Neomundo, 24 Agosto 2018**

Foro Nacional de Yacimientos en Roca Generadora.

**Stand Comercial, Universidad Nacional: Sede Medellín, 13 – 18 Agosto 2018**

SPE Technical Conference.

**Stand Comercial, Universidad Surcolombiana, 7 – 11 Mayo 2018**

Semana Técnica Internacional de Ingeniería de Petróleos, Decima versión.

**Ponente, Universidad Industrial de Santander, 17 – 20 Octubre 2017**

Conferencia Internacional de Energía Sostenible, COIES.

**Asistente, Universidad Industrial De Santander, 22 Agosto 2017**

Curso: Company man: An insight view

**Asistente, Universidad Industrial De Santander, 25 – 30 Julio 2016**

Semana Técnica Internacional de Ingeniería de Petróleos XV

**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.
- Bailey, W. J., & Peden, J. M. (2000). A Generalized and Consistent Pressure Drop and Flow Regime Transition Model for Drilling Hydraulics. *SPE Drilling & Completion*, 15(01), 44-56. <https://doi.org/10.2118/62167-PA>
- 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>
- Dharma, D. S., Irawan, F., & Hidayat, A. M. (2016, marzo 22). *Unconventional Drilling in Southern Sumatra Area. Evolving Technique for the New Drilling Culture*. Presentado en Offshore Technology Conference Asia. <https://doi.org/10.4043/26699-MS>
- El Neiri, M. H., 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>
- Gharibshahi, R., Jafari, A., & Ahmadi, H. (2019). CFD investigation of enhanced extra-heavy oil recovery using metallic nanoparticles/steam injection in a micromodel with random pore distribution. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 174, 374-383. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.10.051>
- 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.
- H. Werner, & H. Wengle. (1991). *Large-Eddy Simulation of Turbulent Flow Over and Around a Cube in a Plate Channel*. Presentado en Eighth Symposium on Turbulent Shear Flows, Munich, Germany.
- 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>
- IAP, I. A. del P. (2014). *Manual de Fluidos de Perforación: Procedimiento Estándar para las Pruebas de Fluidos de Perforación*. Dallas, Texas.
- 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.
- 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>
- Pinilla, J. A., Guerrero, E., Pineda, H., Posada, R., Pereyra, E., & Ratkovich, N. (2019). CFD modeling and validation for two-phase medium viscosity oil-air flow in horizontal pipes. *Chemical Engineering Communications*, 206(5), 654-671. <https://doi.org/10.1080/00986445.2018.1516646>
- Shih, T.-H. L. (1994). *A New K-epsilon Eddy Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows: Model Development and Validation*. Recuperado de <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19950005029>
- 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.
- Szablewski, W. (1973). B. E. Launder and D. B. Spalding, *Mathematical Models of Turbulence*. 169 S. m. Abb. London/New York 1972. Academic Press. Preis geb. \$ 7.50. *ZAMM - Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, 53(6), 424-424. <https://doi.org/10.1002/zamm.19730530619>
- T. J. Barth, & D. Jespersen. (1989). The design and application of upwind schemes on unstructured meshes. *Technical Report AIAA-89-0366*. Presentado en AIAA 27th Aerospace Sciences Meeting, Reno, Nevada.
- 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>