

Diseño de una Boquilla con Diámetro Variable para ser usada en una Broca de Perforación

Dixon Yefrey González Flórez y Diego Fernando Rincón Cabezas

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero de Petróleos

Director

Wilson Raul Carreño Velasco

Ingeniero de Petróleos con maestría en Diseño, Gestión y Dirección de Proyectos

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Bucaramanga

2021

Dedicatoria

Este trabajo quiero dedicarlo a mis padres, abuelos y todas es personas que creyeron en mí y me ayudaron en el transcurso de mi formación universitaria; a todos ellos quiero dedicarles el fruto de mi esfuerzo a través de mis años de formación y mi titulación como ingeniero; Los llevo en mi corazón y espero recompensar todo aquello que han hecho por mí.

Dixon Yefrey Gonzales Flórez

A Dios, quien me demostró que la mejor religión es ser siempre una buena persona.

A mi madre Barbarita quien con todo su amor y protección me formaron como un hombre de bien.

A mi padre Merardo quien con todo su carisma y apoyo incondicional formó mi carácter.

A mi hermano Walter (Teo) por siempre darme consejos y guiarme cuando era necesario.

A mi abuelita Blanca quien estuvo toda su vida amándome y apoyándome, tristemente ya no puede acompañarme en este paso tan importante.

A toda mi familia que siempre me apoyó y estuvo cuando la necesité.

Diego Fernando Rincón Cabezas

Agradecimientos

Quiero dar gracias a Dios, primeramente, a mi padre Nabides González Gutiérrez, mi madre Nancy Yolanda Flórez, hermanos, familiares, profesores, amigos y persona que a través del tiempo me ayudaron a mi formación como persona.

A mi querida y amada universidad industrial de Santander por abrirme sus brazos y acogerme con un hijo, que salió de la tierra de la libertad para recibirme en su manto de conocimientos.

A me querido Santander, mi segunda tierra, a ti, a ti te debo mis más grandes alegrías, amores y placeres que hoy llevo aferrados a mi alma. Hermosa tierra de diversos colores que se pierde en el matiz de su vegetación y desemboca es sus hermosos ríos y cascadas; hoy con orgullo puedo decir que el que pisa tierra santandereana es santanderino.

Dixon Yefrey González Flórez

Quiero dar gracias a Dios por permitirme culminar esta etapa en mi vida, por escucharme y darme fortaleza siempre.

A mi madre, mi padre y mi hermano, sin ustedes no hubiese sido posible lograrlo.

A mi familia quienes siempre estuvieron conmigo y me enseñaron a seguir adelante.

A mis amigos Anderson, Edward, Jonathan, Ricardo y David con quienes puedo contar siempre y además lograron sacar las mejoras cosas de mí, de verdad gracias.

A mi gran amigo Fabio Tobos quien me tuvo siempre en sus oraciones y me corrigió con mucho carácter.

A la gloriosa Universidad Industrial de Santander por permitirme ser parte de su historia.

A nuestro director M.sc Wilson Carreño quien es un ejemplo por seguir en todos los aspectos.

A todos los excelentes seres humanos que Santander y La UIS me permitieron conocer, siempre estuvieron conmigo y siempre estaré con ustedes.

Diego Fernando Rincón Cabezas

Contenido

	Pág.
Introducción.....	16
1. Objetivos.....	18
1.1 Objetivo General.....	18
1.2 Objetivos Específicos.....	18
2. Generalidades.....	19
2.1 Conceptos básicos.....	19
2.2 Brocas de Perforación.....	24
2.2.1 Brocas con Cortadores Fijos.....	24
2.2.2 Brocas con conos y elementos rotatorios.....	28
3. Problemas Operacionales con Enfoque hacia las Boquillas de una Broca de Perforación.....	32
3.1 Boquillas de una broca de perforación.....	33
3.1.1 Tipo de una boquilla para broca de perforación.....	33
3.1.2 Geometría de la boquilla.....	34
3.2 Problemas operacionales con enfoque hacia las boquillas de una broca de perforación.....	39
3.2.1 Limpieza inadecuada del pozo.....	39
3.2.2 Aumento de presión en bombas y cambio de TFA.....	40
3.2.3 Eficiencia de broca utilizada.....	40
3.2.4 Pega de Tubería.....	40

3.2.5 Pega por Empaquetamiento.....	41
3.2.6 Incremento de costos	43
4. Reología de Fluidos e hidráulica de Perforación	43
4.1 Régimen de Fluidos	44
4.1.1 Flujo Laminar.....	44
4.1.2 Flujo Turbulento	45
4.1.3 Flujo Transición.....	46
4.2 Optimización de los Aspectos Hidráulicos	46
4.2.1 Sistema de Circulación	46
4.2.2 Fluido de Perforación	46
4.2.3 Tipos de Lodo de Perforación.....	47
4.2.4 Peso o Densidad del Lodo.....	47
4.2.5 Viscosidad	48
4.2.6 Presiones en el Sistema de Circulación	48
4.3 Tipos de Flujo.....	49
4.4 Cálculo de Caída de Presión en la Broca.....	50
4.4.1 TFA.....	51
4.4.2 Velocidad de Chorro o de la Boquilla	52
4.4.3 Potencia Hidráulica de la Bomba.....	53
4.4.4 Potencia Hidráulica en la Broca.....	54
4.4.5 Fuerza de Impacto del Chorro.....	55
4.5. Hidráulica de Fluidos.....	55

4.6. Pérdidas de Circulación en Sistema Circulante	57
4.6.1 Cálculos Básicos de Hidráulica.....	57
4.6.1.1 Velocidad de Flujo a través del Espacio Anular. V_f (ft/min)	57
4.6.1.2 Cálculo de Índice de Comportamiento	58
4.6.1.3 Factor de Consistencia Anular (poise)	58
4.6.1.4 Calcular la Viscosidad Efectiva (cp)	58
4.6.1.5 Número Reynolds (Para flujo en el Espacio Anular)	58
4.6.1.6 Factor de Fricción (Anular).....	59
4.6.1.7 Cálculo de la Presión para cada Sección del Pozo (Anular)	59
4.7 Cálculos para el Flujo Critico.....	60
4.7.1 Pérdidas de Presión en el Espacio Anular	60
4.7.2 Pérdidas de Presión en el Espacio Anular – Flujo Turbulento	61
4.7.2.1 Velocidad del Fluido a través de la Sarta de Perforación V_f (ft/min):	62
4.7.2.2 Cálculo del Índice de Comportamiento	62
4.7.2.3 Cálculo del Factor de Consistencia de la Tubería (poise).....	62
4.7.2.4 Calcular la Viscosidad Efectiva (cp)	63
4.7.2.5 Cálculo de Re	63
4.7.2.6 Cálculo del Factor de Fricción	63
4.7.2.7 Cálculo de la Caída de Presión para cada Sección del Hueco	63
4.8 La presión Disponible para la Boquilla se da de la siguiente forma.....	64
4.9 Cálculo del Área Total Óptima de las Boquillas.....	65
4.10 Cálculo de Tamaño de las Boquillas	65

4.11 Densidad Equivalente de Circulación ECD	66
4.11.1 Factores que afectan la ECD	66
4.11.2 Cálculo del ECD	67
4.12 Pérdida de la Presión dentro de la Tubería	68
4.13 Pérdidas de Presión en Boquillas de la Broca	68
4.14 Otras Aplicaciones de la Hidráulica	69
4.14.1 Máximo caballaje hidráulico.....	69
4.14.2 Máxima fuerza de impacto de chorro	70
4.14.3 Máxima velocidad de chorro.....	71
4.15 Problemas y Síntomas de Mala Limpieza de Hueco	71
5. Propuesta de diseño de boquillas	72
5.1 Historia y Evolución	72
5.2 Partes de la Boquilla “Queen Nozzle”	76
5.2.1 Cuñas	78
5.2.2 Corona	82
5.2.3 Torre	86
5.2.4 Tuerca Cónica	89
5.3 Ventajas y Desventajas de la Boquilla “Queen Nozzle”	91
6. Conclusiones	92
7. Recomendaciones.....	93
Referencias	95

Lista de Tablas

Tabla 1. Clasificación de las Brocas de Cortadores Fijos según IADC.....	28
Tabla 2. Clasificación de las Brocas Tricónicas según IADC.....	32
Tabla 3. Dimensiones de una boquilla con ajuste tipo rosca	35
Tabla 4. Equivalencia en pulgadas de diámetro de la boquilla anterior mencionadas.....	36
Tabla 5. Lista Estándar de Boquillas.....	38

Lista de Figuras

Figura 1. Esquema de pulsos de lodo.....	22
Figura 2.Mecanismo de Funcionamiento Cortadores Fijos	24
Figura 3.Geometría de un Cortador Fijo.....	25
Figura 4.Esquema de Cortador Ónix 360	26
Figura 5.Variaciones en el Cuerpo de una Broca PDC.....	26
Figura 6.Partes de una Broca con Cortadores Fijos	27
Figura 7. Mecanismo de Acción de una Broca Tricónica.	29
Figura 8. Partes de una Broca Tricónica.....	30
Figura 9. Tipo de boquilla para broca de perforación con rosca	34
Figura 10. Tipo de boquilla para broca de perforación con pin	34
Figura 11. Dimensiones de una boquilla con ajuste tipo rosca	35
Figura 12. Esfuerzo de Corte.....	44
Figura 13. Flujo Laminar	45
Figura 14. Flujo Turbulento.....	45
Figura 15. Sistema de Circulación	46
Figura 16. Flujo Tapón	49
Figura 17. Flujo Laminar	49
Figura 18. Flujo Turbulento.....	50
Figura 19. Partes de la boquilla “Queen Nozzle”.....	77
Figura 20. Esquema interno de la boquilla	77
Figura 21. Desglose del diseño.....	78

Figura 22. Cuña	79
Figura 23. Cuña Perfil.....	80
Figura 24. Formato A4 Cuña.....	81
Figura 25. Corona Vista Superior	82
Figura 26. Rosca de la Corona	83
Figura 27. Corona Vista Interna	84
Figura 28. Formato A4 de la Corona	85
Figura 29. Torre.....	86
Figura 30. Corona Dentada de la Torre	87
Figura 31. Formato A4 de la Torre	88
Figura 32. Formato A4 de la Tuerca Cónica	89

Glosario

Aditivo: todo aquel material que se agregue al fluido de perforación para cumplir una especificación en general.

BHA: conjunto de herramientas de fondo ubicada en la parte superior de la broca para poder generar peso, soltar la tubería en una pega, etc.

Boquilla: pieza generalmente mecánica de forma cónica la cual permite la circulación del fluido de perforación y la limpieza del hueco perforado.

Camisa: revestimiento en forma de capa o película que cubre el interior o el exterior de una pieza.

Cuña: pieza de madera, metal, u otro material, generalmente con forma de prisma triangular, que se utiliza para calzar, dividir o ajustar objetos.

DC: drill collar o collares de perforación.

Densidad API: medida de referencia para los fluidos petroleros, derivado a partir de la densidad relativa.

ECD: densidad equivalente de circulación.

Espacio anular: espacio que se genera entre la tubería de perforación y el pozo perforado.

GPM: galones por minuto.

Gradiente: cambio o variación de un parámetro.

HWDP: heavy weight drill pipe.

MD: profundidad medida.

MW: mud weight o peso del lodo.

PPG: medida de densidad en libras sobre galón.

Presión: medida de la fuerza a través de un área transversal.

Pulso: tipo de onda generada a través de un medio con el fin de comunicar una señal.

ROP: revoluciones por minuto.

Sistema: conjunto de piezas o mecanismos que cumple una función o varias en específico.

TFA: área de flujo total.

Tuerca: pieza hueca helicoidal, que ajusta en el filete de un tornillo. Por la forma de su perfil puede ser cuadrada, redonda, etc.

Turbina: mecanismo en el que se aprovecha el paso de un fluido, generar una energía mecánica o eléctrica.

TVD: profundidad vertical verdadera.

Válvula: instrumento para el control o paso de un fluido, se caracterizan por funcionar por varios mecanismos, estas se clasifican en tipos como: de compuerta, bola, etc.

WOB: peso sobre la broca.

Resumen

Título: Diseño de una boquilla con diámetro variable para ser usada en una broca de perforación.*

Autor: Dixon Yefrey Gonzales Flórez, Diego Fernando Rincón Cabezas**

Palabras Clave: Boquilla, diámetro, TFA, broca, Hidráulica de pozo, variación, perforación.

Descripción

En la historia de la industria de los hidrocarburos hemos encontrado que la efectividad de la hidráulica de un pozo que se está perforando es parte fundamental para determinar el éxito del proyecto que se realiza. Herramienta importante es la broca y su correcto funcionamiento depende en gran parte de la buena selección de las boquillas que se van a usar en ella, ya que se identificó una cantidad de problemas operacionales por su mal funcionamiento debido a que estas tienen un diámetro definido y fijo. Como bien sabemos las formaciones a perforar y los estratos son variables según la profundidad y esto conlleva a que sea necesario modificar el diámetro de las boquillas según sea nuestro avance, además puede ocurrir taponamiento de estas el cual impide la correcta circulación del lodo de perforación ocasionando problemas aún más graves. Para cambiar o reparar una boquilla es necesario realizar un viaje hasta superficie el cual es obligatorio y como sabemos es una pérdida de tiempo y este se traduce a un aumento de costos que estaban o no, pronosticados en el plan inicial. Se propone un prototipo de una boquilla para instalarse en una broca de perforación con diámetro variable según sea la necesidad, con el fin de tratar de solucionar algunos de los problemas originales además de optimizar los costos de perforación y mejorar los tiempos para el cumplimiento del proyecto.

* Trabajo de grado

** Facultad de ingenierías fisicoquímicas. Escuela de ingeniería de petróleos. Director: M. Sc Wilson Raúl Carreño Velasco

Abstract

Title: Variable diameter nozzle design to be used in a drill bit.*

Author: Dixon Yefrey Gonzales Flórez, Diego Fernando Rincón Cabezas.**

Key Words: Nozzle, diameter, TFA, drill bit, well hydraulics, variation, drilling.

Description

In the history of the hydrocarbon industry we have found that the effectiveness of the hydraulics of a well being drilled is a fundamental part in determining the success of the project being carried out. An important tool is the drill bit and its correct operation depends largely on the good selection of the nozzles to be used in it, since a number of operational problems were identified by their wrong operation due to the fact that these have a defined and fixed diameter. As we know the formations to be drilled and the strata are variable according to the depth and this leads to the need to modify the diameter of the nozzles according to our progress, in addition there may be clogging of these which prevents the proper circulation of drilling mud causing even more serious problems. To change or repair a nozzle it is necessary to make a trip to the surface which is mandatory and as we know is a waste of time and this translates into increased costs that were or were not predicted in the initial plan. We propose a prototype of a nozzle to be installed on a drill bit with variable diameter according to the need, in order to try to solve some of the original problems in addition to optimize the drilling costs and improve the time for the completion of the project.

* Bachelor thesis

** Faculty of Physical-Chemical Engineering. School of Petroleum Engineering. Director: Wilson Raul Carreño Velasco. Master's in design, and Project Management.

Introducción

Una de las industrias más importantes y necesarias para nuestro desarrollo y bienestar es la de los hidrocarburos, aunque en la actualidad estamos en un proceso de transición energética debemos tener claro que la demanda de productos derivados del petróleo no va a disminuir de una manera impactante en un corto tiempo, por esta razón y por el constante avance de la tecnología es necesario que según nuestras capacidades ayudemos a mejorar las prácticas y herramientas de la industria.

Una de las partes fundamentales en el proceso de perforación de un pozo petrolero es la broca y en ella a su vez está incorporada una de las herramientas más importantes de la cual se desprenden muchas de las principales ventajas del sistema de circulación. Las boquillas de perforación juegan un rol demasiado importante y por esta razón desde hace años se ha realizado investigación en busca de optimizar su funcionamiento por parte de las empresas pioneras en avances tecnológicos e innovación, desafortunadamente no se han demostrado resultados significativos y continuamos utilizando el mismo mecanismo de siempre el cual tiene muchas limitaciones en cuanto al taponamiento y cambio de diámetro necesario para el avance eficiente de la broca.

Recordemos que, para el éxito de una perforación, el correcto funcionamiento del sistema de circulación tanto en fondo como en superficie es de extrema importancia. Tener el control de las boquillas ubicadas en la broca nos brinda una ventaja, pero con su actual mecanismo de funcionamiento los beneficios no son tan relevantes. En el siguiente documento se propondrá un

nuevo mecanismo de funcionamiento de una boquilla para una broca de perforación con el fin de optimizar toda la actividad de perforación y así brindar grandes beneficios tanto técnicos como financieros a las empresas que desarrollan esta labor.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Diseñar una boquilla de diámetro variable para ser usada en una broca de perforación en la industria de los hidrocarburos.

1.2 Objetivos Específicos

Identificar los problemas operacionales con enfoque hacia las boquillas de una broca de perforación.

Generar una boquilla con diámetro variable para proponer soluciones a los problemas encontrados.

Analizar el funcionamiento, ventajas y desventajas de la boquilla diseñada en el proyecto.

2. Generalidades

2.1 Conceptos básicos

- Presión

Es la fuerza por unidad de área que ejerce un fluido (psi), en la industria petrolera se manejan diferentes tipos de presión:

➤ Presión de formación: es la presión ejercida por el contenido de líquido o gas en el espacio poroso de la formación.

➤ Presión de fractura: es la cantidad de presión que se necesita para deformar de modo permanente (fallar o agrietar) la estructura rocosa de la formación.

➤ Presión hidrostática: la Presión Hidrostática (Hydrostatic Pressure) es la presión que ejerce el peso de la columna vertical de lodo (fluido de perforación) a una determinada profundidad en condiciones estáticas. Matemáticamente (en unidades de campo) se expresa como:

$$HP=0.052 \times MW \times TVD \quad (1)$$

Donde,

HP = Hydrostatic Pressure / Presión Hidrostática, psi.

MW= Mud Weight / Peso o Densidad del lodo, ppg.

TVD= True Vertical Depth / Profundidad Vertical Verdadera, ft.

0.052 = Conversión Factor / Factor de Conversión, psi (ppg x ft).

- Gradiente de Presión

El cambio producido en la presión por unidad de profundidad, expresado normalmente en unidades de psi/pie o kPa/m. La presión se incrementa en forma predecible con la profundidad, en las áreas de presión normal. El gradiente de presión hidrostática normal para el agua dulce es de 0,433 psi/pie, o 9,792 kPa/m, y de 0,465 psi/pie para el agua con 100 000 ppm de sólidos disueltos totales (un agua típica de la Costa del Golfo), o 10,516 kPa/m. Las desviaciones respecto de la presión normal se describen como presión alta o baja (The Schlumberger Oilfield Glossary, 2021)

- TFA

El área de flujo total (TFA) es la suma de las áreas de las boquillas que el fluido puede pasar a través de una broca. Cuando se considera el TFA, es necesario contar todas las boquillas que se tienen en una broca (The Schlumberger Oilfield Glossary, 2021).

- WOB

El peso en la broca, o WOB, es la cantidad de fuerza hacia abajo ejercida sobre la broca proporcionada por piezas tubulares de paredes gruesas en el conjunto de perforación que se conocen como collares de perforación. La fuerza de gravedad hacia abajo sobre estos tubos de acero proporciona fuerza a la broca para romper la roca de manera efectiva. (Ulterra, 2013)

- ROP

La velocidad a la que la broca puede romper la roca bajo ella y así profundizar el pozo. Esta velocidad suele indicarse en unidades de pies por hora o metros por hora.

- Peso del Lodo

La masa por unidad de volumen de un fluido de perforación, sinónimo de densidad del lodo. El peso se expresa en lb/gal (también conocido como ppg), kg/m³ o g/cm³ (también llamado gravedad específica o SG), lb/pie³ o en gradiente hidrostático, lb/pulg²/pie (psi/pie) o pptf (psi/1000 pies). El peso del lodo controla la presión hidrostática en el pozo y evita el flujo no deseado al pozo. El peso del lodo también evita el colapso de la tubería de revestimiento y el agujero descubierto. Un peso de lodo excesivo puede causar pérdida de circulación por la propagación, y posterior llenado, de fracturas en la roca. Los procedimientos de ensayo del peso (densidad) del lodo han sido normalizados y publicados por el API. (The Schlumberger Oilfield Glossary, 2021)

- TVD (True Vertical Deep)

Es la profundidad medida en línea recta perpendicular a la superficie terrestre hasta el punto objetivo.

- MD (Measure Deep)

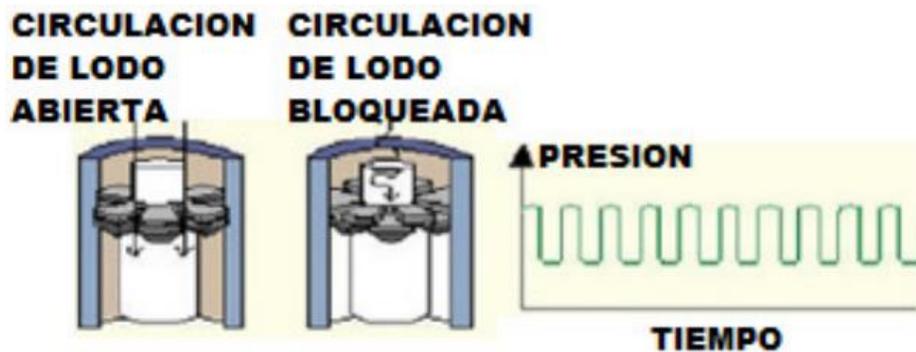
Es la longitud total de perforación que se ha realizado.

- MWD (Measuring While Drilling)

Es una herramienta diseñada especialmente para tener un conocimiento mucho más claro de donde y en qué características se encuentra el BHA de una sarta de perforación por medio de diferentes sensores que se encuentran en la herramienta. Esta herramienta transmite datos en tiempo real mediante la telemetría, esta señal trabaja enviando pulsos a través del lodo de perforación los cuales pueden ser positivos, negativos o continuos.

Figura 1

Esquema de pulsos de lodo



Nota: Adaptado de: (Narváez Romero, 2013)

- Pulsos Positivos

Usa una válvula tipo émbolo, que obstruye momentáneamente el flujo de lodo, generando pulsos, lo que provoca un incremento instantáneo de la presión en el interior de la sarta. Estas pulsaciones llevan una frecuencia en el fluido, las cuales corresponden a un código digital binario que es captado en la superficie por un transductor colocado en la tubería, dicho transductor decodifica la información y la envía a la central de proceso para su interpretación.

- Sistema de Pulso Negativo

Utiliza una válvula que descarga momentáneamente una pequeña cantidad del flujo de lodo, hacia el espacio anular a través de un orificio, dando como resultado un pulso de presión momentáneo negativo. Esto provoca una caída de presión en el interior de la sarta de perforación.

- Sistema de Onda Continua de Presión

Utiliza un modulador que consiste en una turbina que provoca restricción al paso del fluido a través de ella. Se producen ondas continuas de presión de frecuencia variable que se propagan hacia la superficie.

- Sistema de Potencia

Los sistemas que van a energizar toda la herramienta pueden ser 2; baterías de litio o una turbina.

La utilización de una o de otra depende del fabricante, sin embargo, en ciertos ambientes se puede elegir el sistema más eficiente.

- Turbinas.

Estas van dentro de la herramienta y necesitan del fluido o lodo de perforación para hacer girar un rotor, la fuerza rotacional producida se transmite a un alternador a través de un eje. El alternador genera un flujo de corriente alterna la cual debe pasar por un circuito eléctrico que la vuelve corriente continua.

2.2 Brocas de Perforación

Una broca de perforación es una herramienta que va en el extremo de la sarta de perforación la cual tritura o corta la formación para lograr el avance en el hueco. En la industria de los hidrocarburos a lo largo de los años se ha utilizado una amplia variedad de brocas para perforar los yacimientos y así llegar al preciado fluido. Debemos tener claro cuál es el objetivo del proyecto y las características geotécnicas para realizar una correcta selección de la broca. A continuación, se presentan las principales brocas que se usan en la actualidad.

En este tiempo tenemos en constante uso dos tipos de broca:

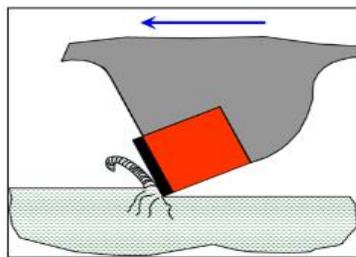
- Brocas con cortadores fijos o de arrastre
- Brocas de conos o elementos rodantes

2.2.1 Brocas con Cortadores Fijos

Este tipo de brocas se distinguen por que los cortadores forman parte del cuerpo de la broca, es decir una sola pieza que mediante rotación realiza el corte de la formación removiendo escamas. En la figura 2 podemos observar el método de arrastre el cual es su mecanismo de funcionamiento.

Figura 2

Mecanismo de Funcionamiento Cortadores Fijos

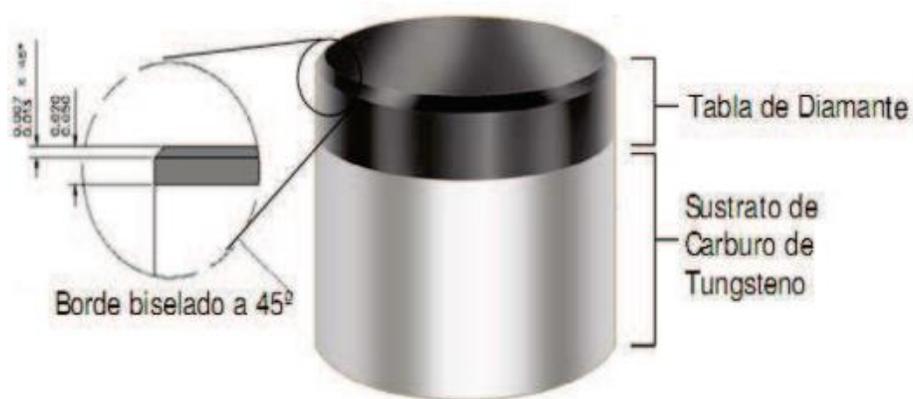


Nota: Adaptado de: (Rosero Muñoz & Toscano Freire, 2021)

En esta clasificación encontramos que según el tipo de formación o necesidad podemos usar insertos de diamantes naturales o sintéticos que en ambos casos van unidos a una base de carburo de tungsteno mediante procesos de altas temperaturas y presiones. En cuanto a la forma de los cortadores sintéticos, son en forma de disco con caras perpendiculares entre sí y un bisel de 45 grados en el borde, en la figura 3 podemos observar su geometría.

Figura 3

Geometría de un Cortador Fijo



Nota: Adaptado de: (Haro Ruiz, 2013)

Para resaltar, los discos de PDC fijos a la base de carburo de tungsteno ya no son los únicos puesto que existe también una broca llamada ONIX 360 cuya innovación está en que el disco de polycrystalline diamond compacts puede rotar 360 grados sobre su propio eje; esta es una inmensa ventaja ya que el desgaste que va a presentar el cortador será de una manera homogénea dándole así un mayor tiempo de vida. Véase en la figura 4.

Figura 4*Esquema de Cortador Ónix 360*

Nota: Adaptado de: (Drilling Contractor, 2014)

La forma del cuerpo de la broca de esta categoría también es variable y de ella depende su uso: una broca con ahusamiento largo (ahusada) ayuda en la perforación de un hoyo recto y permite usar mayor peso sobre ella, debido al mayor número de diamantes. En un ahusamiento corto el perfil parabólico es más fácil de limpiar, porque la energía hidráulica puede ser concentrada en menos área superficial (Grupo de Investigación Perforación, 2011). En la figura 5 observamos ejemplos de las brocas anteriormente mencionadas.

Figura 5*Variaciones en el Cuerpo de una Broca PDC*

Parabolico



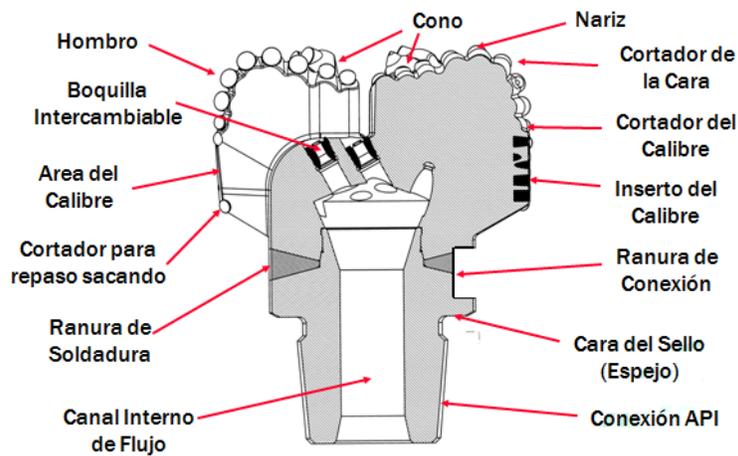
Ahusado

Nota: Adaptado de: (Grupo de Investigación Perforación, 2011)

La cantidad y el tamaño de las incrustaciones de diamantes ya sean naturales o sintéticos es muy importante y debemos tener en consideración el tipo de formación a atacar ya que si la formación es blanda los insertos deben ser de un tamaño mayor y en menor cantidad que si la formación es dura; en este tipo de formaciones el mecanismo de perforación es similar a una piedra de esmeril, por esta razón debe ser una broca impregnada con muchas rocas de pequeño tamaño.

Figura 6

Partes de una Broca con Cortadores Fijos



Nota: Adaptado de: (Grupo de Investigación Perforación, 2011)

Para llevar un control de las brocas, poder llevar un registro durante la perforación, clasificarlas y ayudar en la identificación con solo observarlas, fueron algunos de los impulsos para que The International Association of Drilling Contractors (IADC) propusiera el siguiente mecanismo de clasificación.

Tabla 1.*Clasificación de las Brocas de Cortadores Fijos según IADC*

PRIMER CARÁCTER		SEGUNDO CARÁCTER					TERCER CARÁCTER				CUARTO CARÁCTER			
	TIPO DE CORTADOR	MATERIAL DEL CUERPO	PERFIL DEL CUERPO			DISEÑO HIDRAULICO			TAMAÑO Y DENSIDAD DE LOS CORTADORES					
			ALTURA DEL FLANCO	ALTURA DEL CONO		DISTRIBUCION DE CORTADORES	TIPO DE ORIFICIO			TAMAÑO	DENSIDAD			
				ALTA	MEDIA		BAJA	TOBERAS	ORIFICIO FIJO		SALIDA ABIERTA	ALTA	MEDIA	BAJA
D	DIAMANTE NATURAL	MATRIZ	ALTO	1	2	3	EN ALETAS	1	2	3	GRANDE	1	2	3
M	PDC	MATRIZ	MEDIO	4	5	6	EN COSTILLAS	4	5	6	NEDIANO	4	5	6
S	PDC	ACERO	BAJO	7	8	9	NO AGRUPADOS	7	8	9	PEQUEÑO	7	8	9
T	TSP	MATRIZ	0:00			R:FLUJO RADIAL X:FLUJO CRUZADO			0:IMPREGNADO					

Nota: Adaptado de: (Haro Ruiz, 2013). Modificado por: los autores.

2.2.2 Brocas con conos y elementos rotatorios.

La característica principal de estas brocas es su funcionamiento mediante conos que rotan, pueden ser de uno, dos o tres (tricónicas). Las brocas tricónicas sin duda son las que más se han usado en la industria de los hidrocarburos al paso de los años y su material de fabricación puede variar según sea la necesidad; los dientes que van en los conos son de acero y también existen con insertos de carburo de tungsteno los cuales van montados en un diente de igual manera manufacturado en acero.

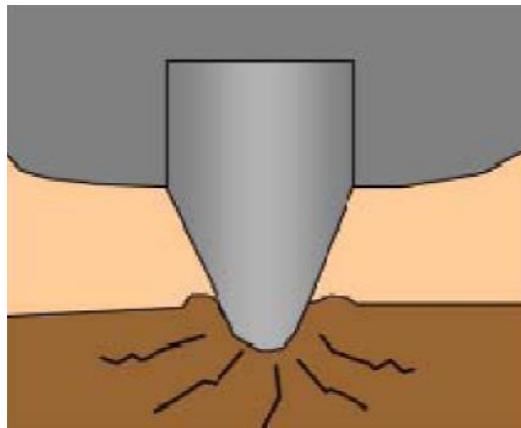
Históricamente las brocas bicónicas fueron creadas antes de las tricónicas, pero les faltaba estabilidad. Sin embargo, la ROP (Rate of Penetration) era siempre más alta ya que la cantidad de dientes es menor que su equivalente en tricónico y como es bien sabido es mejor tener una mayor carga por diente (carga puntual) (Rosero Muñoz & Toscano Freire, 2021).

Mecanismo de funcionamiento

El mecanismo de perforación de una broca tricónica está dado por la fractura de la roca por compresión a diferencia de las brocas con cortadores fijos, este funcionamiento abarca una mayor variedad de formaciones en la cuales se puede utilizar, es decir el campo de acción es mayor ya que se puede usar desde formaciones blandas en la cuales las boquillas que son parte fundamental de la broca también ayuda para mejorar la ROP hasta formaciones duras en la cuales el mecanismo por fractura es esencial. En la figura 7 podemos ver un esquema del funcionamiento.

Figura 7

Mecanismo de Acción de una Broca Tricónica.

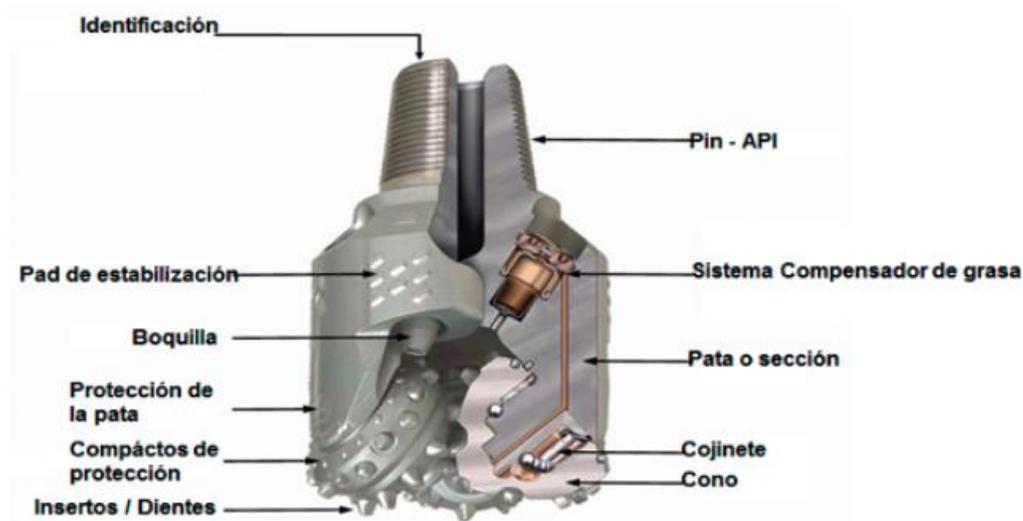


Nota: Adaptado de: (González, Jara, Ramírez, & Malavé, 2010)

Con este tipo de broca debido a su forma se puede ser más exigentes en la aplicación de WOB que se aplica ya que su resistencia es mucho mayor, además es beneficioso ya que como lo mencionamos anteriormente la fractura de la roca es el mecanismo de perforación. Se debe tener cuidado con las especificaciones del fabricante para poder tener el rango de peso que se puede utilizar.

Figura 8

Partes de una Broca Tricónica



Nota: Adaptado de: (Grupo de Investigación Perforación, 2011)

Sistema de Rodamientos

Al igual que todas las características de las brocas, las cuales dependen del tipo de formación en la cual se va a usar, el sistema de rodamientos también puede variar entre las siguientes opciones:

Estándar con Rodillos

Balines auto lubricados con rodillos

Balines de fricción auto lubricados

En el comienzo de su utilización el sistema estándar con rodillos estaba en contacto directo con el fluido de perforación para su lubricación, paulatinamente su uso se ha enfocado en los

inicios de la perforación ya que en esta zona superior las maniobras no son tan drásticas. Posteriormente y para lograr el objetivo de que el uso de las boquillas fuese directo hacia la formación se implementó el uso de rodillos auto lubricados, esta innovación también permitió que el sistema de rodamientos tuviese una vida más larga que los propios conos, esto cambia cuando se empieza a implementar el uso de conos con incrustaciones de carburo de tungsteno que vuelve a generar el problema el tiempo de vida relativo. Se diseña entonces el sistema con chumacera el cual tiene lubricación independiente y ya incorpora sellos fabricados con elastómeros especiales pero la necesidad de optimizar estos mecanismos aún está en constante estudio.

Clasificación según IADC

En este caso la clasificación se adapta al diseño y a la aplicación de la broca tricónica como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2.

Clasificación de las Brocas Tricónicas según IADC

		PRIMER	SEGUNDO		TERCER DÍGITO								
		Sistema de corte	Dureza		Sistema de Rodamiento								
					1	2	3	4	5	6	7	8	9
Dientes de Acero	1	Dientes de acero para formación blanda	1	Suave	Boquilla para lodo y rodamientos estandar	Boquilla para lodo/aire y rodamientos estandar	Protección al calibre y rodamientos estandar	Rodamiento sellado autolubricado	Rodamiento sellado y protección al calibre	Chumacera sellada	Chumacera sellada y protección al calibre	Para perforación direccional	Otros
			2	Media suave									
			3	Media dura									
			4	Dura									
	2	Dientes de acero para formación media	1	Suave									
			2	Media suave									
			3	Media dura									
			4	Dura									
	3	Dientes de acero para formación dura	1	Suave									
			2	Media suave									
			3	Media dura									
			4	Dura									
Dientes de insertos de carburo de tungsteno	4	Dientes de inserto para formación muy blanda	1	Suave									
			2	Media suave									
			3	Media dura									
			4	Dura									
	5	Dientes de inserto para formación blanda	1	Suave									
			2	Media suave									
			3	Media dura									
			4	Dura									
	6	Dientes de inserto para formación media	1	Suave									
			2	Media suave									
			3	Media dura									
			4	Dura									
7	Dientes de inserto para formación dura	1	Suave										
		2	Media suave										
		3	Media dura										
		4	Dura										
8	Dientes de inserto para	1	Suave										
		2	Media suave										

Nota: Adaptado de: (León Padilla, 2012),

3. Problemas Operacionales con Enfoque hacia las Boquillas de una Broca de Perforación.

3.1 Boquillas de una broca de perforación

Es la parte de la broca que incluye un orificio o abertura para que salga el fluido de perforación. El orificio suele ser pequeño (alrededor de 0,25 pulgadas de diámetro) y la presión del fluido dentro de la broca normalmente es alta, lo que conduce a una alta velocidad de salida a través de las boquillas que crea un chorro de alta velocidad debajo de las mismas. Este chorro de fluido de alta velocidad limpia tanto los dientes de la broca como el fondo del hueco. Los tamaños de las boquillas generalmente se miden en incrementos de 1/32 de pulgada (aunque algunos se registran en milímetros) y generalmente van desde 6 / 32 a 32/32. (The Schlumberger Oilfield Glossary, 2021)

3.1.1 Tipo de una boquilla para broca de perforación

El ajuste de las boquillas a las brocas puede ser de dos tipos; con rosca o con anillo/pin de seguridad esto depende del fabricante, sin embargo, es común encontrar en las brocas PDC el sistema de ajuste de la boquilla con rosca y en las tricónicas ajuste con pin. Una boquilla con ajuste tipo rosca se observa en la figura 9. y con tipo pin en la figura 10.

Figura 9

Tipo de boquilla para broca de perforación con rosca



Nota: Adaptado de: (Tungsten Carbide Jet Nozzles, 2021)

Figura 10

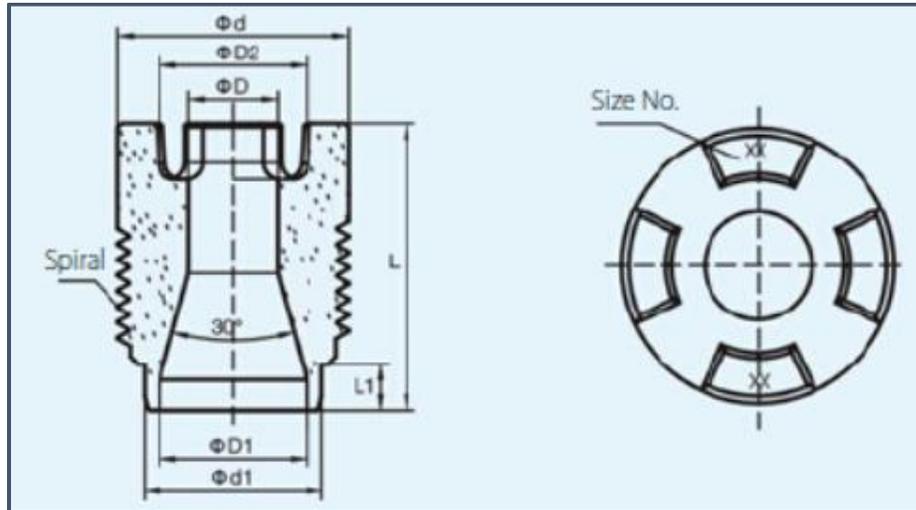
Tipo de boquilla para broca de perforación con pin



Nota: Adaptado de: (Tungsten Carbide Jet Nozzles, 2021)

3.1.2 Geometría de la boquilla

A continuación, en la figura 11 se presenta las dimensiones y medidas de una boquilla con ajuste tipo rosca.

Figura 1*Dimensiones de una boquilla con ajuste tipo rosca**Nota:* Adaptado de: (TUNGSTEN CARBIDE NOZZEL, 2021)**Tabla 3.***Dimensiones de una boquilla con ajuste tipo rosca*

Modelo	Tamaño	D (mm)	D1	d	d1	L	L1
No.							
PZ-1104-09	9	7.1	17.5	25.4	20.4	30.8	3.9
PZ-1104-10	10	7.9	17.5	25.4	20.4	30.8	3.9
PZ-1104-11	11	8.7	17.5	25.4	20.4	30.8	3.9
PZ-1104-12	12	9.5	17.5	25.4	20.4	30.8	3.9
PZ-1104-13	13	10.3	17.5	25.4	20.4	30.8	3.9
PZ-1104-14	14	11.1	17.5	25.4	20.4	30.8	3.9
PZ-1104-15	15	11.9	17.5	25.4	20.4	30.8	3.9
PZ-1104-16	16	12.7	17.5	25.4	20.4	30.8	3.9

PZ-1104-17	17	13.5	17.5	25.4	20.4	30.8	3.9
PZ-1104-18	18	14.3	17.5	25.4	20.4	30.8	3.9
PZ-1104-19	19	15.1	17.5	25.4	20.4	30.8	3.9
PZ-1104-20	20	15.9	17.5	25.4	20.4	30.8	3.9
PZ-1104-21	21	16.7	17.5	25.4	20.4	30.8	3.9
PZ-1104-22	22	17.5	A través del hueco	25.4	20.4	30.8	3.9
PZ-1103-09	9	7.1	14.3	22.4	17.1	27.5	3.9
PZ-1103-10	10	7.9	14.3	22.4	17.1	27.5	3.9
PZ-1103-11	11	8.7	14.3	22.4	17.1	27.5	3.9
PZ-1103-12	12	9.5	14.3	22.4	17.1	27.5	3.9
PZ-1103-13	13	10.3	14.3	22.4	17.1	27.5	3.9
PZ-1103-14	14	11.1	14.3	22.4	17.1	27.5	3.9
PZ-1103-15	15	11.9	14.3	22.4	17.1	27.5	3.9
PZ-1103-16	16	12.7	14.3	22.4	17.1	27.5	3.9
PZ-1103-17	17	13.5	14.3	22.4	17.1	27.5	3.9
PZ-1103-18	18	14.3	A través del hueco	22.4	17.1	27.5	3.9

Nota: Adaptado de: (TUNGSTEN CARBIDE NOZZEL, 2021)

Tabla 4.

Equivalencia en pulgadas de diámetro de la boquilla anterior mencionadas

D (mm)	Diámetro de salida (in)	d	Diámetro externo (in)
7.1	9/32	25.4	1
7.9	10/32	25.4	1

8.7	11/32	25.4	1
9.5	12/32	25.4	1
10.3	13/32	25.4	1
11.1	14/32	25.4	1
11.9	15/32	25.4	1
12.7	16/32	25.4	1
13.5	17/32	25.4	1
14.3	18/32	25.4	1
15.1	19/32	25.4	1
15.9	20/32	25.4	1
16.7	21/32	25.4	1
17.5	22/32	25.4	1
7.1	9/32	22.4	28/32
7.9	10/32	22.4	28/32
8.7	11/32	22.4	28/32
9.5	12/32	22.4	28/32
10.3	13/32	22.4	28/32
11.1	14/32	22.4	28/32
11.9	15/32	22.4	28/32
12.7	16/32	22.4	28/32
13.5	17/32	22.4	28/32
14.3	18/32	22.4	28/32

El número de boquillas que se usan en la broca varía según el tamaño de esta pero normalmente se encuentran brocas con 3, 6 y 9 boquillas respectivamente.

En cuanto a las características de una broca de perforación dependen del fabricante, pero no difieren mucho de una compañía a otra ya que estas se rigen a una normativa general como las impuestas por The American Petroleum Institute (API) y deben ser certificadas incluso por la normativa ISO (International Organization for Standardization).

Las boquillas de perforación se seleccionan de acuerdo con la broca que se utiliza y a la formación a perforar. A continuación, en la tabla 5 se presenta la relación en general de las boquillas de perforación y su broca asociada.

Tabla 5.

Lista Estándar de Boquillas

LISTA ESTANDAR DE BOQUILLAS																						
DESIGNACION DE BOQUILLAS	DIAMETRO DE BROCA, mm.	Diametro del hueco de salida de la boquilla, mm.																				
		6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	22	24	25	26	28	30
R4803	130.2-154.2	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X										
R4166	155.6-171.4	X		X	X	X	X	X	X	X		X	X		X							
R4117	187.3-228.6			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X						
R3381, R11010	244.5-311.1			X	X	X	X	X	X	X		X	X		X	X	X		X			
R8519	349.2-393.7									X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Nota: Adaptado de: (Volgaburmash, 2021)

Esta clasificación es en general y se somete a variaciones según las empresas fabricantes y compañías operadoras.

3.2 Problemas operacionales con enfoque hacia las boquillas de una broca de perforación.

Las boquillas cumplen un factor importante y son la columna vertebral de la hidráulica de perforación ya que transmiten el fluido que viene desde superficie a la cara de la formación perforada permitiendo la movilidad de los recortes desde fondo a superficie y el enfriamiento de la cara de la broca, estos requerimientos pueden satisfacerse al aumentar el caudal o gasto de la bomba, sin embargo, el taponamiento de las boquillas acarrea los siguientes problemas como:

- Limpieza inadecuada de pozo
- Disminución de velocidad de penetración
- Atrapamiento de la sarta de perforación
- Aumento de presión en las bombas
- Cambio de TFA
- Incremento de costos
- Eficiencia de la broca utilizada
- Vida útil de la boquilla

3.21 Limpieza inadecuada del pozo

Una hidráulica inadecuada por un fluido o taponamiento de las boquillas genera una mala limpieza del hueco que a su vez puede producir otros problemas como:

- El empaquetamiento de la sarta debido a acumulaciones de recortes

- Depósito de recortes en fondo por mala circulación
- Disminución del ROP debido a la trituración de recortes de zonas ya perforadas

3.2.2 Aumento de presión en bombas y cambio de TFA

Cuando se presenta un taponamiento en las boquillas, la caída de presión se afecta sobrecargando el sistema de la sarta y las bombas produciendo un aumento en la presión, además el TFA al depender de la sumatoria de las áreas de descarga de las boquillas se verá afectado si alguna de estas se llega a obstruir produciéndose una disminución en el caudal de perforación lo que acarrea otra serie de problemas.

3.2.3 Eficiencia de broca utilizada

Uno de los factores fundamentales de la vida útil de una broca es la buena circulación ya que de esta depende la correcta refrigeración de esta. Cuando se genera un taponamiento de las boquillas se presenta un sobrecalentamiento de la broca y puede ocasionar que los cortadores (Broca PDC) o insertos en los conos (Broca tricónica) pierdan su afilado y su resistencia.

3.2.4 Pega de Tubería

La pega de tubería presenta uno de los problemas de perforación más comunes y graves. la gravedad puede variar de un inconveniente menor que puede causar un ligero aumento de los costos o complicaciones graves que pueden tener resultados considerablemente negativos, tal como la pérdida de la columna de perforación o la pérdida total del pozo.

Un gran porcentaje de estos casos de pegar tubería terminan exigiendo que se desvíe el pozo alrededor de la pega de tubería y se perfora de nuevo el intervalo. La prevención y corrección de los problemas de pega de tubería depende de la causa del problema, por lo tanto, para evitar corregir eficazmente los problemas de pega de tubería, es importante entender las diferentes causas y síntomas, de manera que las medidas preventivas y los tratamientos apropiados pueden ser aplicados. Si la tubería se pega, será necesario hacer todo lo posible para liberarla rápidamente. La probabilidad de que la pega de tubería sea liberada con éxito disminuye con el tiempo. Es crítico que las causas más probables de un problema de pega sean identificadas rápidamente, ya que cada causa de ser corregida con diferentes medidas un problema de pega puede ser fácilmente agravado por una reacción inapropiada.

3.2.5 Pega por Empaquetamiento

El empaquetamiento ocurre cuando las partículas pequeñas de formación caen dentro del pozo, asentándose y llenando el anular alrededor de la sarta de perforación. Ocurre generalmente alrededor de drill collar de diámetro grande y herramientas de diámetro cercano al del post como los como los estabilizadores. De esta forma el anular resulta empaquetado, pegando la tubería, si los recortes no son retirados del pozo se acumulan en este causando el empaquetamiento del pozo, generalmente alrededor del conjunto de fondo BHA, y la pegadura de la columna de perforación, este problema ocurre frecuentemente en las secciones agrandadas como donde las velocidades de los anulares son bajas en los pozos desviados los recortes y acumulan en la parte baja del pozo y pueden caer dentro del pozo causando empaquetamiento. las causas de la remoción inadecuada de los recortes del pozo son:

- Hidráulica inadecuada en el anular.
- Aumento de suspensión y transporte de los recortes hacia la superficie con una reología de los adecuada.
- Desprendimiento y obstrucción de la formación alrededor de la columna de perforación.
- Circulación insuficiente para limpiar el pozo antes de sacar la tubería o de realizar conexiones.
- Cuando se interrumpen la circulación los recortes pueden depositarse alrededor del BHA y obturar el pozo causando pega de la tubería.
- Perforación ciega sin retorno de lodo y barrido periódico inadecuado del pozo cuando se usa un lodo viscoso.
- Perforación sin circulación, cuando se da este evento las principales advertencias son:
 - Relleno de fondo después de hacer conexiones o viajes.
 - La cantidad de recortes que llegan a superficie son pequeños comparados con la velocidad de perforación.
 - Aumento de torque, arrastre y presión de bombeo.

Antes del tema es indispensable hablar de la reología de los fluidos de perforación y así poder tener un mejor punto de vista para la solución de lo planteado en nuestros objetivos, la reología cumple un papel muy importante ya que esta lo requerimos para ver los siguientes factores dentro de nuestra perforación:

- Qué tan bueno es el transporte de ripios.

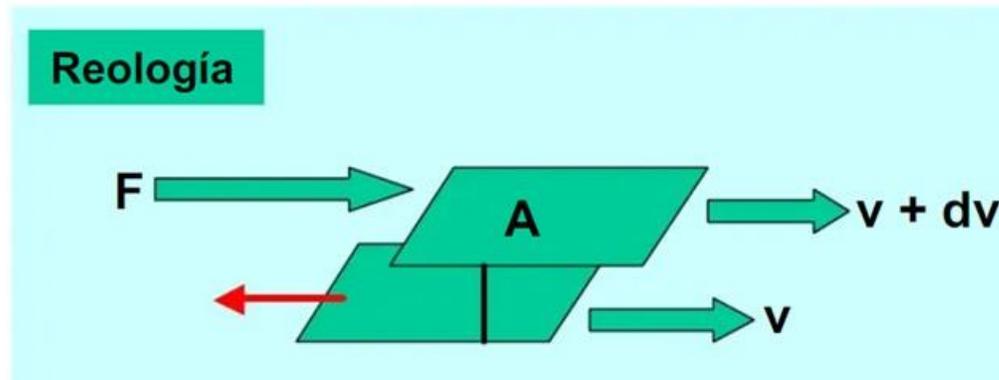
- Qué tan buena es la limpieza de los ripios en la cara de la barrena.
- Cuáles son las pérdidas de presión en el sistema.
- Cómo se comporta el sistema de fluido con los regímenes de flujo que se emplean en el pozo.

3.2.6 Incremento de costos

Recordemos que cualquier problema operacional presentado durante la perforación y que no esté considerado en el proyecto, acarreará un incremento en los costos de ejecución. El taponamiento de las boquillas de perforación ocasiona que obligatoriamente se deba hacer un viaje a superficie y este representa un tiempo improductivo para el proyecto lo que se traduce en pérdida de dinero.

4. Reología de Fluidos e hidráulica de Perforación

La reología es la rama que estudia el flujo y comportamiento de un fluido en donde se analiza principalmente la relación entre el esfuerzo de corte, la velocidad de corte y el impacto que tiene esta sobre los materiales tubulares.

Figura 2*Esfuerzo de Corte*

Nota: Adaptado de: (Rodríguez, 2021)

- La fuerza de resistencia o arrastre es el esfuerzo de corte.
- La diferencia en las velocidades dividido entre la distancia se llama la velocidad de cizallamiento.

4.1 Régimen de Fluidos

El régimen de fluidos depende de la velocidad de fluido, el tamaño, densidad, viscosidad y forma del área transversal por donde fluye. Para la perforación se hace de vital importancia conocer el régimen de flujo en el cual se encuentra el lodo bombeado y así poder evaluar el comportamiento de este.

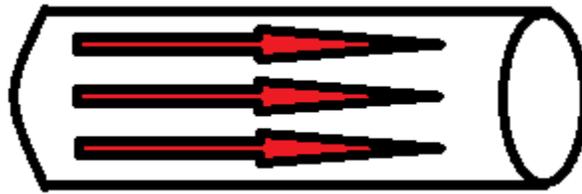
4.1.1 Flujo Laminar

El flujo laminar es un comportamiento del fluido en el cual el flujo se mueve de forma paralela a la pared de la tubería, formando consigo un perfil de velocidad parabólico. La velocidad

alcanzará su nivel máximo en centro del flujo y disminuirá a cero a medida que se acerque a la pared de la tubería, este tipo de flujo se logra con caudales y velocidades bajas.

Figura 3

Flujo Laminar

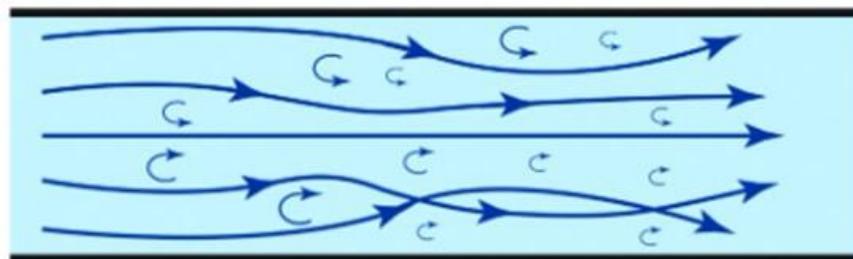


4.1.2 Flujo Turbulento

Una vez el fluido llega a flujo laminar y su caudal sigue incrementando este se descompone formando un flujo turbulento a través del espacio anular o de la tubería, generando consigo que las velocidades sean diferentes en cada punto de la tubería.

Figura 4

Flujo Turbulento



Nota: Adaptado de: (Rodríguez, 2021)

4.1.3 Flujo Transición

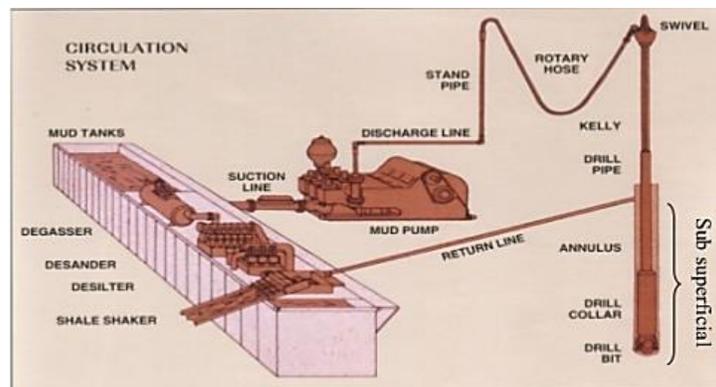
La transición de flujo laminar a turbulento es conocido como flujo transición, esto se da debido a las fuerzas viscosas e inerciales presente en el tipo de flujo, en el flujo laminar las fuerzas dominantes son las viscosas, mientras que en el flujo turbulento las fuerzas que predominan son las inerciales.

4.2 Optimización de los Aspectos Hidráulicos

4.2.1 Sistema de Circulación

Figura 5

Sistema de Circulación



Nota: Adaptado de:(Luis Soto,2018)

4.2.2 Fluido de Perforación

El fluido de perforación es una combinación de varios componentes como: agua o aceite, densificantes, viscosificantes, etc.

Entre sus funciones encontramos:

- Proveer potencia hidráulica a la broca para mantener limpio el fondo del pozo

- Transportar los recortes a superficie
- Soportar las paredes del pozo
- Prevenir la entrada de fluidos de la formación al pozo
- Lubricar y enfriar la broca de perforación

4.2.3 Tipos de Lodo de Perforación

Los lodos de perforación se clasifican en tres tipos los cuales son:

- Lodo base agua: este tipo de lodo es comúnmente el más utilizado debido a que su base de preparación es agua, esto hace que para preparar este tipo de lodo sea más económico.
- Lodos base aceite: este tipo de lodo por lo general es utilizado para perforar formaciones solubles en agua, en áreas donde se presenta pegaduras por presión diferencia o cuando se requiere una muy buena lubricación, los fluidos tipo aceite por lo general son más costosos de preparar y de acondicionar para su funcionamiento.
- Lodo de perforación aireado: este tipo de fluido no es muy común en la perforación debido a su alto costo y su principal ventaja es un incremento en la tasa de perforación.

4.2.4 Peso o Densidad del Lodo

Para determinar el peso o densidad de lodo se utiliza una balanza en la cual se agrega una muestra de lodo y esta nos dará el peso de lodo en libras por galón.

4.2.5 Viscosidad

La viscosidad es la resistencia para fluir de un fluido, esto se debe a la interna de las fuerzas de cohesión y adhesión, la viscosidad se mide en un embudo de marsch, contado el tiempo que tarda en fluir a través del embudo un cuarto de galón.

4.2.6 Presiones en el Sistema de Circulación

Pérdida de presión.

➤ Las caídas de presión en el sistema son:

$$P_{\text{Bomba}} = P_{\text{Superf}} + P_{\text{dp}} + P_{\text{dc}} + P_{\text{de barrena}} + P_{\text{adp}} + P_{\text{adc}} \quad (2)$$

➤ Reacomodando:

$$P_{\text{Bomba}} = P_{\text{Barrena}} + (P_{\text{Superf.}} + P_{\text{dp}} + P_{\text{dc}} + P_{\text{adp}} + P_{\text{adc}}) \quad (3)$$

Todas las pérdidas de presión que están del lado derecho de la pérdida de la barrena con frecuencia se llaman las pérdidas “PARÁSITAS”.

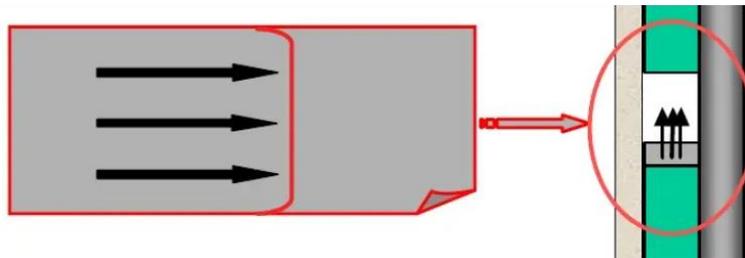
$$P_T = P_{\text{Barrena}} + P_c \quad (4)$$

4.3 Tipos de Flujo

Flujo tapón: el perfil de velocidad es igual en todo el anular, la velocidad es igual en el centro y en la pared.

Figura 6

Flujo Tapón

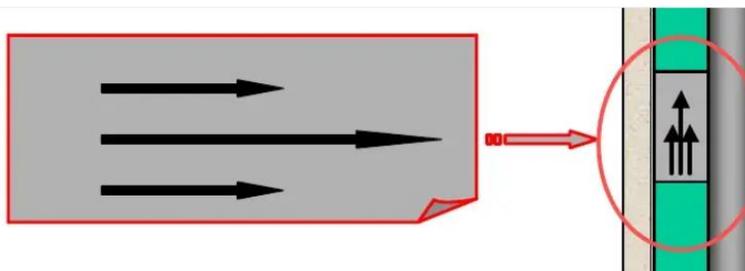


Nota: Adaptado de: (Rodríguez, 2021)

Flujo Laminar: la velocidad es máxima en el centro del anular.

Figura 7

Flujo Laminar

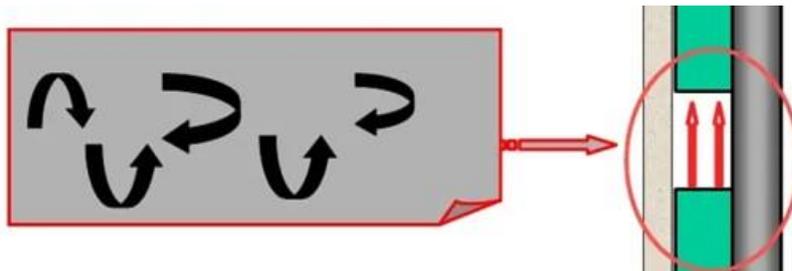


Nota: Adaptado de: (Rodríguez, 2021)

Flujo Turbulento: movimiento en remolinos en un perfil plano, velocidad promedio de partículas uniformes.

Figura 8

Flujo Turbulento



Nota: Adaptado de: (Rodríguez, 2021)

4.4 Cálculo de Caída de Presión en la Broca

En términos de boquillas de 1/32 de pulgadas.

$$\Delta P_b = \rho \left(\frac{12.51 Q}{N_1^2 + N_2^2 + N_3^2 + \dots + N_n^2} \right)^2 \quad (5)$$

Donde:

ΔP_b , pérdida de presión en la broca en psi.

Q, velocidad de bombeo en gpm.

N_n , diámetro de las boquillas en 1/32 de pulgada.

ρ , densidad del lodo en ppg.

4.4.1 TFA

El área de flujo total TFA es proporcional a la suma de los cuadrados de los distintos diámetros de boquilla, los diámetros deben darse en 1/32 de pulgadas. Para las brocas de cortadores de diamante se utiliza el área de flujo total (TFA) y así se obtiene la siguiente ecuación:

$$P_b(\text{psi}) = \frac{\rho * Q^2}{10.858 * (TFA^2)} \quad (6)$$

Donde:

P_b , pérdidas de presión de la broca (psi).

ρ , densidad del lodo en (ppg).

Q , caudal (gpm).

TFA, total fluid área (in²).

En términos de TFA (in²).

$$\Delta P_b = \rho \left(\frac{Q}{104.24 * At} \right)^2 \quad (7)$$

At , área total.

4.4.2 Velocidad de Chorro o de la Boquilla

$$V_n = \frac{418.3 * Q}{\sum D_n^2} \quad (8)$$

Donde:

V_n , velocidad de las boquillas en ft/s.

Q , caudal en gpm.

D , diámetros de las boquillas en 1/32 in.

Aunque se puede correr más de un tamaño de boquilla en una broca, la velocidad no va a ser la misma para todas.

Otra ecuación par la velocidad de las boquillas puede ser:

$$V_n = 33.4 \sqrt{\frac{\Delta P_b}{\rho}} \quad (9)$$

El área de flujo total se puede obtener así:

$$At = 0.32 * \frac{Q}{V_n} \quad (10)$$

En general los aspectos hidráulicos de la broca se optimizan para mejorar la velocidad de perforación, sin embargo, existen muchos factores que afectan la velocidad de avance:

- Tamaño de la broca.
- Tipo de broca.
- Características de la broca.
- Tipo y resistencia de la formación.
- Aspectos hidráulicos de la broca.

La optimización del equilibrio de la hidráulica del pozo nos permite un buen control de las presiones del pozo, tasa de bombeo, limpieza del pozo, presión de bombeo, ECD y la caída de presión a través de la broca.

La caída de presión y las velocidades máximas son restricciones limitadas ligadas a las capacidades del equipo de perforación.

En general la meta es usar el del 50 % al 65% de la presión de circulación máxima posible en la broca.

- Se considera que el sistema está óptimo para fuerza de impacto hidráulico cuando la pérdida de presión en la barrena se aproxima al 50%.

- Se considera que el sistema está optimizado para potencia hidráulica cuando la pérdida de presión en la barrena se aproxima al 65%. (Rodríguez, 2021)

4.4.3 Potencia Hidráulica de la Bomba

$$HHP \text{ Bomba} = \frac{(\Delta Pt * Q)}{1714}$$

Donde:

HHP, potencia hidráulica.

ΔPt , pérdida de presión total en psi.

Q, caudal de la bomba en gpm.

4.4.4 Potencia Hidráulica en la Broca

$$HHP \text{ Broca} = \frac{(\Delta Pb * Q)}{1714} \tag{12}$$

Donde:

HHP, potencia hidráulica.

ΔPb , pérdida de presión en la broca en psi.

Q, caudal de la bomba en gpm.

La potencia hidráulica tiene un intervalo recomendado para la mayoría de las brocas que oscila en 2.5 y 5.0 caballos de fuerza por pulgada cuadrada, tener una mala potencia hidráulica baja en la broca puede causar un bajo rendimiento de la broca y como consecuencia baja rata de perforación.

Hay un término que se usa en la hidráulica de perforación, este término se llama potencia hidráulica por pulgada cuadrada de área de cara de la barrena HSI por sus siglas en inglés y básicamente se obtiene al dividir la potencia en el área del diámetro del pozo.

4.4.5 Fuerza de Impacto del Chorro

La fuerza que ejerce un fluido al salir por debajo de la broca se expresa como:

$$F_i = \frac{Q * V_n * \rho}{1930} \quad (13)$$

Donde:

F_i , fuerza de impacto del chorro en libras.

Q , caudal de la bomba en gpm.

V_n , velocidad de chorro en las boquillas ft/s.

ρ , densidad del lodo en ppg.

4.5. Hidráulica de Fluidos

Se diseña para mover recortes de fluidos con eficiencia y también para enfriar la cara de la broca, estos requerimientos pueden satisfacerse al aumentar el caudal o gasto de la bomba, sin embargo, el incremento en la velocidad de bombeo del fluido (gasto) puede causar una erosión excesiva y una falla prematura en la broca.

La velocidad de penetración es función de muchos parámetros como:

- Peso sobre la broca, WOB.

- Velocidad de rotación de la broca, RPM.
- Propiedades del lodo, para evitar influjos y filtraciones excesivas a la formación.
- Eficiencia hidráulica.

Importancia de una buena hidráulica de perforación

- Remoción de recortes en espacio anular.
- Presión hidrostática para balancear la presión de poro y prevenir que se colapse el agujero de pozo.
- DEC (densidad equivalente de circulación).
- Presiones de surgencia / suabeo durante los viajes.
- Limitación de la capacidad de bombeo.
- Optimización del proceso de perforación (Max HHP consumo en la broca o máximo impacto de chorro).
- Efectos de presión y temperatura.

Limpieza de agujero

- Velocidad anular.
- Velocidad de penetración (ROP).
- Viscosidad.
- Ángulo de agujero.
- Densidad de lodo.
- Ensanchamiento del agujero por lavado (erosión).

4.6. Pérdidas de Circulación en Sistema Circulante

- Pérdida de presión en el equipo de superficie

De la bomba al “stand pipe”, manguera rotaria, top drive o Kelly, hasta la parte superior de la tubería.

- Pérdidas a través de la sarta de perforación

Pérdida en herramientas de fondo.

- PDM / turbinas.
- Absorbedores de impacto / martillos de perforación.
- MWD/LWD.
- Pérdidas de presión a través de las boquillas de la broca.
- Pérdidas de presión en el espacio anular.

4.6.1 Cálculos Básicos de Hidráulica

4.6.1.1 Velocidad de Flujo a través del Espacio Anular. V_f (ft/min)

$$V_f = \frac{24.51 * Q}{d_2^2 - d_1^2} \quad (14)$$

4.6.1.2 Cálculo de Índice de Comportamiento

$$n_a = 0.5 * \log \left(\frac{\theta_{300}}{\theta_3} \right) \quad (15)$$

Donde:

θ_{300} = medidor V-G, lectura para 300 rpm.

θ_3 = medidor V-G, lectura para 3 rpm.

4.6.1.3 Factor de Consistencia Anular (poice)

$$Ka = \frac{5.11 * \theta_{300}}{511 * n_a} \quad (16)$$

4.6.1.4 Calcular la Viscosidad Efectiva (cp)

$$\mu_{ea} = 100 * Ka \left(\frac{144 * Va}{D_2 - D_1} \right)^{n_a - 1} \quad (17)$$

4.6.1.5 Número Reynolds (Para flujo en el Espacio Anular)

$$Rn = 43.69 * MW / Eq \theta_{300} * \left[\frac{Q}{Dh^2 - Dp^2} \right]^{2-N} * [8.69 * (Dh - Dp)]^N \quad (18)$$

Laminar si RN < 2000.

Transición RN esta entre 2000 y 3000.

Turbulento si $RN > 3000$.

Donde:

R_N , número anular de Reynolds (sin dimensión).

MW, Densidad de lodo (lbs/gal).

Eq $\theta 300$, lectura de viscosímetro fann a 300 RPM.

D_h , Diámetro de agujero (in).

D_p , diámetro de la tubería (in).

N , valor “n” en la ley de potencia = $\log (\theta 600 / \theta 300) / \log (600 / 300)$.

4.6.1.6 Factor de Fricción (Anular)

$$f_a = \frac{(\log(na) + 3.93)/50}{Re_a^{[(1.75 - \log(na))/7]}} \quad (19)$$

4.6.1.7 Cálculo de la Presión para cada Sección del Pozo (Anular)

$$P_a = \frac{f_a * V_a^2 * \rho}{25.81 (D_1 - D_1)} * L \quad (20)$$

Donde:

L =longitud del intervalo en ft.

4.7 Cálculos para el Flujo Critico

El caudal de bombeo al cual el perfil de flujo en el espacio anular más pequeño pasa de laminar a turbulento es importante mantener el flujo laminar al perforar a través de formaciones mecánicamente inestables.

$$Q_c = (Dh^2 - Dp^2) * \left[\frac{R_{NC} * \theta_{300}}{43.64 \rho \{8.69 (Dh - Dp)^n\}} \right]^{\frac{1}{2-n}} \quad (21)$$

Donde:

Q_c , caudal crítico o tasa de bombeo, gpm.

R_{NC} , número de Reynolds crítico, usualmente 2,000.

Dh , diámetro del agujero en pulgadas.

Dp , diámetro de la tubería en pulgadas.

n , valor “n” de la ley de potencia.

θ_{300} , lectura del viscosímetro fann a 300 RPM.

El umero critico de reynolds se haya de acuerdo con la ecuación 18

4.7.1 Pérdidas de Presión en el Espacio Anular

Si la tasa de bombeo (caudal) está por debajo del número de Reynolds crítico en el espacio anular, el cálculo de la pérdida de presión en psi/ 1000 ft será:

$$APL = 3.75 * \theta_{300} / (Dh - Dp)^{2n-1} \left[\frac{Q}{8.69 (Dh + Dp)} \right]^n \quad (22)$$

Donde:

APL, pérdida de presión en el espacio anular (psi/1000ft).

Q, caudal o tasa de bombeo, gpm.

R_{NC} , número de Reynolds crítico, usualmente 2,000.

Dh, diámetro del agujero en pulgadas.

Dp, diámetro de la tubería en pulgadas.

n, valor “n” de la ley de potencia.

θ_{300} , lectura del viscosímetro fann a 300 RPM.

4.7.2 Pérdidas de Presión en el Espacio Anular – Flujo Turbulento

Si el gasto de flujo está por arriba del número de Reynolds crítico, el cálculo de pérdida de presión del espacio anular en psi /1000 ft será:

$$APL = \frac{163.67 * \rho * Q^2}{R_{NC} (Dh - Dp)^3 (Dh - Dp)^2} \quad (23)$$

Donde:

APL, pérdida de presión en el espacio anular (psi/1000ft).

Q, caudal o tasa de bombeo, gpm.

R_{NC} , número de Reynolds crítico, usualmente 2,000.

Dh, diámetro del agujero en pulgadas.

Dp, diámetro de la tubería en pulgadas.

ρ , densidad del lodo en lbs/gal.

4.7.2.1 Velocidad del Fluido a través de la Sarta de Perforación V_f (ft/min):

$$V_f = \frac{24.51 * Q}{d^2} \quad (24)$$

Donde:

Qc, caudal o tasa de bombeo, gpm.

d, diámetro interno de la sarta de perforación en pulgadas.

4.7.2.2 Cálculo del Índice de Comportamiento

$$n_p = 3.32 \log \frac{\theta_{600}}{\theta_{300}} \quad (25)$$

Donde:

Θ_{600} = medidor V-G, lectura para 600 rpm.

4.7.2.3 Cálculo del Factor de Consistencia de la Tubería (poise)

$$k_p = \frac{5.11 * \theta_{600}}{1022^{n_p}} \quad (26)$$

4.7.2.4 Calcular la Viscosidad Efectiva (cp)

$$\mu_{ep} = 100 * k_p * \left[\frac{96 V_p}{D} \right]^{n_p-1} \quad (27)$$

4.7.2.5 Cálculo de Re

$$Re_p = \frac{928 * V_p * D * \rho}{\mu_{ep} \left[\frac{2n_p+1}{3n_p} \right]^{n_p}} \quad (28)$$

4.7.2.6 Cálculo del Factor de Fricción

$$f_p = \frac{(\log(n_p) + 3.93)/50}{Re_p^{[(1.75-\log(n_p))/7]}} \quad (29)$$

4.7.2.7 Cálculo de la Caída de Presión para cada Sección del Hueco

$$P_p = \frac{f_p * V_p^2 * \rho}{25.81 * D} * L \quad (30)$$

La pérdida total de la presión en la sarta de perforación es la sumatoria de la pérdida de cada sección del pozo.

$$P_{pT} = \sum P_p \quad (31)$$

La optimización de la hidráulica se utiliza para dimensionar el tamaño de las boquillas de la broca de perforación para lograr una buena limpieza del hueco mediante el caballaje hidráulico máximo, maximizando la fuerza de impacto del fluido en la formación y así poder mejorar la rata de perforación.

4.8 La presión Disponible para la Boquilla se da de la siguiente forma

$$P_B = P_{MAX} - P_{aT} - P_{pT} - P_S \quad (32)$$

Donde:

P_B , pérdida de presión en la broca, (psi).

P_{MAX} , presión máxima del tubo vertical, (psi).

P_{aT} , pérdida total de presión en el anular, (psi).

P_{pT} , pérdida total de presión en la sarta de perforación, (psi).

P_s , pérdida de presión del sistema superficial, (psi).

4.9 Cálculo del Área Total Óptima de las Boquillas

$$A_t = \frac{Q}{2.96 \left[\frac{(1238.5) * C * (p_B)}{\rho} \right]^{1/2}} \quad (33)$$

Donde:

A_t , área total optima de las boquillas, (in²).

C, constante

- 0.65 para HHP máximo.
- 0.48 para fuerza de impacto máxima.
- 0.59 para una solución intermedia HHP-fuerza de impacto.

4.10 Cálculo de Tamaño de las Boquillas

$$J_1 = \left[\frac{1303.797}{N} * A_t \right]^{1/2} \quad (34)$$

$$J_3 = \left[\frac{1303.797}{N - 2} * \left(A_t - \frac{J_1^2 + J_2^2}{1303.797} \right) \right]^{1/2} \quad (35)$$

$$J_4 = \left[\frac{1303.797}{N - 3} * \left(A_t - \frac{J_1^2 + J_2^2 + J_3^2}{1303.797} \right) \right]^{1/2} \quad (36)$$

$$J_N = \left[\frac{1303.797}{1} * \left(A_t - \frac{J_1^2 + \dots + J_{N-1}^2}{1303.797} \right) \right]^{1/2} \quad (37)$$

4.11 Densidad Equivalente de Circulación ECD

ECD es la suma de pérdidas de presión en el espacio anular dividida (profundidad por factor) en unidades de campo se expresa como:

$$ECD = \frac{\sum \Delta P_a}{TVD * 0.052} + \rho \quad (38)$$

Donde:

ECD, densidad equivalente de circulación en lbs/gal.

ΔP_a , pérdida de la presión en el espacio anular.

TVD, profundidad vertical verdadera en pies.

ρ , densidad del lodo en el pozo en lbs/gal.

4.11.1 Factores que afectan la ECD

- Densidad de lodo.
- Pérdida de presión en el espacio anular.

- Geometría del agujero, viscosidad efectiva, temperatura, presión, caudal o tasa de bombeo.
- Velocidad de penetración y tamaño de los recortes.
- Eficiencia de limpieza del hueco.

4.11.2 Cálculo del ECD

Si una presión existiera en el fondo del pozo debido a la densidad esto podría generar un retraso considerable en la tasa de penetración ROP, esto quiere decir que si existen condiciones dinámicas también habrá una mayor presión de fondo ejercida por la densidad dinámica del fluido de perforación, de ahí el concepto conocido como E.C.D., en conclusión es la densidad existente dentro del hoyo cuando se circula un fluido de perforación y que se entrega en la cara de la formación que se está atravesando.

Al haber circulación en la perforación la posibilidad de arremetida o de patada de pozo son menores que cuando se realizan viajes con tubería.

El cálculo del E.C.D en fondo de pozo, se podrá obtener por la siguiente ecuación:

$$E.C.D = \rho_o + \frac{\sum \Delta P}{0.052 * TVD} \quad (39)$$

Donde:

ρ , densidad original del fluido, ppg.

ΔP , pérdida de presión por fricción anular, psi.

TVD, profundidad vertical verdadera, ft.

4.12 Pérdida de la Presión dentro de la Tubería

Suponiendo flujo turbulento dentro de la sarta o número de Reynolds mayor a 2100.

$$P_p = \frac{f_p * V_p^2 * \rho}{25.81 * D} * L \quad (40)$$

Donde:

P_p , pérdida de presión en la tubería en psi.

F_p , factor de fricción para la tubería.

ρ , densidad del lodo en ppg (lbs/gal).

V_p , velocidad promedio dentro de la tubería en pies/seg.

D , diámetro interno de la tubería de perforación en pulgadas.

L , longitud de la tubería en pies.

4.13 Pérdidas de Presión en Boquillas de la Broca

$$\Delta P_b = \frac{156 * Q^2 * \rho}{[\sum D_n^2]^2} \quad (41)$$

Donde:

ΔP_b , pérdida de presión en la barrena en psi.

Q , caudal o tasa de bombeo en galones por minuto, gpm.

D_n , diámetro de las boquillas en 1/32 de pulgada.

ρ , densidad de lodo en ppg.

4.14 Otras Aplicaciones de la Hidráulica

- Para calcular las velocidades de asentamiento de los recortes con o sin circulación.
- Para cálculos de surgencia y suabeo.
- Para calcular velocidades seguras en corrida de sarta de perforación y revestimiento.
- Para calcular la máxima velocidad de penetración para un gradiente de fractura dado.

4.14.1 Máximo caballaje hidráulico

La máxima potencia posible de una broca se debe al caudal de lodo y tamaño de boquillas de estos dos parámetros depende la transmisión de la máxima presión disponible en la broca.

La potencia hidráulica del fluido de perforación en la broca es el indicador de la capacidad de limpieza del hueco y se expresa como:

$$P_{Hb} = \frac{\Delta p_{bq}}{1.714} \quad (42)$$

Donde:

P_{Hb} , poder hidráulico de la broca, hp o w

La constante 1.714 pasa a ser 1 en el SI

La caída de presión se define como:

$$P_p = (m+1)cq^m = (m+1)\Delta p_d \quad (43)$$

$$\Delta P_d = \frac{P_p}{m + 1} \quad (44)$$

Donde:

m= contante teórica igual a 1.75

Pp =presión parasita

Por lo tanto, el caballaje hidráulico es máximo cuando la presión parasita de bit es (1/m+1) veces la presión de bomba como se observa en la siguiente ecuación:

$$\Delta P_b = p_p - \Delta p_d = p_p - \frac{p_p}{m + 1} = \frac{m}{m + 1} p_p \quad (45)$$

4.14.2 Máxima fuerza de impacto de chorro

Para obtener una máxima fuerza de impacto de chorro para limpiar el pozo se debe elegir el caudal de lodo y el tamaño de boquilla.

las condiciones para el máximo impacto de chorro también se pueden derivar de Kendall y Goins (1960), obteniendo la siguiente ecuación.

$$F_j = 0.01823 C_{dq} \sqrt{\rho(p_p - cq^m)} \quad (46)$$

Por lo tanto, la fuerza de impacto de chorro es máxima cuando la caída de presión parasita es (2/m+2)

$$\Delta p_b = p_p - \Delta p_d = p_p - \frac{2 p_p}{m + 2} = \frac{m}{m + 2} p_p \quad (47)$$

4.14.3 *Máxima velocidad de chorro*

La velocidad máxima de chorro está dada por la siguiente ecuación

$$v_n = C_d \sqrt{\frac{p_p - cq^m}{8.074 \times 10^{-4} \rho}} \quad (48)$$

Esta ecuación la velocidad de la boquilla se puede aumentar reduciendo el caudal de modo que se reduzca la pérdida de presión parásita. En aplicaciones de campo, la tasa de flujo se establece en la tasa de flujo mínima determinada por la velocidad anular mínima requerida para levantar los recortes

la mayoría de la gente usa la potencia hidráulica máxima de la broca o el criterio de fuerza de impacto hidráulica de la broca en profundidades poco profundas a medias y luego cambia a la velocidad máxima de la boquilla a profundidades más profundas.

Entre la potencia hidráulica máxima de la broca y el criterio de fuerza de impacto hidráulica de la broca máxima, ninguno de los criterios ha demostrado ser mejor en todos los casos porque hay poca diferencia en la aplicación de los dos procedimientos. Si la fuerza de impacto del chorro es máxima, la potencia hidráulica estará dentro del 90% del máximo y viceversa. Otro argumento es que en muchos casos las brocas proporcionan un sistema hidráulico superior al requerido, por lo que se enmascaran los efectos del diseño con diferentes criterios. (Gulf Professional Publishing, 2011)

4.15 **Problemas y síntomas de mala limpieza de hueco**

Los problemas relacionados con la limpieza ineficiente en la barrena incluyen:

- Disminución de la vida de la broca.
- Velocidad de penetración más lenta, resultante de moler nuevamente los recortes ya perforados.
- Asentamiento de recortes en el fondo del pozo durante los viajes cuando la bomba se encuentra apagada.
- Formación de puentes en el espacio anular del pozo lo que puede contribuir a pegas del BHA.
- Aumento de la densidad el fluido que se encuentra en el anular y que a su vez trae consigo un aumento en la presión hidrostática.

La limpieza eficiente del pozo se genera proporcionando buenas características del lodo de perforación y la suficiente velocidad de circulación en el espacio anular.

5. Propuesta de diseño de boquillas

Para este diseño se utilizó el SolidWorks que es un software para el diseño asistido por computadora 3D, que a su vez genera plano 2D, este software ofrece la posibilidad de crear, diseñar, simular, fabricar, publicar y gestionar los datos generados en el proceso del diseño.

5.1 Historia y Evolución

Fue fundada en 1993 por Jon Hirschtick con sede en Massachusetts. Con En el año 1995 lanzó su primera versión del CAD 3D al mercado y en 1997 fue adquirida por Dassault Systèmes convirtiéndose en una filial de ésta. Antes de que SOLIDWORKS Corp. se convirtiera en filial

de Dassault Systèmes, la industria necesitaba de un software que combinara el modelado en 3D con la facilidad de uso del escritorio.

En 1993, el fundador de SOLIDWORKS, Jon Hirschtick, contrató a un equipo de ingenieros con el objetivo explícito de hacer que la tecnología CAD 3D fuera más accesible para todos. Y así lo hicieron desarrollando la primera tecnología de CAD en 3D que se ejecutaba en la plataforma de Windows. En el año 1995 lanzaron su primera versión del CAD 3D al mercado y en dos meses la herramienta ganó reconocimientos por su facilidad de uso. En 1997 eDassault Systèmes S.A. adquirió SOLIDWORKS como filial por 310 millones de dólares.

SOLIDWORKS ofrece un conjunto de herramientas para crear, simular, publicar, maximizando la innovación y la productividad de los recursos de ingeniería. manteniendo su propuesta inicial a facilitar el uso de la herramienta, creando nuevos productos que resuelven situaciones específicas dentro del proceso de desarrollo del producto.

SOLIDWORKS Cuenta con un conjunto de herramientas para ser más eficaz y productivo en el desarrollo de productos en todos los pasos del proceso de diseño.

La solución de SOLIDWORKS incluye cinco líneas de productos diferentes:

1. Herramientas de diseño para crear modelos y ensamblajes.
2. Herramientas de diseño para la fabricación mecánica, que automatiza documentos de inspección y genera documentación sin planos 2D.
3. Herramientas de simulación para evaluar el diseño.
4. Herramientas que evalúan el impacto medioambiental del diseño.
5. Herramientas que reutilizan los datos de CAD en 3D para simplificar el modo en que las empresas crean, conservan y utilizan contenidos para la comunicación técnica.

6. Finalmente, todas estas herramientas están respaldadas por SolidWorks PDM para gestionar y controlar de forma segura los datos mediante una única fuente de datos reales de sus diseños y SOLIDWORKS Manage, una herramienta que gestiona los procesos y proyectos implicados en todo el desarrollo del producto y está conectado al proceso de diseño.

Como ya se conoce, la hidráulica de perforación es de vital importancia para la eficiencia de la perforación, es importante para el buen manejo de la hidráulica contar con componentes eficientes que brinden manejo del fluido de perforación y así poder entregar la máxima potencia posible en la broca y generar una buena limpieza de pozo.

Uno de los componentes vitales de la hidráulica y de la perforación eficiente es la velocidad de chorro y la presión entregada en la broca, está a través del transcurso de los años se ha manejado con la combinación de las boquillas las cuales son las encargadas de generar el diferencial de presión en la broca y las responsables directas de la hidráulica broca- formación, por lo cual las boquillas o jet son de vital importancia; por consiguiente si estas fallan todo el sistema de hidráulica se verá afectado y por supuesto el avance en la perforación.

Mediante el análisis del funcionamiento de las boquillas fueron identificados varios problemas que se presenta hoy en día en los campos si estas se llegan a taponar, el cual es el defecto que presentan estas y que puede acarrear la siguiente serie de problemas:

- Limpieza inadecuada de pozo
- Disminución de velocidad de penetración
- Atrapamiento de la sarta de perforación

- Aumento de presión en las bombas
- Cambio de TFA
- Cambio de ROP
- Incremento de costos
- Eficiencia de la broca utilizada
- Taponamiento de boquillas
- Disminución de velocidad de penetración
- Atrapamiento de la sarta de perforación por mala circulación
- Prevención de suabeo y surgencia
- Reducción de la vida útil de una boquilla

Los problemas reflejados debido al taponamiento generan una baja eficiencia en la perforación además de que incrementa los costos de esta, por consiguiente, se plantea una solución para mejorar estos problemas y generar una herramienta más eficiente, que permitirá solucionar el problema de taponamiento y además generar un rango de posibilidades por así decirlo en la caída de presión de la broca con el fin de mejorar la perforación.

Cuando una o varias boquillas se obstruyen y no se pueden destaponar con medidas tomadas desde la cabina de perforación y la limpieza o eficiencia de la perforación se ve afectada, se debe sacar la tubería de perforación hasta tener la broca en la plataforma con el fin de proceder a la limpieza de estas, por lo tanto, se plantea una solución para evitar el viaje de tubería por boquillas taponadas.

En el caso de perforaciones blandas es conveniente tener una menor velocidad de chorro y un mayor flujo de lodos, al contrario de las formaciones duras la cual necesitan un mayor impacto

de chorro para ayudar a fracturar la formación junto a la broca, esto es una limitación que se genera hoy en día en las brocas de perforación debido a que la velocidad de chorro, potencia hidráulica e impacto de chorro depende directamente del diámetro de las boquillas y ser de un diámetro fijo no permite variaciones en la velocidad de chorro, potencia e impacto en tiempo real (sin tener que sacar la broca para cambiar boquillas), entonces una de las soluciones que permite el diseño de una nueva boquilla es la variación de los parámetros mencionados anteriormente y la caída de presión en la broca los cuales son de gran importancia.

Teniendo en cuenta lo descrito anteriormente se decide plantear una solución a estos problemas con la propuesta de una nueva boquilla aplicando una herramienta tecnológica de diseño 3D como SOLIDWORKS la cual permitirá darles una salida a los problemas identificados anteriormente.

A esta boquilla en este proyecto se le denominará Queen Nozzle la cual se expondrá a continuación, con sus respectivas partes y su funcionamiento; además como se generó su diseño en el programa mencionado anteriormente.

5.2 Partes de la Boquilla “Queen Nozzle”

En la figura 19 podemos observar el resultado final

Figura 9

Partes de la boquilla "Queen Nozzle"

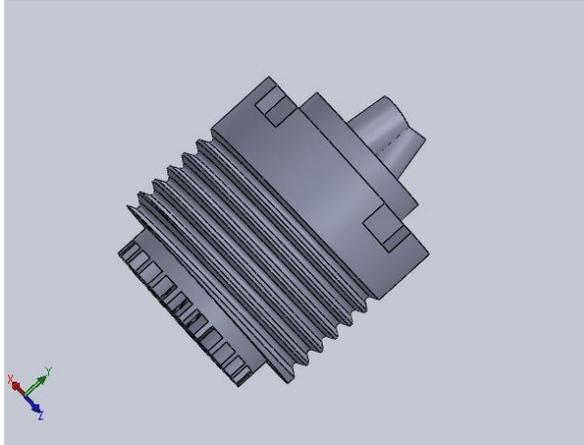


Figura 10

Esquema interno de la boquilla

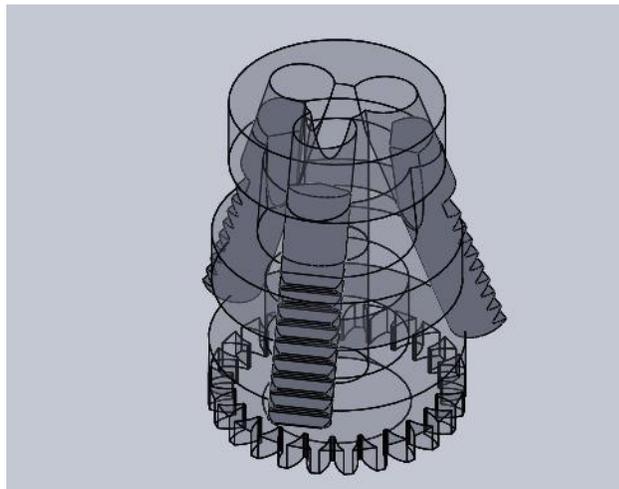
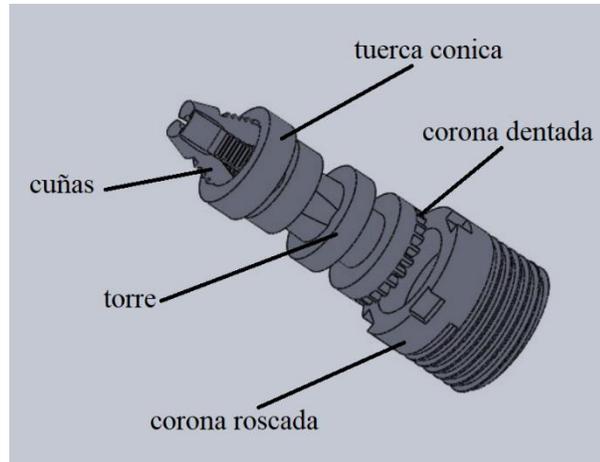


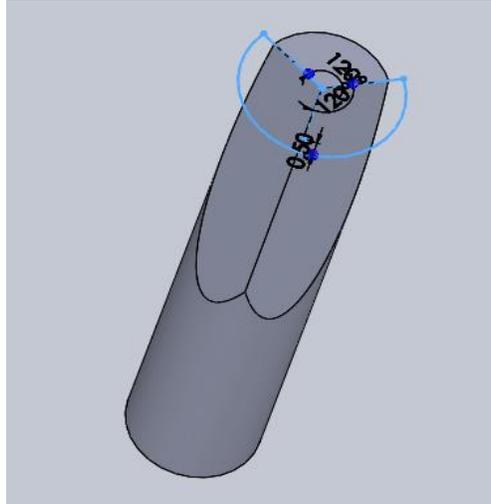
Figura 11

Desglose del diseño



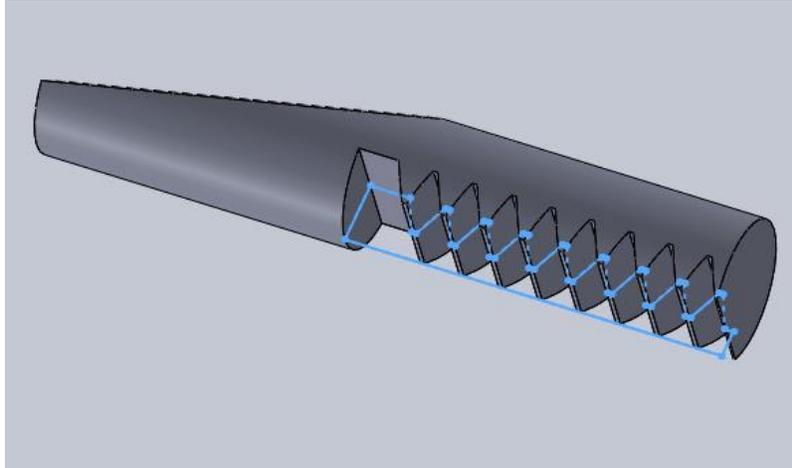
5.2.1 Cuñas

Las cuñas es la pieza fundamental para general el cambio de diámetro, esta es una pieza cilíndrica de 20 mm de largo y un radio de 2.2 mm con dos cortes laterales de 120 grados que inicia desde el centro de la circunferencia superior y se desvían en forma recta hasta un lateral de esta, dando consigo en la parte superior 120 grados de la circunferencia original como se puede ver en la Figura 22.

Figura 12*Cuña*

Luego de generarse este corte se procede a realizar la rosca que permitirá el movimiento de la cuña, la cual se realiza siguiendo parámetro de fabricación de rosca, según las normas UNS que se encuentra en el capítulo once del diseño de máquinas de Robert Inorth.

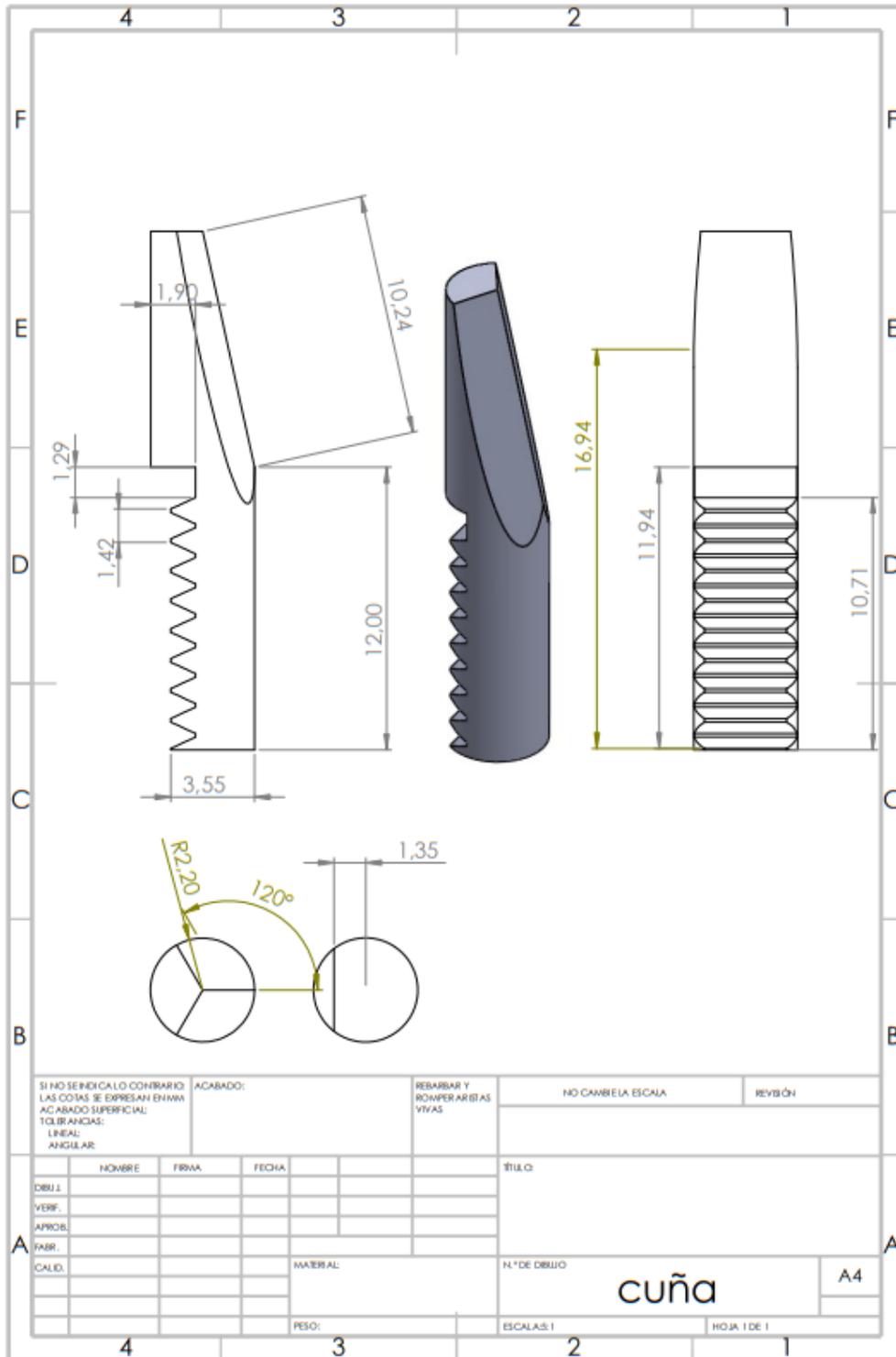
Según las tablas de diseño de máquinas se toma un paso de rosca 1.27 mm y 18 pasos por pulgada.

Figura 13*Cuña Perfil*

Una vez realizado este corte se procede a generar el plano de la pieza en un formato de tipo A4 como se muestra a continuación en la figura 24.

Figura 14

Formato A4 Cuña

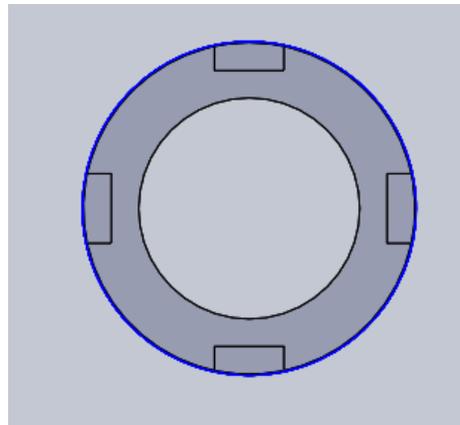


5.2.2 Corona

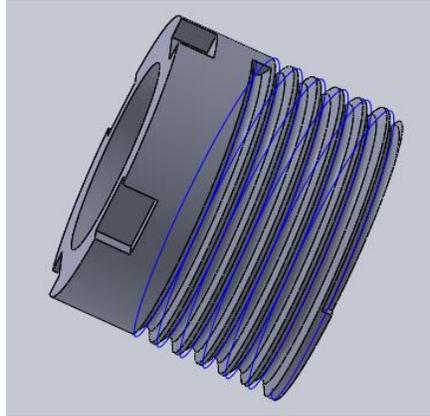
La corona es una camisa fija que se ajusta a la broca y la cual permite que el sistema que da paso a las cuñas para su salida funcione correctamente. La corona es una pieza cilíndrica de 23.8 mm de diámetro y 19.5 mm de largo, con un corte cilíndrico generado desde su centro hasta la profundidad de la pieza con un diámetro de 15.88 mm y cuatro cortes laterales rectangulares cada uno a 90 grados de la circunferencia original de 5 mm de ancho, 1.78 mm de largo y 5 mm de profundo como se ve en la figura 25.

Figura 15

Corona Vista Superior



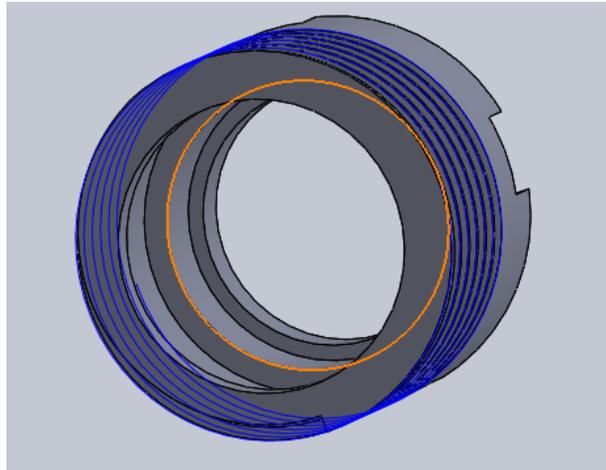
Luego se genera la rosca siguiendo los lineamientos del libro de diseño de máquinas de Robert Inorth, con 6 hilo en 13.5 mm de profundidad.

Figura 16*Rosca de la Corona*

Luego se genera dos cortes cilíndricos intermedios uno para sujetar la tuerca y el otro para permitir el desplazamiento completo de las cuñas, la tuerca cuenta con un diámetro de 20.64 milímetros y una profundidad de 5 mm y para el corte de desplazamiento de la cuña se realiza con un diámetro de 17.76 mm y una profundidad de 7.35 mm como se puede ver a continuación en la figura 27.

Figura 17

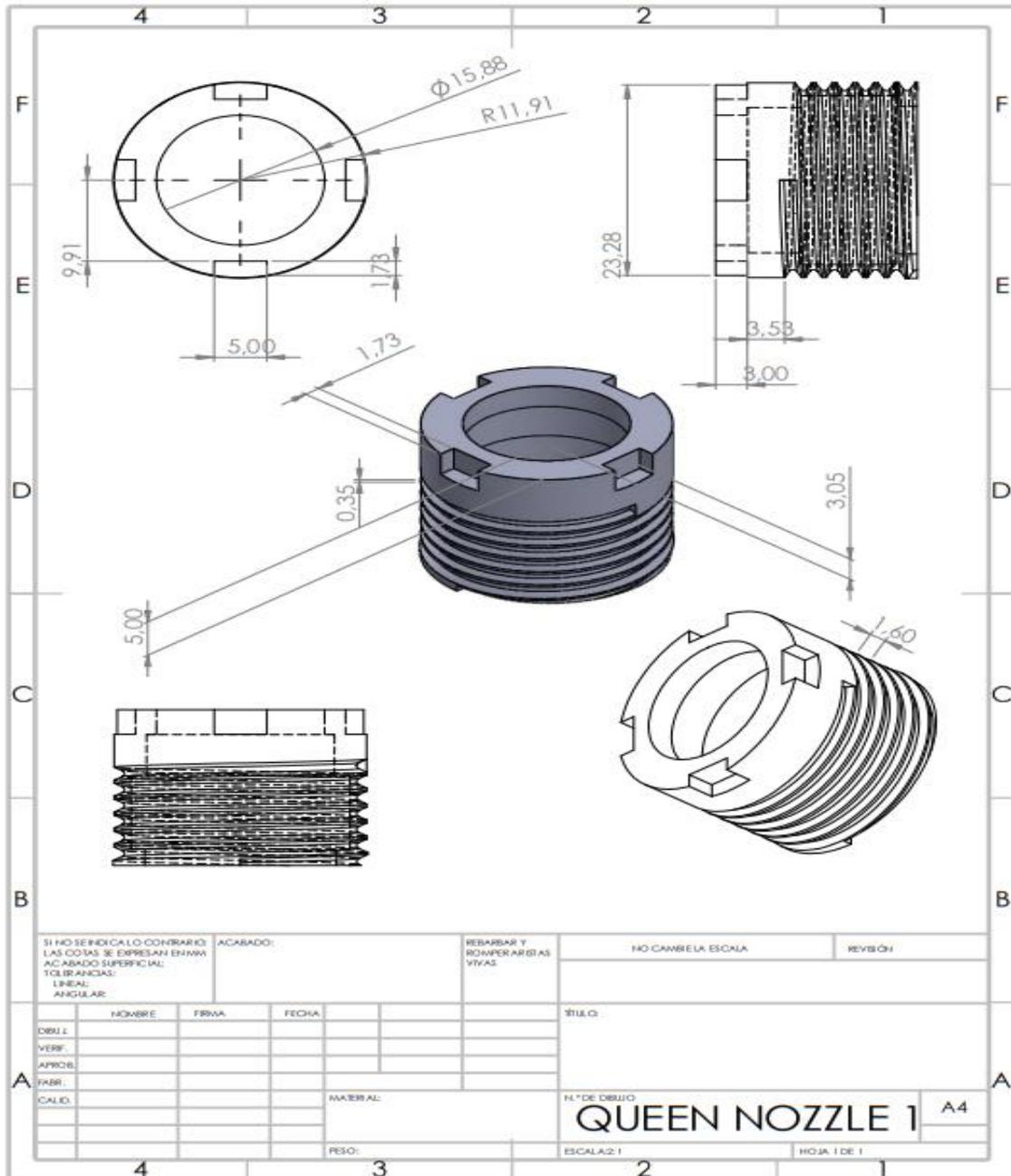
Corona Vista Interna



Una vez terminada la rosca se genera el diseño de esta en planos formato de tipo A4 como se puede apreciar en la Figura 28.

Figura 18

Formato A4 de la Corona



5.2.3 Torre

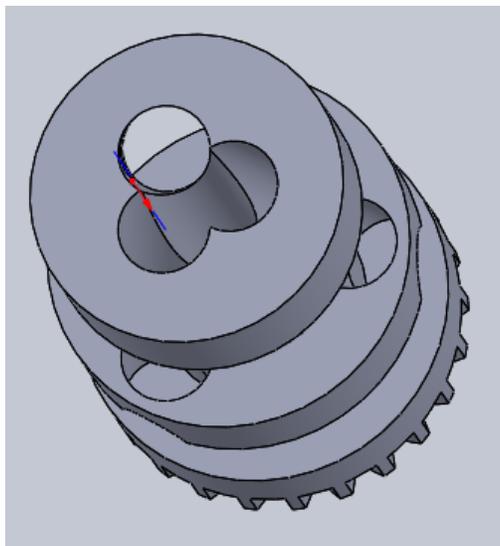
La torre es una pieza de tres secciones que permite la guía de las cuñas para el cambio de diámetro, en la primera sección que se ubica en la parte superior permite la guía y ubicación de las cuñas cuando estas salgan de la parte interna de la boquilla, al contrario, la sección dos que se encuentra ubicada en la parte media de la torre permite la guía de las cuñas cuando estas ingresen a la boquilla.

La sección inferior de la boquilla cumple una de las funciones más importantes de ya que esta conecta con el motor de rotación que generara que esta rote para activar el mecanismo de la rosca que permitiré ingresar o sacar las cuñas de la boquilla.

Esta pieza cuenta con tres perforaciones guía para las cuñas de un diámetro de 4.54 mm que atraviesa la sección superior (diámetro de 15.08 mm) y media (diámetro de 17.46 mm) de la torre.

Figura 19

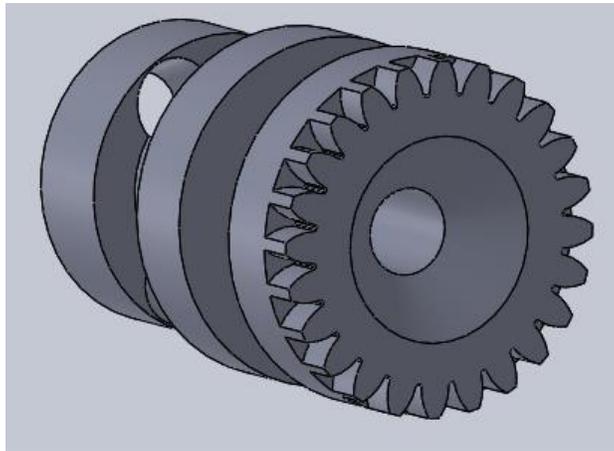
Torre



En la parte inferior de esta encontramos una corona dentada que permite transmisión de potencia del motor a la torre, esta corona cuenta con 25 dientes de piñón con un paso entre piñones de 2.33 mm, tomado según libro de diseño de máquinas de Robert Inorth.

Figura 20

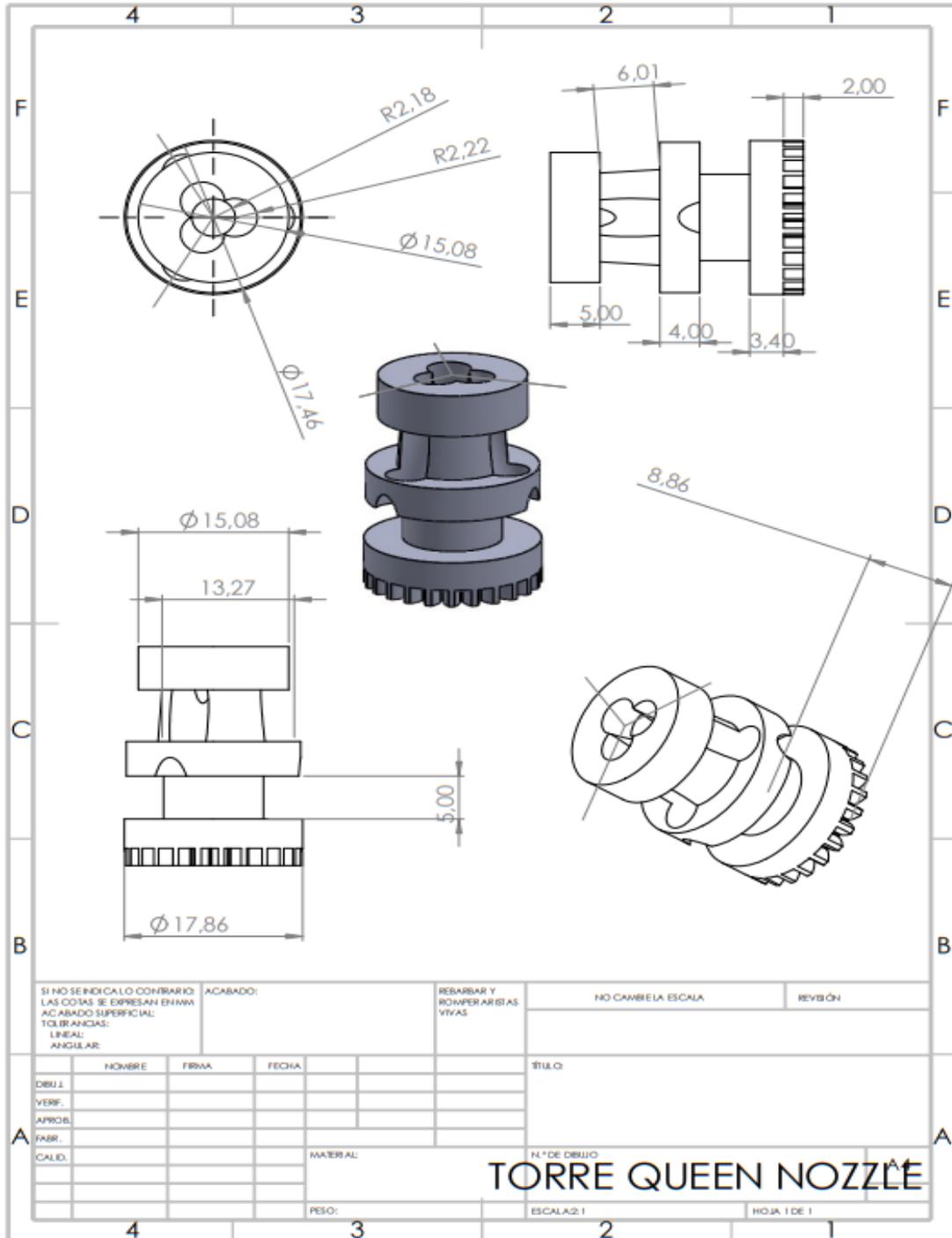
Corona Dentada de la Torre



Esta torre cuenta con una perforación central de un diámetro 5.5 mm el cual será reducido con la ayuda de las cuñas.

Figura 21

Formato A4 de la Torre

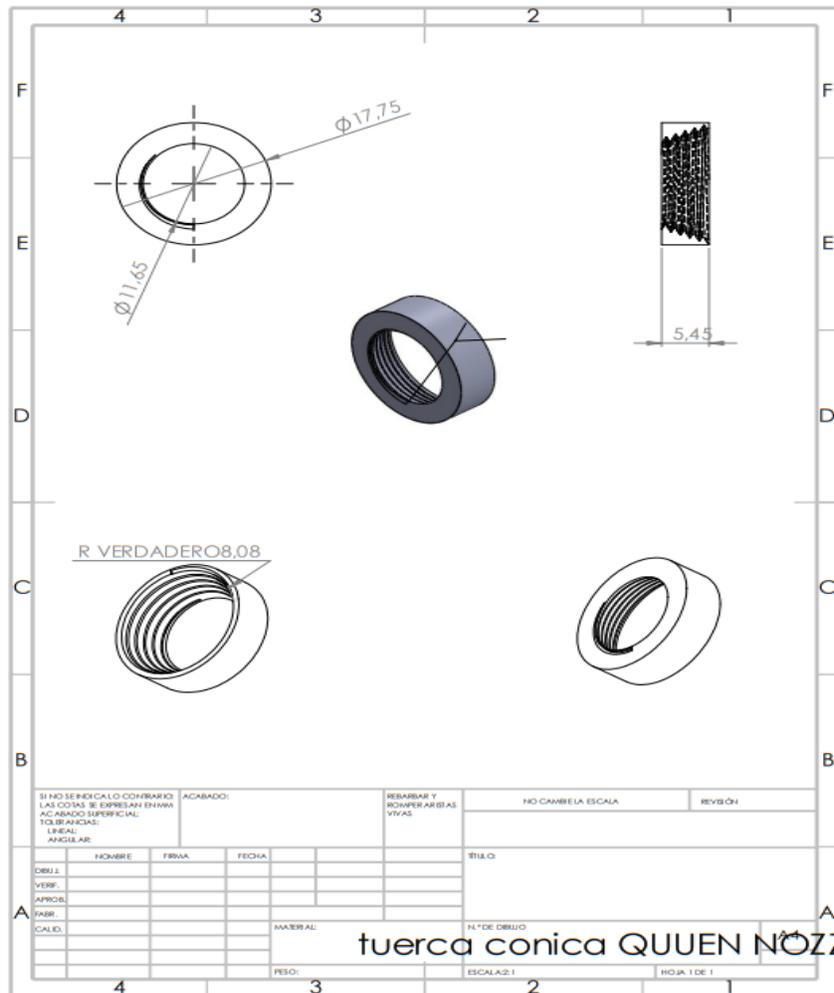


5.2.4 Tuerca Cónica

Es una tuerca de geometría circular la cual ingresa a presión a la Queen Nozzle y se ubica en el medio de la parte superior y media de la torre, su rosca se caracteriza por ser espiralada que permite el movimiento de las cuñas como se muestra en las siguientes figuras, con su respectivo ensamblaje total.

Figura 22

Formato A4 de la Tuerca Cónica



Parámetros que vararían con el cambio de diámetro.

Los parámetros que se afectan directamente con el cambio de diámetro son:

- Las pérdidas de presión en la boquilla.
- ECD.
- Potencia hidráulica en la broca.
- Fuerza de impacto de chorro.
- TFA.
- ROP.
- Total área de flujo.

Todos los componentes son de gran importancia para el ajuste del diámetro ya que el mecanismo si integra de tal forma que para la reducción del diámetro todas las piezas tienen participación debido a que la corona y la rosca cónica forman un case único generando consigo que estas dos piezas queden como la parte estática de la boquilla y como case para sujetar la torre, la torre es la encargada de transmitir el movimiento generado por el motor a través de la corna dentada que permitirá activar el mecanismo cuña-tuerca roscada-corona y así generar el desplazamiento de las cuñas. Esta boquilla está diseñada para funcionar en dos diámetros, uno mayor de 6 mm y uno menor de 3mm, su ajuste se genera de forma remota desde superficie a través de pulsos binarios que se transmitirán por el lodo hasta la broca donde se tendrá un receptor que leerá, decodificará los pulsos para activar los motores, estos motores a su vez estarán conectados a una turbina generadora para su alimentación en el momento de su funcionamiento.

5.3 Ventajas y Desventajas de la Boquilla “Queen Nozzle”

Ya que el diámetro de la boquilla se puede ajustar a nuestro requerimiento, claro está que esa variación depende del número o tamaño de la boquilla encontramos muchas ventajas tanto técnicas como económicas.

Ventajas:

- Usando la boquilla estándar se hace necesario realizar un viaje a superficie cada vez que queramos cambiar el diámetro de la boquilla o cuando esta se haya taponado, con esta propuesta la mayoría de estos viajes se vuelven innecesarios y más ocasionales, debemos recordar que cuando no hay avance en la perforación; evento que se presenta en un viaje a superficie, se vuelve un tiempo muerto lo cual se traduce en dinero que la operadora gastará obligatoriamente, si disminuimos esos viajes a superficie será dinero que se ahorrará o se dispondrá para otros propósitos.
- Ajuste de la velocidad de chorro que impacta la formación.
- Mejora la eficacia del desarrollo de la hidráulica del proyecto ya que podremos ajustar la presión en el fondo de pozo.
- En caso de taponamiento de la boquilla hay una posibilidad de lograr destaparla con el movimiento de las cuñas, las cuales pueden mover el tapón y con el flujo presente retirarlo.
- Las variables en la hidráulica podrán ajustarse en un rango determinado según la dimensión de la boquilla que se esté usando.

Desventajas

- La boquilla se puede usar a partir de una broca de 10 in de diámetro debido al tamaño de sus componentes, además se requiere un espacio extra en la broca para incorporar los elementos que son necesarios para su funcionamiento.
- El diámetro máximo de la boquilla está determinado por la parte posterior de la misma.
- La existencia de partes móviles puede ocasionar problemas como pérdida de partes o rupturas.
- El valor de adquisición de la boquilla propuesta es superior al de las boquillas estándar, pero teniendo en consideración la relación costo/beneficio, esta desventaja podría pasarse por alto.

6. Conclusiones

A partir del diseño realizado podemos evidenciar que sí es posible el cambio de diámetro de la boquilla para la broca, sin embargo, existe una limitante del espacio requerido por los elementos necesarios para el funcionamiento de nuestra propuesta, por esta razón según nuestros esquemas y de acuerdo con la (Tabla 5) presentada en el documento es posible aplicarse esta tecnología en brocas de un rango de tamaño a partir de 10 pulgadas (in) hacia diámetros mayores ya que el diámetro externo de la boquilla propuesta es de 7/8 de pulgada.

El diseño se puede escalar en su tamaño según se requiera ya que se realizó de acuerdo con medidas verdaderas de boquillas usadas en la industria, necesariamente se debe mantener las medidas de nuestra propuesta como uno de los menores tamaños posibles ya que en medidas

inferiores a 7/8 de pulgada (diámetro externo de la boquilla) los componentes de la boquilla podrían presentar fallas y requerirían de un ajuste en el diseño.

Mediante el cambio de diámetro de boquilla se ven afectados parámetros de gran importancia en la perforación que puede utilizarse a favor de la perforación y así poder disminuir tiempos y costos.

7. Recomendaciones

Teniendo en cuenta el mecanismo de funcionamiento de la boquilla presentada se recomienda realizar investigación y estudios asociados a la forma de comunicación y accionamiento de esta, como propuesta se puede partir de las siguientes sugerencias; para el mecanismo de comunicación entre la superficie y la boquilla recomendamos usar el sistema implementado por las herramientas MWD (Measurement While Drilling) las cuales mediante pulsos en el lodo envían información hacia superficie sobre los parámetros de navegación de la perforación.

Como medio de acción de la boquilla sugerimos usar un motor de baja potencia ya que no es necesaria una fuerza elevada debido a que no existe ninguna resistencia considerable en contra del giro de la torre de la boquilla la cual produce el aumento o disminución del diámetro.

Se requerirá la creación de un prototipo para generar pruebas en laboratorio y así comprobar el funcionamiento entre el sistema de comunicación y las boquillas, para

posteriormente recolectar datos de funcionamiento y tomar medidas correctivas para la solución de problemas que pueda presentar o correcciones en el diseño del prototipo.

Referencias bibliográficas

ASEEDER. 2021. *Tungsten Carbide Jet Nozzles*. [online] Disponible en: <https://www.aseedercarbide.com/sale-13987551-tungsten-carbide-water-jet-nozzles-with-hexagonal-thread.html>

Baker Hughes, I. (1995). *Drilling engineering workbook*. Houston - TX.

Drilling Contractor. (2014). *Rolling pdc cutter enhances drill bit life in granite Wash Runs*. [Online]. Disponible en: <https://www.drillingcontractor.org/rolling-pdc-cutter-enhances-drill-bit-life-in-granite-wash-runs-29798>

González, A., Jara, M., Ramírez, L. and Malavé, K. (2010). *Diseño del programa de brocas requerido para perforar el pozo direccional*. [Online]. Disponible en: <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/15848/1/Dise%C3%B1o%20del%20Programa%20de%20BROCAS.pdf>

Grupo de Investigación Perforación. (2011). *Estado del arte de brocas de perforación*. Universidad de América. [Online]. Disponible en: <http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/784/1/1034302975-2011-2-IP.pdf>

Guo, Boyun Liu, Gefei. (2011). *Applied Drilling Circulation Systems - Hydraulics, Calculations, and Models*. Elsevier. Retrieved from

<https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpADC SHCM1/applied-drilling-circulation/applied-drilling-circulation>

Haro Ruiz, W. (2013). *Metodología para la selección de brocas del campo Cuyabeno-VHR*. Ingeniero de Petróleos. Escuela Politécnica Nacional.

León Padilla, M. (2012). *Elaboración de un manual sobre selección y utilización de brocas de perforación que se emplean en la industria petrolera*. Quito.

Narváez Romero, J. (2013). *Mejoras al proceso de mantenimiento a herramientas para la medición durante la perforación de pozos petroleros*. México D.F.

Rodríguez, A. (2021). *Hidráulica de la perforación*. [Online]. Disponible en: HTTPS://WWW.ACADEMIA.EDU/10080839/HIDRAULICA_DE_LA_PERFORACION

Rosero Muñoz, F., & Toscano Freire, J. (2021). *Diseño y optimización de la perforación horizontal en las secciones 8 ½" Y 6 ⅛" con el uso de Brocas Smith International*. Quito-Ecuador.

Society Of Petroleum Engineers Journal. 1983. *The Effect of Nozzle Diameter on Jet Impact for a Tricone Bit*. New Orleans:

The Schlumberger Oilfield Glossary. (2021). *Schlumberger*. [Online]. Disponible en:
<https://www.glossary.oilfield.slb.com/>

TDS. 2021. *Tungsten Carbide Nozzel*. [online] Disponible en:
<http://www.tdsfluid.com/plus/view.php?aid=402>

Volgaburmash. (2021). *Catalogue products for mining industry*. [Online] Disponible en:
<https://marchigiorgio.com/wp-content/uploads/2016/01/catgorn.pdf>

Willersrud, Anders & Imsland, Lars & Blanke, Mogens & Pavlov, Alexey. (2015). Early Detection and Localization of Downhole Incidents in Managed Pressure Drilling. 10.2118/173816-MS.