

# SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

Desarrollo de una Herramienta Computacional para Diseñar Brocas PDC

Cristian Camilo Fuentes Medina y Cristian Alberto Gómez Gómez

Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero de petróleos

Director:

Maika Karen Gambus Ordaz

PhD. En Ingeniería de Petróleos

Codirector:

Wilson Raúl Carreño Velasco

Magíster en Diseño, Gestión y Dirección de proyectos

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico Químicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Bucaramanga

2021

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

### **Dedicatoria**

A todas aquellas personas que hicieron posible, directa o indirectamente, este trabajo investigativo, los consejos y acompañamiento de los docentes, el apoyo de nuestros compañeros y amigos, las intervenciones de múltiples profesionales que aportaron forma y detalles, a nuestras madres por siempre estar con nosotros y darnos las herramientas para cumplir esta meta y por último a nosotros mismos por no decaer con las dificultades y siempre tener la fortaleza de continuar.

**Agradecimientos**

Agradecemos de manera atenta al Grupo de Investigación de Estabilidad de Pozos (GIEP), por todo el apoyo brindado a lo largo del desarrollo del proyecto, a la empresa DrillScan por brindar la licencia de su software Bitscan que fue una significativa guía para la realización de nuestra investigación y a la Universidad Industrial de Santander por brindar todas las herramientas y espacios que dieron como resultado la culminación de este proceso.

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

**Tabla de Contenido**

Introducción .....	11
1. Objetivos .....	13
2. Marco teórico .....	14
2.1 Definición y funcionamiento.....	14
2.1.1 Antecedentes de la perforación.....	14
2.1.2 Principios de corte.....	16
2.2 Tipos y clasificación de las brocas.....	17
2.2.1 Brocas tricónicas .....	18
2.2.2 Brocas de cortadores fijos PDC .....	25
2.3 Antecedentes en el diseño .....	33
2.4 La roca y sus propiedades mecánicas .....	36
2.4.1 Elasticidad de la roca y sus parámetros.....	37
2.4.2 Resistencia mecánica de la roca.....	39
2.4.3 Resistencia a la compresión uniaxial (UCS) .....	40
3. Diseño de brocas de perforación PDC .....	42
3.1 Resistencia a la compresión uniaxial y el uso de correlaciones .....	43
3.1.1 Porosidad.....	43
3.1.2 Mecánica de la roca y su interacción con la variación de la porosidad. ....	44
3.1.3 La saturación y su efecto en las propiedades mecánicas .....	45
3.1.4 Densidad y su relación con las propiedades mecánicas.....	46
3.2 Métodos para la selección de brocas .....	47
3.2.1 Selección por método de energía específica.....	48
3.2.2 Selección por reporte de broca.....	49
3.2.3 Selección de broca usando UCS.....	50
4. Metodología y elaboración de una herramienta computacional para el diseño de brocas PDC.....	59
4.1 Elección del lenguaje de programación .....	60
4.1.1 Características de los lenguajes de programación más usados .....	62
4.1.2 Python como lenguaje de alto nivel.....	65
4.2 Selección del método para la interfaz de diseño .....	67
4.2.1 Perfil de la broca .....	68
4.2.2 Diámetro de los cortadores.....	69
4.2.3 Numero de aletas .....	70

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

4.2.4 Densidad de los cortadores.....	71
4.2.5 Angulo de corte.....	71
4.3 Integración de la sección de evaluación.....	72
4.4 Estructura esquemática de la herramienta computacional .....	72
4.5 Requerimientos del sistema .....	74
4.6 Rango operativo .....	74
4.7 Alcance de aplicación de la herramienta BDS .....	75
4.5 Diagrama de entidad relación .....	75
5. Análisis de resultados.....	76
5.1 Análisis de resultados de la aplicación BDS en comparación con trabajos de campo.....	77
5.1.1 Comparación Módulo de selección.....	78
5.1.2 Análisis Módulo de diseño .....	80
6. Conclusiones .....	86
7. Recomendaciones.....	87
Bibliografía .....	88
Apendices.....	92

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

**Índice de figuras**

Figura 1 Primer patente de broca tricónica .....	15
Figura 2 Barra de percusión.....	15
Figura 3 Mecanismo de corte broca de cortadores fijos .....	16
Figura 4 Mecanismo de corte broca de conos.....	16
Figura 5 Clasificación de brocas tricónocas .....	19
Figura 6 Partes de la broca tricónica.....	19
Figura 7 Tipos de insertos.....	20
Figura 8 Tipos de cojinetes en las brocas de conos .....	21
Figura 9 Almacen de lubricante .....	22
Figura 10 Partes de una broca de cortadores fijos.....	25
Figura 11 Elementos del perfil de la broca de cortadores fijos.....	28
Figura 12 Clasificación de las brocas de cortadores fijos .....	29
Figura 13 Tipos de perfiles en brocas de cortadores fijos.....	30
Figura 14 Parámetros que afectan la resistencia de la roca.....	35
Figura 15 Linealización de la envolvente de Mohr-coulomb .....	39
Figura 16 Esquema de la prueba UCS .....	41
Figura 17 Estructura del diseño del perfil del la broca PDC.....	59
Figura 18 Ejemplo del uso de MATPLOTLIP en BDS .....	66
Figura 19 Ejemplo del uso de Tkinter en BDS .....	67
Figura 20 Ventana para diseño del perfil BDS .....	68
Figura 21 Ventana del diseño de cortadores .....	69
Figura 22 Ventana de diseño de aletas.....	70
Figura 23 Esquema general BDS .....	73
Figura 24 Diagrama entidad - relación del software BDS .....	76
Figura 25 Resultado relación de bocas y formaciones.....	79
Figura 26 Perfil de broca para la formación Ortaguaza .....	81
Figura 27 Perfil de la broca para la formación Tena.....	82
Figura 28 Numero de aletas formación Tena usando BDS.....	83
Figura 29 Densidad de cortadores formación Ortaguaza con BDS .....	84

**Índice de tablas**

Tabla 1 Clasificación IADC de las brocas tricónicas.....	24
Tabla 2 Clasificación IADC de las brocas PDC .....	32
Tabla 3 Parámetros empíricos para el módulo estático de Young .....	53
Tabla 4 Relaciones empíricas entre la resistencia a la compresión no confinada (UCS) y otras propiedades físicas en areniscas .....	54
Tabla 5 Relaciones empíricas entre la resistencia a la compresión no confinada (UCS) y otras propiedades físicas en arcillas .....	54
Tabla 6 Relaciones empíricas entre la resistencia a la compresión ilimitada (UCS) y otras propiedades físicas en caliza y dolomita .....	55
Tabla 7 Relación de UCS con la resistencia de la formación .....	56
Tabla 8 Dureza de formación con base en UCS .....	57
Tabla 9 Estimación del diámetro de cortadores y número de aletas con el UCS.....	57
Tabla 10 Comparativo de lenguajes de programación más usados.....	64
Tabla 11 Angulo de corte y características de la roca.....	71
Tabla 12 Requerimientos del sistema .....	74
Tabla 13 Ventajas y desventajas de BDS.....	75
Tabla 14 Brocas óptimas pozo Ecuatoriano.....	77
Tabla 15 Optimización de brocas.....	78
Tabla 16 UCS de las formaciones analizadas .....	79
Tabla 17 Resultados obtenidos en BDS comparados con los de campo.....	84

**Lista de apéndices**

**Los apéndices están adjuntos y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS**

Apéndice A Manual de usuario

Apéndice B Manual de Técnico

Apéndice C Ejecutable de la herramienta computacional

## Resumen

**Título:** Desarrollo de una Herramienta Computacional para Diseñar Brocas PDC \*

**Autores:** Cristian Camilo Fuentes Medina y Cristian Alberto Gómez Gómez\*\*

**Palabras clave:** Broca, perforación, diseño, programación, librería

### Descripción:

Uno de los elementos más importantes en el proceso de perforación es la broca, con esta se llega a la formación de interés dejando un agujero proporcional a su calibre, para que esta actividad se realice con la mayor eficiencia, la broca debe tener las características optimas de acuerdo a los estratos que se esperan encontrar en subsuelo.

Con la presente investigación se busca desarrollar un programa computacional con lenguaje de alto nivel, que permita brindar parámetros adecuados al momento de hacer el diseño de una broca de perforación PDC, así mismo pueda dar un criterio de valor en el momento de hacer una selección con brocas ya diseñadas.

En primera medida se realizó un estudio de las principales características y clasificación de las brocas más usadas, luego se planteó una recopilación de antecedentes sobre la manera de selección para brocas de perforación de cortadores fijos y finalmente se programó una herramienta computacional en lenguaje Python con sus respectivos lineamientos de uso. Se comparó el resultado de un proceso de optimización convencional de brocas para probar los resultados del aplicativo y se obtuvo que el software entrega resultados acordes con la optimización del diseño de brocas y brinda criterios de valor en su selección, encontrando diferencias solo en la densidad de cortadores.

---

\*Trabajo de grado

\*\* Facultad de ingenierías físico químicas. Escuela de Ingeniería de petróleos. Maika Karen Gambus Ordaz. Wilson Raúl Carreño Velasco

**Abstract**

**Title:** Development of a Computational Tool for Designing PDC Drill Bits \*

**Authors:** Cristian Camilo Fuentes Medina and Cristian Alberto Gómez Gómez\*\*

**Key Words:** Drill bit, drilling, design, programming, library

**Description:**

One of the most important elements in the drilling process is the drill bit, which reaches the formation of interest leaving a hole proportional to its caliber, for this activity to be performed with the greatest efficiency, the drill bit must have the optimum characteristics according to the strata expected to be found in the subsoil.

This research seeks to develop a computer program with high-level language, which allows to provide adequate parameters at the time of designing a PDC drill bit and can also give a value criterion at the time of making a selection with already designed bits.

Firstly, a study of the main characteristics and classification of the most used drill bits was carried out, then a compilation of background information on the way of selection for fixed cutter drill bits was proposed and finally a computational tool was programmed in Python language with its respective guidelines for use. The result of a conventional optimization process of drill bits was compared to test the results of the application and it was obtained that the software delivers results in accordance with the optimization of the design of drill bits and provides value criteria in their selection, finding differences only in the density of cutters.

---

\*Bachelor Thesis

\*\* Facultad de ingenierías físico químicas. Escuela de Ingeniería de petróleos. Maika Karen Gambus Ordaz. Wilson Raúl Carreño Velasco

## Introducción

La única manera para determinar la presencia del hidrocarburo es realizando el proceso de perforación y análisis concretamente. Si las herramientas utilizadas en este proceso son las indicadas y se implementa el análisis de los datos sísmicos y de pozos offset, el desarrollo de la perforación se llevará sin contratiempos y de la mejor forma.

Cuando se busca el éxito de un programa de perforación es importante tener presente el diseño y selección de la broca que se va a utilizar, esto con el fin de contar con la adecuada herramienta y desarrollar un proceso óptimo. Para lograr este objetivo se debe, en la etapa de planeación, tener criterios y modelos eficientes que permitan seleccionar los diferentes tipos de brocas de acuerdo con las características de la formación y al perfil programado del pozo. Los parámetros más sensibles al tipo de roca en las formaciones que se quieran perforar son, entre otros, el tamaño, densidad y posición de los cortadores, el perfil de las cuchillas a lo largo de la broca. Los cuales dan forma a la estructura de corte.

Es indispensable crear un esquema de sistematización el cual se pueda probar y afianzar para que al momento de seleccionar una broca la subjetividad de las estimaciones pueda quedar reducida al mínimo, el aplicativo que se pretende realizar es inherente y necesario para este fin.

El presente trabajo plasma el resultado investigativo referente al desarrollo de una herramienta computacional enfocada en brindar parámetros para el correcto diseño y selección de brocas PDC. En el primer capítulo se extiende la base teórica consultada, precursora de la metodología usada en la herramienta, el capítulo dos muestra los diferentes caminos para el diseño de brocas que se usan en la industria y los diferentes parámetros y pruebas que intervienen en la selección. El capítulo tercero enmarca la metodología de diseño usada en la herramienta con el sustento teórico

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

de la selección y para finalizar, el cuarto capítulo cuenta con el análisis de los resultados que se obtuvieron de la herramienta, comparándolos con un caso de estudio de optimización con métodos convencionales de selección y diseño.

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

### 1. Objetivos

#### **Objetivo general**

Diseñar una herramienta computacional con un lenguaje de programación de alto nivel para el diseño de brocas Polycrystalline diamond compact (PDC).

#### **Objetivos específicos**

Realizar una revisión de la literatura disponible referente al estado del arte para el diseño y selección de brocas PDC.

Determinar la metodología más adecuada para el diseño de brocas PDC.

Diseñar una herramienta computacional académica para el diseño de brocas de perforación PDC teniendo en cuenta las características litológicas y geomecánicas de las formaciones a perforar.

Crear una herramienta computacional con lenguaje de alto nivel con un enfoque académico y sistematizado al diseño de brocas PDC.

Probar los resultados de la metodología seleccionada por medio de correlación con datos de campo.

Elaborar un manual de usuario con las características del aplicativo y su correcto manejo.

## 2. Marco teórico

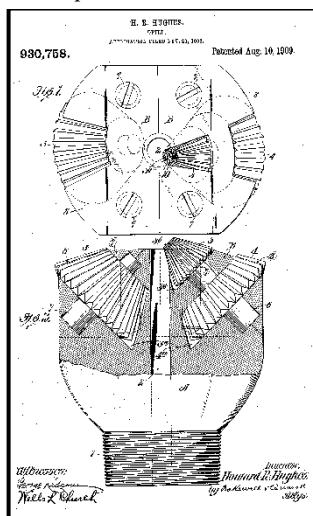
### 2.1 Definición y funcionamiento

Para realizar el proceso de perforación se utiliza un componente ubicado de la parte inferior de la sarta, la broca de perforación, que constituye el elemento de corte, entrando en contacto directo con la formación se encarga de triturarla y/o cortarla. Hace parte del equipo de perforación junto con los demás componentes cuya función básicamente es hacer llegar la broca al fondo del pozo y permitir su rotación.

#### 2.1.1 *Antecedentes de la perforación*

No es muy claro el inicio en el diseño de las brocas de perforación, pero la primera patente en este campo se remonta al año 1909 con la broca giratoria de doble cono (figura 1) desarrollada por Howard Hughes. Los antecedentes a esta patente se documentan como brocas de arrastre, las cuales pueden poseer dos, tres y hasta cuatro cuchillos de acero adheridos a un vástago (figura 2). Entre 1916 y 1917 se creó la broca con discos gemelos reemplazables y cuatro cortadores giratorios, por C.E. Reed, lo que permitió ampliar los límites de profundidad y resistencia. Las brocas tricónicas hicieron su aparición entre 1930 y 1931, fueron implementadas con cojinetes lubricados por el lodo de perforación y contaban con diferentes tipos de dientes acorde con la dureza de la formación a penetrar. Actualmente se cuenta con brocas muy similares, en el caso de la de conos de rodillos se distinguen dos tipos: las maquinadas con dientes de acero y dientes de insertos de carburo de tungsteno (Nygaard R, 2007).

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

**Figura 2***Primer patente de broca tricónica*

*Nota:* Howard R. Hughes drill patented (1909)

**Figura 1***Barra de percusión*

La dureza de las formaciones y el aumento de las profundidades a perforar dieron origen a las impregnaciones de diamante que para entonces ya era usado por muchas industrias como elemento de corte o pulido con presión. Las brocas con este material datan de los años cuarenta. En el año 1954 investigadores de General Electric sintetizan diamantes a partir del carbón, para en los años setenta implementar esta nueva tecnología a las brocas PDC (Polycrystalline Diamond Compact) (Ramos, 2011).

Actualmente se fabrican cortadores de broca tanto de diamante natural como PDC, o combinaciones de éstas.

En cuanto al diseño de las brocas propiamente dichas, además de pruebas en tamaño real y experimentos por computadora respecto al flujo de fluido y su relación con la limpieza de la broca y eliminación de recortes para mejorar su rendimiento, se realizan simulaciones acerca de la dinámica de los fluidos para optimizar la hidráulica de los conos giratorios de los cortadores fijos con el fin de mejorar las ROP.

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

### 2.1.2 Principios de corte

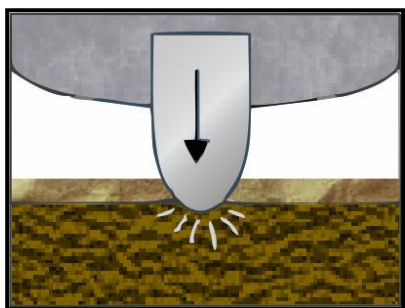
Al realizar la perforación de la roca, las brocas se comportan con base a principios fundamentales, los cuales se pueden definir como:

- ✓ Hacer que la roca llegue a su punto de fallo por medio de esfuerzos de corte
- ✓ Aplicar esfuerzos de compresión para triturar por rotación

De esta manera se puede afirmar que las brocas, de acuerdo con su mecanismo de corte, se pueden ubicar en dos clasificaciones generales: conos móviles y cortadores fijos. En primera medida, las de conos móviles trituran la roca por impacto, lo cual se realiza mediante incrustación de los dientes en la formación y el posterior corte al entrar en ella, causando el fallo de la roca por compresión como se muestra en la figura 3. Así mismo, en el caso de las brocas con cortadores fijos, el corte raspa o cizalla la roca causando un fallo por esfuerzo de corte como se muestra en la figura 4.

**Figura 3**

*Mecanismo de corte broca de conos*



*Nota:* PEMEX, 2009

**Figura 4**

*Mecanismo de corte broca de cortadores fijos*



*Nota:* Orlando Gordon R: seminario de brocas de perforación. Nivel básico (2011). PDVSA.

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

### **2.2 Tipos y clasificación de las brocas.**

A pesar de tener el mismo propósito, la velocidad de perforación y el desgaste que sufren dependerá y será diferente según la broca seleccionada. Dentro de cada tipo existen características diferentes, por esto, es necesario tener una idea de cada una de ellas para poder así hacer una selección adecuada. (Velasco, 2015).

Como ya se mencionó, las brocas son normalmente clasificadas de acuerdo con su diseño, en brocas de cortadores fijos y brocas de conos móviles. En este sentido, las brocas de arrastre o cortadores fijos constan de aletas con elementos de corte que son parte integral del cuerpo de la broca y rotan en conjunto con la sarta. Por su parte la broca de conos móviles cuenta con dos o más conos conteniendo los elementos de corte, los cuales rotan en el eje del cono mientras la broca rota en el fondo del pozo. Actualmente se usan en mayor medida las brocas de diamante policristalino PDC.

En una clasificación adicional se encuentran las brocas especiales, que son usadas en operaciones específicas como la toma de núcleos, ampliación del hueco, corte de tubería de revestimiento, entre otras.

Debido a su gran versatilidad y uso actual, el presente trabajo hace énfasis especial en las características y se enfoca en el diseño de las brocas de cortadores fijos PDC. Es importante resaltar que aún se encuentra una gran cantidad de fabricantes y mucha variabilidad en el análisis y nomenclatura de las brocas, para evitar posibles discordancias, se plantea la clasificación general de acuerdo con parámetros internacionales vigentes.

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

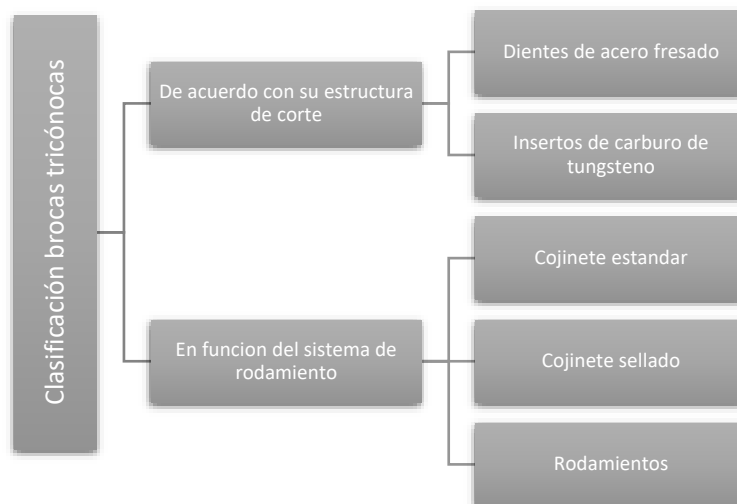
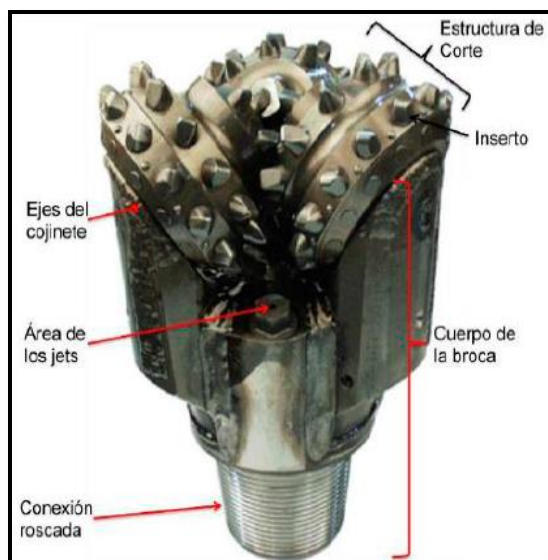
### ***2.2.1 Brocas tricónicas***

Las brocas tricónicas constan de tres 3 conos y tres 3 secciones o piernas maquinados a partir de forjas de acero, los cuales son ensamblados por separado y al final se unen mediante procedimientos especiales de soldadura. El conjunto conformado por cada cono con el pin de la sección recibe el nombre de cojinete y su función es servir como elemento rodante de corte a medida que gira la broca durante la perforación del pozo. (Gordon, 2015)

Este tipo de brocas se divide en 2 grupos generales, brocas tricónicas con dientes de acero y brocas tricónicas con insertos de carburo de tungsteno (ICT). A grosso modo, la estructura de corte de las primeras está constituida por dientes maquinados en el cono de acero forjado, para mayor resistencia los dientes son recubiertos con soldadura de partículas de carburo de tungsteno. En el caso de las brocas ICT, en su diseño la estructura de corte está constituida por elementos de carburo de tungsteno insertados a presión en orificios calibrados sobre el cono ya forjado. De manera alternativa surge una clasificación de acuerdo con el sistema de rodamiento, que es la parte móvil de la broca y permite el fallamiento por compresión, en esta clasificación las brocas se dividen en cojinete estándar, cojinete sellado y de rodamientos.

En la figura 5 se presenta la clasificación de las brocas tricónicas de acuerdo con su estructura de corte y en función del sistema de rendimiento. Así mismo, en la figura 6 se muestra una broca tricónica con sus principales partes.

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

**Figura 5***Clasificación de brocas tricónicas**Nota:* PEMEX, 2009**Figura 6***Partes de la broca tricónica**Nota:* Halliburton, 2012

En su mecanismo de funcionamiento, la broca tricónica se compone de una estructura genérica muy importante como es el cuerpo, la estructura de corte, los cojinetes y el sistema de compensación de presión.

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

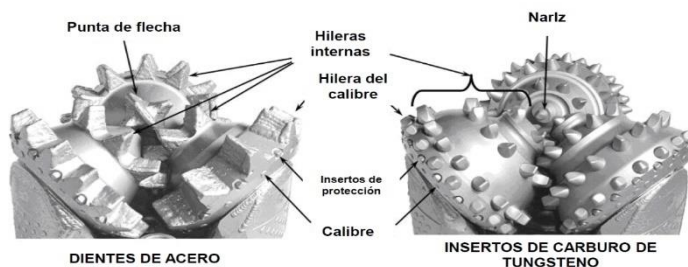
**2.2.1.1 Cuerpo de la broca.** Es el conjunto de la conexión roscada y los ejes de rodamiento en donde van montados los conos y el área de los jets, por donde circula el fluido de perforación. Se une a la tubería de perforación y completa el arreglo de fondo.

**2.2.1.2 Mecanismo estructural de corte.** Corresponde a diferentes hileras de dientes alrededor de cada uno de los conos que a su vez están montados en los rodamientos, se entrelazan sin tocarse a manera de engranajes. Su principal función es triturar y remover la roca.

La forma y excentricidad del cono generan el giro periódico a medida que la sarta rota. Esto produce el corte particular compresivo de este tipo de brocas. Este parámetro depende directamente de la dureza de las rocas a perforar. En la figura 7 se observa los tipos de insertos que pueden tener una broca tricónica.

**Figura 7**

*Tipos de insertos*



*Nota:* Well engineers' notebook, 2nd Edition, (2001). Shell international exploration and production b.v. Ep Learning and Development.

**2.2.1.3 Cojinetes o rodamiento y sello.** Son la estructura que se proporciona el eje y alrededor de los cuales giran los conos, su diseño depende de la velocidad de rotación y el peso sobre la broca. El sello es un elastómero que no permite el contacto entre el fluido de perforación y el interior del cono. Cuenta con partes reforzadas para resistir al desgaste debido a la rotación.

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

El sistema interno de los conos puede variar dependiendo de las características de la perforación, y pueden ser:

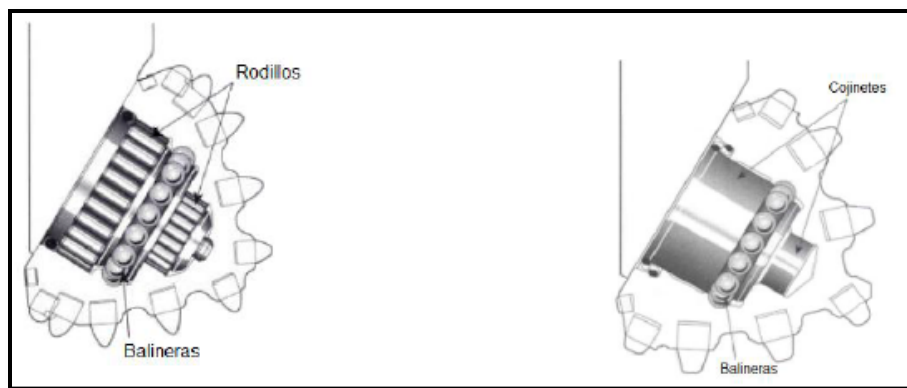
**Cojinete de rodillos:** soportan grandes pesos y bajas tasas de rotación y que las cargas se distribuyen sobre los rodillos. Se usan generalmente en brocas de doce pulgadas o superiores.

**Cojinete de fricción:** Son usados principalmente en perforaciones con altas tasas de rotación y que no se imprima mucho peso en la broca ya que la distribución se hará de manera directa en el cojinete.

En la figura 8 se muestra los diferentes tipos de cojinetes para las brocas de conos.

**Figura 8**

*Tipos de cojinetes en las brocas de conos*



*Nota:* Schlumberger, "Tecnología de Perforación". Cap. 6, 2004.

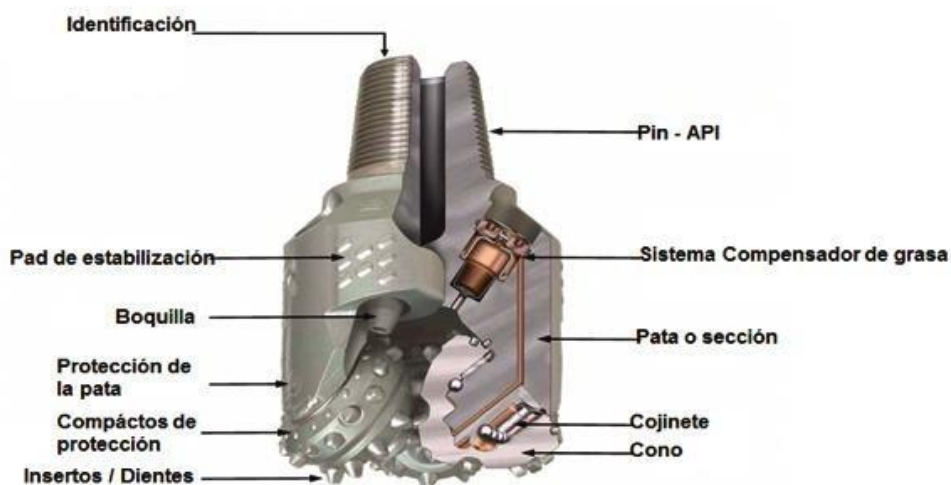
**2.2.1.4 Sistema de compensación de presión y almacén de lubricante.** Para asegurar que el lubricante alimente los rodamientos es necesario garantizar que el fluido de perforación que pasa a través de la broca se nivele con el aceite interno, para lo cual actúa un diafragma que cumple esta función. En este elemento se almacena y regula la grasa, cuando existe un cambio de presión dentro de la broca, se acciona un sello interno que permite el desplazamiento del lubricante.

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

El almacén de grasa se encuentra en la parte inferior de la rosca junto con el sistema de compensación conectado por un canal al cojinete. En la figura 9 se muestra el almacén de lubricante de la broca tricónica.

**Figura 9**

*Almacen de lubricante*



*Nota:* Estado del arte brocas de perforación. Ramos (2011)

**2.2.1.5 Parametrización IADC de las brocas tricónicas.** Con el fin de eliminar los sesgos en el diseño de las brocas y facilitar la selección, la asociación internacional de contratistas de perforación la IADC ha desarrollado un sistema de codificación para la clasificación de las brocas de cortadores fijos, con el cual se estandariza el nombre de las brocas. El sistema permite comparar los diversos tipos de brocas ofrecidos por los fabricantes. Su base son caracteres numéricos que detallan una característica de la herramienta.

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

- ✓ Primer Carácter (Serie de la estructura cortadora 1-8).

Los caracteres de esta serie indican la dureza de la formación, así como también el tipo de estructura de corte de la broca, ya sea dientes o insertos.

Las series del 1 al 3 indican que broca tiene dientes de acero. La serie del 4 al 8 indica que la broca tiene insertos de carburo de tungsteno (TCI). Se considera que en la serie 1 la formación será muy blanda, aumentando hasta la serie 8, en donde la formación será muy dura.

- ✓ Segundo Carácter (Tipos de estructura cortadora).

El segundo carácter presenta una clasificación de dureza dentro de la dureza definida anteriormente. Cada serie está dividida en cuatro tipos en la mayoría de los casos. El 1 indica que es una formación muy blanda, hasta el 4 que indica una formación muy dura

- ✓ Tercer Carácter (Cojinete/ Calibre).

Este carácter indica una descripción interna y externa de la broca. Hace referencia al diseño del cojinete y a la protección del calibre. Está dividido en siete categorías.

La clasificación IADC especifica la forma en que se nombra las brocas, en la tabla 1 se muestra la configuración de caracteres para las brocas tricónicas.

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

**Tabla 1***Clasificación IADC de las brocas tricónicas*

	<b>1er Carácter</b>		<b>2o Carácter</b>	<b>3er Carácter</b>			
	<b>SERIE</b>	<b>FORMACIONES</b>	<b>DUREZA</b>	<b>CATEGORIAS</b>			
<b>DIENTES</b>	<b>1</b>	Blandas	1 Suave	1. Cojinete de rodillo estándar no sellado			
			2 Media Suave				
			3 Media Dura				
			4 Dura				
	<b>2</b>	Medias	1 Suave		2. Cojinete de rodillo enfriado con aire		
			2 Media Suave				
			3 Media Dura				
			4 Dura				
	<b>3</b>	Duras	1 Suave			3. Cojinete de rodillo con calibre protegido	
			2 Media Suave				
			3 Media Dura				
			4 Dura				
<b>INSERTOS</b>	<b>4</b>	Muy Blanda	1 Suave	4. Cojinete de rodillo sellado			
			2 Media Suave				
			3 Media Dura				
			4 Dura				
	<b>5</b>	Blanda	1 Suave		5. Cojinete de rodillo sellado con calibre protegido		
			2 Media Suave				
			3 Media Dura				
			4 Dura				
	<b>6</b>	Media	1 Suave			6. Cojinete de fricción sellado	
			2 Media Suave				
			3 Media Dura				
			4 Dura				
	<b>7</b>	Dura	1 Suave				7. Cojinete de fricción sellado con calibre protegido.
			2 Media Suave				
			3 Media Dura				
			4 Dura				
<b>8</b>	Muy Dura	1 Suave					
		2 Media Suave					
		3 Media Dura					
		4 Dura					

*Nota: IADC, 2010*

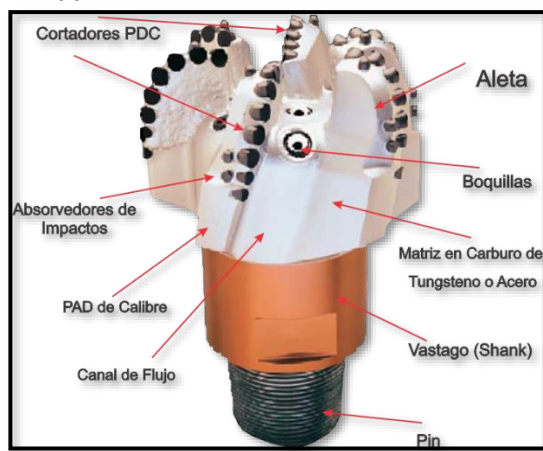
### 2.2.2 Brocas de cortadores fijos PDC

Las brocas de diamantes policristalinos compactos (PDC) aparecieron en el mercado en los años 70. Su elemento cortante lo constituye un disco o capa de diamante policristalino sintético, adherido a un sustrato de carburo de tungsteno mediante un proceso de alta presión y temperatura. Son las más usadas y sobre las cuales se han propuesto los principales diseños y optimizaciones.

Gracias a su buen rendimiento y versatilidad en la perforación las brocas de cortadores de diamante policristalino han sido empleadas extensamente. El elemento de corte que hace funcionar a esta broca consiste en un cortador de tungsteno con una lámina de diamante sintético con un espesor de 1/64 de pulgada la cual es soldada con un proceso especial basado en la aplicación de presiones y temperaturas muy altas. En su estructura, las brocas PDC, tienen determinados parámetros que influyen directamente en su rendimiento como el perfil de la corona, la limpieza hidráulica de la broca, el tipo de cortadores y el mecanismo de corte entre otros. En la figura 10 se aprecia una broca de cortadores fijos con sus partes principales.

**Figura 10**

*Partes de una broca de cortadores fijos*



*Nota:* Halliburton, brocas de perforación

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

### 2.2.2.1 Elementos que componen la estructura de la broca PDC

#### ✓ Aletas

Las aletas son soportes macizos de material, acero o tungsteno, que sostienen los elementos cortantes y permiten que los detritos y el lodo de perforación retornen a superficie. El ángulo que estas tengan con respecto a la vertical de la broca puede facilitar la hidrodinámica y mejorar el rendimiento.

#### ✓ Cortadores PDC

Son el elemento más importante en la estructura de corte, permiten que la broca realice su función y son los que soportan, directamente, el peso que imparta la sarta de perforación. Como se mencionaba anteriormente, son cilindros de diversos calibres hechos de carburo de tungsteno, en su extremo tienen como tapa una lámina de diamante sintético que puede medir desde 1/64 pulgadas de grosor y se encarga de raspar la formación para avanzar.

#### ✓ Amortiguadores de impacto

En algunas brocas PDC se incorporan cilindros únicamente de carburo de tungsteno con el fin de reducir el desgaste directo con el calibre de la broca, de esta manera se incrementa la vida útil de la herramienta.

### Boquillas

Son orificios milimétricamente calibrados en el cuerpo de la broca, están ubicados entre las aletas y direccionan el fluido de perforación para que la broca tenga correcto enfriamiento y la presión del fluido sea la indicada.

#### ✓ Matriz

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

Es el material del cual está compuesta la broca, de ella se extienden las aletas y es la encargada de la rigidez de las brocas.

### ✓ Cono

Si se hace un corte longitudinal a la broca, pasando por una de las aletas, se forma un perfil, la distancia relativamente recta desde el centro de la broca hasta el inicio de la curvatura de la aleta se denomina cono, éste puede determinar el área de contacto de las aletas con la formación y establecer la velocidad de corte.

### ✓ Nariz

Concretamente, el contacto inicial de la broca con la formación se va a limitar a ciertos puntos de acuerdo con la geometría seleccionada, la nariz es el primer punto de contacto en fondo mientras los cortadores se desgastan y su forma va de acuerdo con la dureza de la roca a perforar.

### ✓ Flanco

Cuando la nariz inicia su proceso de desgaste se va ampliando el área de contacto, el flanco es la sección redondeada hasta que inicia el hombro de la aleta, de acuerdo con la densidad de cortadores que se requiera en la broca y dependiendo de su distribución, el cono y el flanco determinarán el diseño del perfil de la broca.

### ✓ Hombro

Es la parte de la aleta que da culminación a la forma ovalada de la misma, en el hombro se implantan los inhibidores de desgaste y en muchos casos fragmentos de diamante para la protección del calibre.

### ✓ Canales de flujo

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

Los canales se forman gracias a la separación que alcanza a tener cada aleta con la matriz, por medio de ellos circulan todos los fluidos que se usen para extraer los cortes de perforación.

### ✓ Corona

El conjunto formado por las aletas, los cortadores, la matriz y los canales se denomina corona.

### ✓ Vástago

Es una sección intermedia entre la corona y la tubería que le da espacio y rigidez, provee un espacio para la nomenclatura de la broca y se aloja en él la ranura interruptora fundamental para generar el torque de agarre que permite roscar la broca.

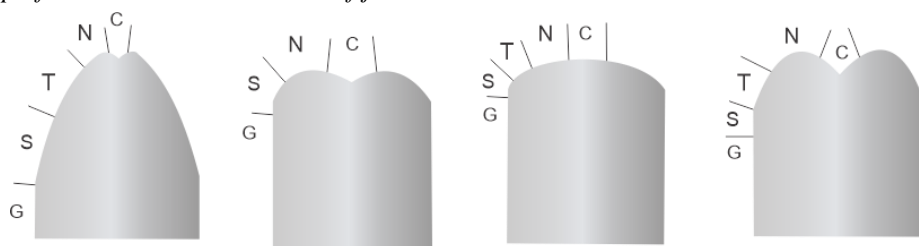
### ✓ Pin API

Es la rosca especificada para la broca y la caja de tubería que se vaya a usar. Constituye la comunicación entre el sistema de rotación y la broca en cuestión.

Los elementos que conforman el perfil de la broca se pueden apreciar en la figura 11.

**Figura 11**

*Elementos del perfil de la broca de cortadores fijos*



*Nota:* De la Torre, Pablo. 2010

C – Cono (Cone)

G – Calibre (Gauge)

T – Flanco (Taper)

S – Hombro (Shoulder)

N – Nariz (Nose)

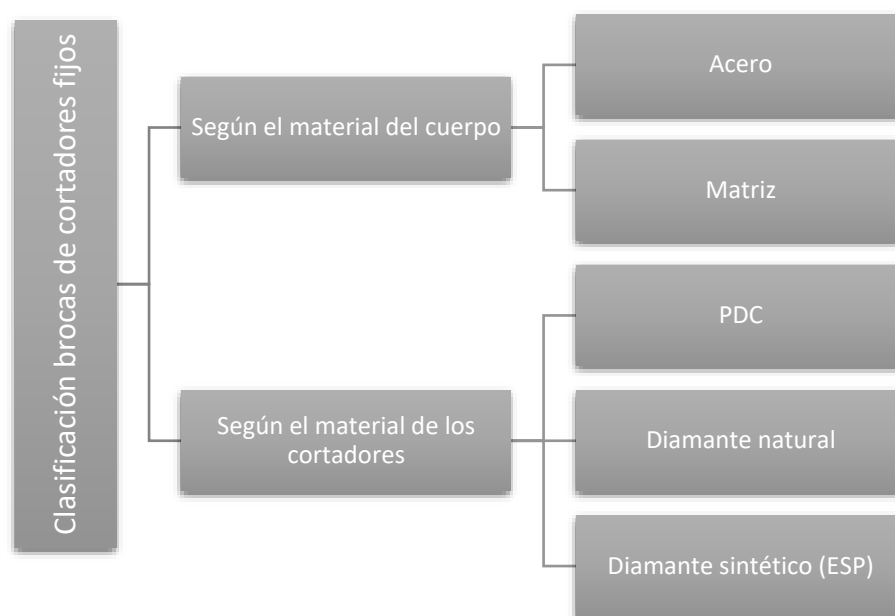
## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

**2.2.2.2 Mecanismo de corte.** Al transmitir la energía de rotación de la sarta, se produce un efecto de cizallamiento, de esta manera se produce una perforación rápida usando menos energía que el mecanismo de trituración por compresión.

Permite perforar la formación sin producir impacto en la misma. La ventaja que presenta es que se obtienen volúmenes de corte de apreciable magnitud, aumentado consecuentemente la tasa de penetración (Botelho R, 2006). De esta manera se obtiene un efecto de raspado con una profundidad de incrustación que depende del ángulo del cortador y la dirección de las aletas, en la figura 12 se presenta la clasificación de las brocas PDC según el material del cuerpo y el material de los cortadores.

**Figura 12**

*Clasificación de las brocas de cortadores fijos*



*Nota:* PEMEX, 2008

**2.2.2.3 Perfil de la broca PDC.** Es la silueta transversal formada gracias a las diferentes alturas de los cortadores de la nariz, se refiere principalmente a que tan altos o bajos están estos con

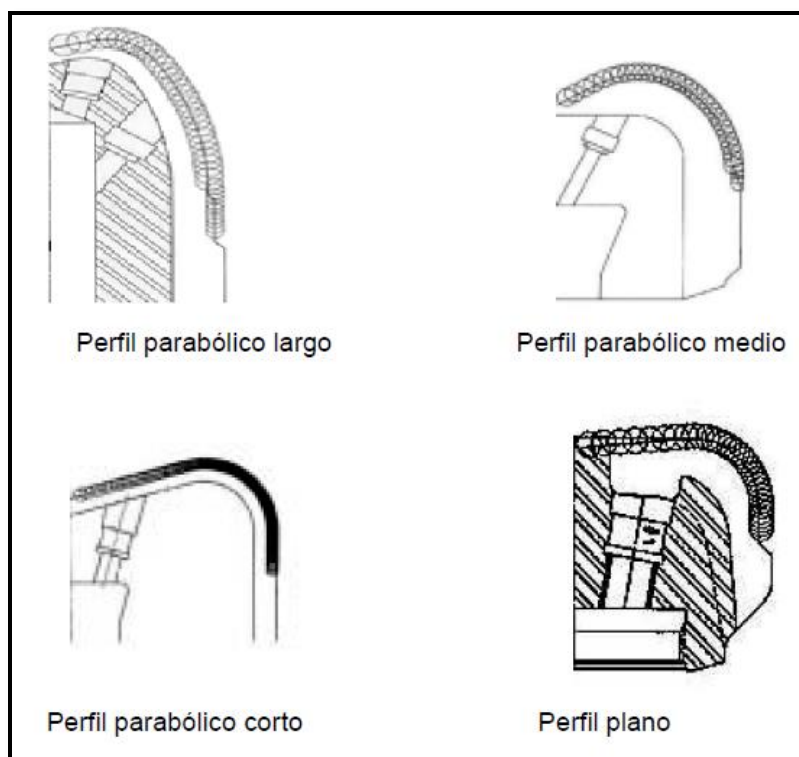
## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

respecto al calibre propio de la broca (figura13). En cada arreglo de cortadores, dando perfiles distintos, se obtendrá un resultado específico y debe ser escogido con cuidado.

El perfil inicia en el calibre e incluye la corona, los cortadores y el área de flujo. Los perfiles largos y medios son regularmente usados para pozos verticales, por su parte los perfiles cortos y planos funcionan de mejor manera en pozos direccionales.

### Figura 13

*Tipos de perfiles en brocas de cortadores fijos*



*Nota:* Burdoyne, 1991

Al referirse al perfil de la broca es importante tener en cuenta 3 aspectos relacionados con el desempeño de la broca, la agresividad, la respuesta direccional y la durabilidad y densidad de los cortadores.

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

**2.2.2.4 Calibre de la broca o Gauge.** En una broca, el calibre es referido a la parte más baja de la aleta y está encargada de darle estabilidad a las aletas. Existen diferentes tamaños para el calibre, esto depende de su uso (tipo de pozo a perforar) y tamaño de la misma, ya que mientras mayor sea el diámetro de la broca mayor podrá ser la longitud del gauge. (Hughes, 2010).

Es el área donde se ubican los cortadores de protección adicional, de esta forma si se tiene un gauge largo, la perforación será de preferencia vertical y el calibre corto en pozos direccionales.

**2.2.2.5 Código IADC para brocas de cortadores fijos.** Se utiliza un código con una estructura similar al de las brocas tricónicas, en este caso de cuatro caracteres, el primero alfabético y los tres restantes numéricos.

- ✓ Primer Carácter, tipo de cuerpo de la broca.

En el primer carácter se muestra el material del que está fabricado el esqueleto de la broca. Con una “M” si es de matriz, y con una “S” si es de acero.

- ✓ Segundo Carácter, dureza de la formación.

El segundo carácter representa la dureza de formación. La dureza va desde el 1 que indica que es una formación muy blanda, hasta el 7 que indica que se trata de una formación muy dura.

- ✓ Tercer Carácter, tamaño y tipo de cortador.

Este carácter indica el tipo de cortador y el diámetro de las pastillas de PDC. Esta va desde durezas de formaciones muy blandas a medias. Para durezas de formaciones duras a extremadamente duras ya no es utilizada la pastilla de PDC.

- ✓ Cuarto Carácter, perfil.

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

Muestra el perfil de la broca. Se utiliza desde el 1 para perfil plano, hasta el 4 que es el perfil parabólico largo. La clasificación IADC especifica la forma en que se nombra las brocas, en la tabla 2 se muestra la configuración de caracteres para las brocas tricónicas.

**Tabla 2**

*Clasificación IADC de las brocas PDC*

1er Caracter	2o Caracter	3er Caracter	4o Caracter
CUERPO	FORMACIÓN	TAMAÑO	PERFIL
<b>"M" MATRIZ "S" ACERO</b>	1 Muy blanda	2 PDC, 19 milímetros	1. Perfil Plano 2. Perfil Parabólico Corto 3. Perfil Parabólico Medio 4. Perfil Parabólico Largo
		3 PDC, 13 milímetros	
		4 PDC, 8 milímetros	
	2 Blanda	2 PDC, 19 milímetros	
		3 PDC, 13 milímetros	
		4 PDC, 8 milímetros	
	3 Blanda a media	2 PDC, 19 milímetros	
		3 PDC, 13 milímetros	
		4 PDC, 8 milímetros	
	4 Media	2 PDC, 19 milímetros	
		3 PDC, 13 milímetros	
		4 PDC, 8 milímetros	
	5 Medianamente dura	1 Diamante natural	
		2 TSP	
3 Combinación			
6 Dura	1 Diamante natural		
	2 TSP		
	3 Combinación		
7 Extremadamente dura	1 Diamante Natural		
	4 Impregnada de diamante		

*Nota: IADC, 2010*

### 2.3 Antecedentes en el diseño

Para la década de 1960 la principal práctica en el uso de las brocas era la escogencia de una velocidad de penetración de acuerdo con la cantidad de estratos a perforar “rata de perforación aceptable”, normalmente la broca era reemplazada al presentar una falla o perdida en el gauge.

Con esta práctica y teniendo en cuenta consideraciones teóricas, para formaciones relativamente homogéneas y no abrasivas, se encontró que al aplicar un peso moderado y aumentar la velocidad de rotación se incrementan la efectividad y velocidad en la perforación, contrario al aplicar gran peso y reducir la velocidad de giro. De igual manera, en formaciones abrasivas, el aumento del peso en la broca y una velocidad moderada corresponden a características que aumentarían la eficiencia en la perforación.

✓ Identificación de formaciones.

Tomando lo expuesto por W. J. Hightower, en su peaper “Proper Selection of Drill Bits and Their Use”, se evidencia que para el año 1964 se usaban los registros de Inducción y Gamma Ray Neutrón para seleccionar el tipo de broca y correlacionar formaciones con los cambios en la rata de perforación.

✓ Plan de corrida de broca

**Datos de perforación:** Es el primer paso para determinar una buena selección, consta de recopilar información sobre la configuración de formaciones ya perforadas en determinada zona, puede incluir reportes de brocas, registros de pozo, tiempos de perforación y capacidades de los equipos.

**Selección de la broca:** Es un factor decisivo en el proceso de perforación ya que de una buena selección depende la estabilidad del pozo, la velocidad de perforación y los posibles contratiempos que se puedan presentar en cuanto a la rata de perforación. Normalmente se

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

utiliza la experiencia de perforación en la zona, las brocas usadas en pozos aledaños o la broca inmediatamente anterior para estimar la broca a usar subsecuentemente, pero no siempre son correctas las predicciones y está sujeto a muchos problemas de desgaste.

**Prácticas operativas:** En zonas donde se tiene una buena correlación de formaciones entre pozos, es más sencillo predecir los estratos que estarán en el camino de la broca, de esta manera la selección se puede hacer por experiencia de perforación, pero continúa siendo empírico el análisis de la velocidad y peso sobre la broca en cualquiera de los casos. Por ejemplo, en 1960 se estimaba que las formaciones compuestas por cuarcita, cal densa, dolomita, necesitaban altos pesos y velocidades de rotación conjunto con brocas de dientes más redondeados y de menos filo.

En casos donde no se puede estimar la columna estratigráfica por medio de correlaciones entre pozos, las condiciones de operación estarán determinadas por la velocidad de rotación, en consecuencia, el perforador debe identificar el cambio a una formación porosa gracias a las gráficas de tiempo de perforación.

**Levantamiento de broca:** En ocasiones es complejo determinar el momento oportuno de hacer un cambio o levantamiento de broca, pero usando los gráficos de velocidad de penetración, se puede tener una idea más completa de la vida útil de la misma.

**Análisis de la corrida de broca:** Es muy importante realizar el análisis de las brocas usadas, con la mayor premura posible, ya que se puede usar para sugerencias en pozos posteriores. Los factores que afectan la resistencia de la roca se muestran en la figura 14.

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

**Figura 14**

*Parámetros que afectan la resistencia de la roca*



*Nota:* Adaptado de Mahohar Lal. Shale Stability: Drilling Fluid Interaction

Un trabajo realizado por Manohar Lal, Shale stability: Drilling Fluid Interaction and Shale Strength (1999), se considera el efecto de tres factores con atributos de los mayores contribuyentes al cambio en la resistencia mecánica de las rocas, los cuales son, la mineralogía de las arcillas, su contenido en la formación y la respectiva compactación. En el desarrollo encontró que el grado de compactación es el principal elemento de afección en la roca, de la misma manera postuló que se caracteriza en términos de la porosidad, densidad aparente y velocidad de la onda. También recomienda que se tenga presente la calibración de las correlaciones usadas de acuerdo con la litología ya que la heterogeneidad de la roca afecta de manera importante el análisis.

Por su parte Woehrl y otros (2000), realizan el desarrollo de una herramienta para estimar, a partir de registros, propiedades mecánicas de la roca. Su base es un modelo que describe los procesos durante la carga mecánica sobre la roca, para realizar la simulación del que será el comportamiento mecánico de la roca se solicitan datos de entrada como los registros de porosidad, densidad aparente y registros sísmicos. La herramienta desarrollada recibe el nombre de FOMEL, dentro de lo incluido en su trabajo Comparison of Methods to Derive Rock Mechanical Properties from Formation Evaluation Logs, Woehrl concluye que es necesario tener en cuenta datos

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

experimentales para hacer la respectiva calibración de los modelos, en ese orden de ideas afirma que la porosidad es el mayor contribuyente de confianza en los resultados.

### 2.4 La roca y sus propiedades mecánicas

La mecánica de rocas estudia las propiedades físicas de la roca y la forma en que éstas responden a las modificaciones debidas a operaciones como la perforación. Dentro de las propiedades físicas más comunes está: fractura, exfoliación, dureza, elasticidad, densidad esfuerzos no confinados y esfuerzos confinados.

- ✓ Fractura: Schunnesson, H. (1998), la fractura se da por el sometimiento de una roca o mineral a esfuerzo compresivo, haciendo que esta responda con rompimientos irregulares.
- ✓ Exfoliación: Tomando lo expuesto por Jaeger (1969) en el capítulo 1 de su libro “Fundamentals of Rock Mechanics.”, la exfoliación es el sometimiento de un mineral o roca al esfuerzo compresivo y produciendo separaciones en superficies planas. No todos los minerales presentan este aspecto.
- ✓ Dureza: Se define como la resistencia que una superficie opone a ser rayada por otra. En cada mineral la dureza es constante y está cuantificada por la escala de Mohr.
- ✓ Elasticidad: Es la habilidad para resistir y recuperar la forma luego de la perturbación producida por una fuerza y se relaciona directamente con la cohesión entre los minerales.
- ✓ Densidad de la roca: Para Jaeger (1969), la densidad es la masa sobre unidad de volumen de los minerales o rocas y depende de los átomos que lo constituyen.
- ✓ Esfuerzos no confinados: Se denominan también esfuerzos uniaxiales y se definen como la fuerza de compresión de una muestra de roca medida bajo condiciones atmosféricas.

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

- ✓ Esfuerzos confinados: Son esfuerzos triaxiales y se definen como la fuerza real de la roca en yacimiento antes de que sea perforada o expuesta a la columna de fluido del pozo.

#### 2.4.1 Elasticidad de la roca y sus parámetros

Los límites de deformación en donde la roca aún tiene potencial de regresar a su estado original sin perder sus propiedades, se denominan límites elásticos y están determinados por diversos parámetros que permiten cuantificar su comportamiento. La teoría elástica postula que existe una relación lineal entre la deformación de un material y los esfuerzos aplicados, en deformaciones reversibles.

- ✓ Módulo de Young (E): Es la relación que existe entre el esfuerzo uniaxial aplicado y la deformación que sufre el material a lo largo del eje de aplicación, vinculándolos de manera lineal.

$$\sigma = E * \epsilon \quad (1)$$

Donde:

$\sigma$  = esfuerzo uniaxial aplicado.

$E$  = Módulo de Young.

$\epsilon$  = deformación que sufre el material a lo largo del eje de aplicación.

- ✓ Relación de Poisson ( $\nu$ ): Es una representación de la capacidad de un material para transmitir su deformabilidad perpendicular a la carga. Puede definirse como la medida de la expansión lateral contra la contracción longitudinal (Maury, 1982). Matemáticamente es la relación entre la deformación transversal y axial.

$$\nu = \epsilon_{Tr} / \epsilon_{Ax} \quad (2)$$

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

Donde:

$\nu$  = relación de Poisson

$\epsilon_{Tr}$  = medida de la expansión lateral

$\epsilon_{Ax}$  = contracción longitudinal

- ✓ Módulo de rigidez o de corte (G): Es un parámetro, normalmente asumido como constante, que caracteriza la alteración de forma que puede experimentar un material al ser sometido a un esfuerzo de corte. Puede definirse como la relación entre el esfuerzo aplicado y la deformación angular o entre el esfuerzo de corte y la resistencia del material (Maury, 1982).

$$G = \tau/\gamma \quad (3)$$

Donde:

$G$  = módulo de rigidez o de corte

$\tau$  = esfuerzo aplicado

$\gamma$  = deformación angular

- ✓ Módulo elástico de Bulk (K): Es el resultado de aplicar una carga hidrostática a un elemento de muestra, representa la resistencia opuesta por el material a esta compresión aplicada (Maury, 1982).

$$K = \Delta P/(\Delta V/V_o) \quad (4)$$

Donde:

$K$  = módulo elástico de Bulk

$\Delta P$  = presión hidrostática

$\Delta V/V_o$  = deformación volumétrica

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

**2.4.2 Resistencia mecánica de la roca**

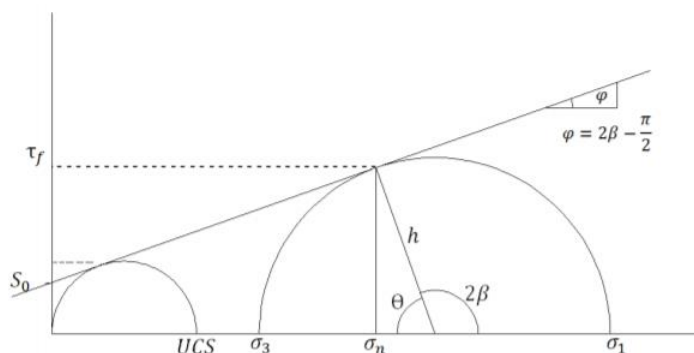
La resistencia es una propiedad de los sólidos para soportar los esfuerzos sin alterar las características internas, depende principalmente de la mineralogía de la roca y su historial o tiempo de compactación.

Uno de los parámetros más importantes al momento de encontrar la resistencia de una roca es el análisis de la estabilidad, que normalmente está caracterizado por la fuerza de cohesión  $S_0$  y el ángulo de fricción  $\varphi$ , los cuales se determinan por medio de pruebas de laboratorio, la prueba más usada con este fin es la prueba de resistencia triaxial, con la que se puede obtener un mayor conocimiento de las propiedades de la roca, en ella los esfuerzos que actúan en profundidad pueden simularse.

La prueba de resistencia triaxial consiste en someter una muestra cilíndrica a diferentes presiones de confinamiento y la aplicación de una carga axial hasta que la roca llegue a su punto de fallo, los resultados pueden ser modelados mediante la linealización de la envolvente de Mohr-Coulomb, en la figura 15 se puede observar la generalización de este proceso.

**Figura 15**

*Linealización de la envolvente de Mohr-coulomb*



Nota: Cabrera, 2003

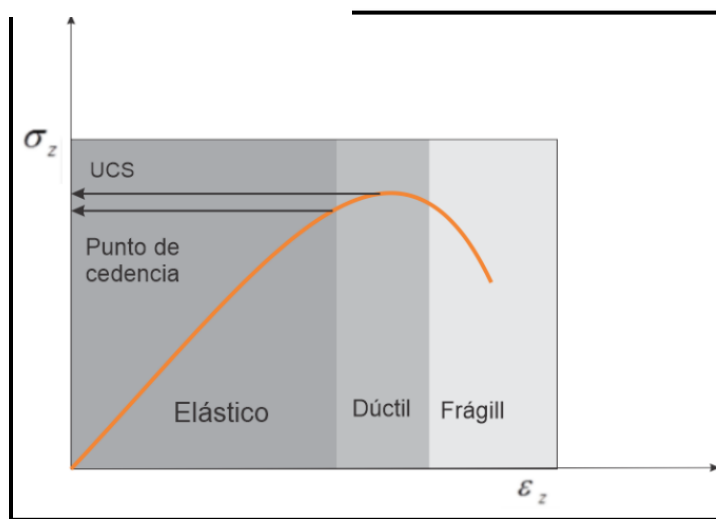
## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

### ***2.4.3 Resistencia a la compresión uniaxial (UCS)***

Es la propiedad de las rocas que es determinada con más frecuencia y los pasos o procesos que se usan para encontrarla en los centros de investigación alrededor del mundo son equivalentes, se define como el máximo esfuerzo que puede soportar una roca al ser sometida sin presiones de confinamiento. Se usa en un gran número de fórmulas de diseño como una propiedad índice en la selección de técnicas de perforación o en el diseño de ventanas de lodo para garantizar la estabilidad del pozo y evitar derrumbes.

El procedimiento es el siguiente, primero se debe extraer la muestra cilíndrica manteniendo una geometría de diámetro/longitud =1/2, de la misma forma la planitud debe mantenerse mínima, (0.02mm) de diferencia entre cualquier punto medido para asegurar un buen cálculo de presión. Durante el procedimiento la roca es introducida en un equipo de carga con cero presiones de confinamiento y monitorear de manera constante el esfuerzo axial aplicado junto con las deformaciones axiales y de diámetro. Con el desarrollo de la prueba se puede obtener la resistencia máxima, el módulo de Young y la relación de Poisson. En la figura 16 se muestra un esquema de la curva habitual resultante de dicha prueba.

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

**Figura 16***Esquema de la prueba UCS*

*Nota:* FJER, ET AL. Petroleum Related Rock Mechanics, 2008

La curva de esfuerzo de deformación resultante de la prueba presenta secciones definidas las cuales son:

- ✓ Región elástica: en la cual, si el esfuerzo aplicado a la roca es retirado, se recupera la forma inicial de la misma sin sufrir alteración alguna.
- ✓ Punto de cedencia: es el punto a partir del cual la roca llega a su umbral de deformación irreversible, es el paso al comportamiento dúctil.
- ✓ Región dúctil: el desarrollo de esta región la roca sufre deformación permanente, pero puede soportar la carga sin que presente fallas.
- ✓ UCS: es el punto que demarca la resistencia compresiva uniaxial, constituye el pico o fuerza máxima que se aplica en el momento en que la muestra falla.
- ✓ Región frágil: se presenta una drástica reducción en la habilidad que tiene la roca para soportar los esfuerzos y el material aumenta su deformación de manera muy notoria.

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

**2.4.3.1 Cálculo para determinar la resistencia a la compresión uniaxial.** Durante la prueba se registra el valor de carga axial máxima, que es el valor leído en el momento de la falla, y se usa la fórmula 5 para cuantificar este parámetro.

$$P_{max} = \frac{F_{max}}{A} = \left( \frac{F_{max}}{\pi * r^2} \right) * 0.145 \quad (5)$$

Donde

Fmax = carga axial máxima

r = radio de la muestra

Pmax = esfuerzo no confinado (UCS)

A = Área de la sección transversal de la muestra

### 3. Diseño de brocas de perforación PDC

En el proceso de perforación de un pozo, la etapa de diseño consta de las decisiones para seleccionar cada broca partiendo de premisas de lo que pueda pasar en el fondo del mismo. Los diferentes factores que pueden afectar la perforación tienen una relación directa entre los equipos de superficie y el ensamble de fondo; se presenta gran influencia tanto de los parámetros con que se perfora como de la litología en el comportamiento de la broca.

Las brocas PDC fueron diseñadas para obtener altas tasas de penetración en formaciones firmes y medianamente duras, no abrasivas. Las mismas no pueden usarse en formaciones duras y abrasivas por el hecho de que los cortadores PDC experimentan un excesivo desgaste mecánico, incrementado térmicamente por el calor generado por la fricción entre el cortador y la formación

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

(Ramos, 2011). De esta manera se puede inferir que las brocas PDC tiene mejor rendimiento para UCS bajos a moderados altos, dependiendo del material de los cortadores.

El análisis mecánico de las brocas ha dado como resultado desarrollos académicos que permiten predecir los tiempos de penetración durante la perforación, un ejemplo es el modelo de Warren modificado (Rastegar, 2008), que incluye un modelo de limpieza, fuerza de impacto de las boquillas, esfuerzos sin confinamiento y abrasividad de la roca. De esta manera se crea un tema de gran interés para todas las operaciones de perforación, la mejora y optimización de las brocas por medio de diversos modelos usando el esfuerzo de compresibilidad de las rocas.

### **3.1 Resistencia a la compresión uniaxial y el uso de correlaciones**

#### ***3.1.1 Porosidad***

Se puede definir como la fracción de espacios entre granos que pueden ser ocupados por fluidos, en relación con el volumen total de la roca, es decir que representa su capacidad de almacenamiento; existen subdivisiones de la de porosidad dentro de los cuales están la porosidad primaria, que es el estado natural de la matriz con los poros intergranulares, y la secundaria que se debe a la acción de las fuerzas tensoactivas en la matriz dando origen a fracturas.

La gran variedad de minerales y entornos de deposición permiten que haya rocas porosas como las areniscas y otras como los carbonatos (Calizas y dolomitas) y las evaporitas (Anhidrita, yeso, silvita etc) en las que la porosidad es muy cercana a cero y que por efectos prácticos se consideran en este valor. Las areniscas por su parte pueden poseer diferentes grados de porosidad, las que están bien consolidadas pueden tener de 10% a 15% mientras que las no consolidadas hasta

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

un 30%. Esta propiedad puede ser estimada por medio de los diferentes registros tomados al pozo, como son el registro Density, neutón y sónico (Jerez Oscar, 2012).

### ***3.1.2 Mecánica de la roca y su interacción con la variación de la porosidad.***

A lo largo de diferentes investigaciones y pruebas realizadas para evaluar el comportamiento de las rocas. Se ha demostrado que algunos parámetros como la elasticidad y la resistencia dependen en gran medida de la porosidad en conjunto con el contenido de cemento, sin dejar de lado la composición mineralógica que juega un papel importante. Un ejemplo de esto es que el módulo de Young, la cohesión y la resistencia uniaxial no confinada (UCS) presentan una notable disminución con respecto al aumento de la porosidad, por su parte el coeficiente de Poisson es prácticamente independiente (Manohar Lal. 1999).

En diferentes casos los autores dan por sentado que en las rocas sedimentarias la porosidad y el UCS no se comportan de manera lineal, sino que presentan una naturaleza hiperbólica, llegando a la conclusión conjunta de que este fenómeno se presenta por igual en areniscas y rocas con contenido bajo o alto de arcillas, lo que indica que a mayor contenido de vacío en la roca se evidencia una reducción en la resistencia mecánica. Esto se puede explicar físicamente ya que la porosidad asiste a la propagación y creación de redes de esfuerzos induciendo microfracturas. Sumado a esto el tamaño de poro puede afectar la elasticidad y resistencia de la roca (A. Fakhimi, 2010).

$$UCS = (C_1 * \emptyset^{-X_1}) \quad (6)$$

Donde:

$\emptyset$  = porosidad

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

$X_1$  = Constante adimensional que define la razón de cambio de pérdida de la resistencia con el aumento de la porosidad

$C_1$  = valor de la resistencia de la roca al asumir una porosidad igual a uno.

Las constantes empíricas C y X cambian dependiendo de la propiedad física que está siendo usada para la evaluación la resistencia.

### ***3.1.3 La saturación y su efecto en las propiedades mecánicas***

En su estado natural, la roca siempre se encuentra saturada por los diversos fluidos presentes en el yacimiento, lo que genera interacciones con los fluidos usados para la propia perforación en especial los base aceite. En un estudio realizado por los investigadores Hawkins y McConnel (1992) se demostró que el comportamiento mecánico de una roca saturada que tenga presencia abundante arcilla es 78% menos que si estuviera seca, sumado a esto se demostró que en areniscas este valor solo disminuye en un 8%. Vasarhelyi (2005) analizó estadísticamente los datos de resistencia a la compresión no confinada de 35 areniscas en estados seco y saturado, asegura que la pérdida de esta variable es cerca del 66%.

Así mismo, según Engin y colaboradores (2008), el agua puede suavizar e interactuar con los minerales y altera sus propiedades, con ayuda de la presión de agua intertidal se presenta una inestabilidad a lo largo de secciones débiles, sumado a eso aseguran que puede disminuir la resistencia al corte por fricción o cambiar los componentes de la arcilla (Is-ik Yilmaz, 2009). A causa de estos inconvenientes, se han presentado estudios para medir la influencia de la saturación de agua y se propone una mejor relación de UCS con el contenido de agua, dando una reducción exponencial (Erguler y Ulusay, 2007)

$$UCS = (C_2 * exp^{-X_2 * S_w} ) \quad (7)$$

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

Donde

$S_w$  = Saturación de agua

$C_2$  = Constante adimensional que define la tasa de pérdida de resistencia con el aumento del contenido de agua.

$X_2$  = Valor de la resistencia de la roca con saturación de agua igual a cero.

Erguler y Ulusay desarrollaron adelantos en la determinación del comportamiento de estas constantes en función de las demás propiedades físicas y la absorción de agua de la roca, encontrando que aumentan de manera exponencial con la densidad y disminuyen con el aumento de la porosidad y absorción de agua.

### ***3.1.4 Densidad y su relación con las propiedades mecánicas***

En la mecánica de rocas, la densidad tiene una relación estrecha con el peso específico de los minerales contenidos en ella y la cantidad de espacio ocupado. En términos los registros de densidad, la presencia de arcilla puede ser un factor de afección.

La porosidad efectiva aumenta a medida que disminuye la densidad, así mismo para una baja porosidad homogénea se evidencia una desviación significativa del UCS (Woehrl, B y otros, 2010).

El cálculo de UCS a partir de la densidad se encuentra plasmado por algunos autores, encontrando que tienen un comportamiento exponencial creciente (Ecuación 8), pero es notoria un alto régimen disperso en los resultados obtenidos en pruebas, por lo que no es un parámetro muy usado en el modelamiento de la resistencia.

$$UCS = (C_3 * exp^{X_3 * \rho} ) \quad (8)$$

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

Donde:

$X_3$  = Constante adimensional que define la razón de cambio de pérdida de la resistencia con el aumento de la densidad.

$C_3$  = Constante adimensional.

$\rho$  = Densidad de la roca

### 3.2 Métodos para la selección de brocas

El fin principal de una buena selección de broca es poder generar una mayor velocidad de penetración para de esta manera incurrir en posibles reducciones de costos de perforación, por lo cual en el proceso de selección de brocas se consideran varios factores de perforación que afectaran el rendimiento de la broca durante la operación. Los parámetros por considerar son la litología, compresibilidad de la formación, peso sobre la broca (WOB), rata de perforación (ROP), revoluciones por minuto (RPM), el estado mecánico del pozo, torque y arrastre, entre otros.

Para la selección de brocas de perforación se han desarrollado varios métodos que se basan en el concepto de esfuerzo no confinado (UCS), que es el esfuerzo de compresión uniaxial de un material (esfuerzo aplicado a lo largo de un solo eje, en el eje longitudinal) y se relaciona con la resistencia al corte que puede tener un material. Los modelos usados con mayor frecuencia para la selección de brocas son el de Energía específica y el de UCS.

El método de UCS (Esfuerzo No Confinado) calcula la fuerza compresiva de la roca, por lo que se deberán elegir diferentes características de la broca dependiendo de qué tan grande sea este. El cálculo del UCS es muy importante para decidir las características de las brocas, ya que esta es utilizada en la mayoría de los métodos. (González Torre, 2009)

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

En la eficiencia mecánica del método de Energía Específica puede ser calculada con el Esfuerzo No Confinado, siendo estos directamente proporcionales, por lo que será mayor mientras aumente la fuerza compresiva de la formación. Este método no propone directamente todas las características que deberá tener la broca. (González Torre, 2009)

Otra alternativa para la selección de la broca es por medio de pozos de correlación, haciendo uso del reporte de perforación en cada intervalo, se proporciona información que permite observar si las características de la broca seleccionada fueron las apropiadas o si es necesario cambiar algunos parámetros como el número de aletas o diámetro de cortadores que influyen en el desempeño de esta.

Los métodos nombrados anteriormente permiten hacer la selección de la broca por medio del cálculo del esfuerzo no confinado para decidir cuáles son las características que va a tener la broca considerando algunas referencias dadas por la IADC para un intervalo de UCS. Determinar el UCS se puede hacer por medio de pruebas de laboratorios o por medio del uso de registros como el sísmico, density y rayos gamma junto con algunas correlaciones para estimar ese valor.

### ***3.2.1 Selección por método de energía específica***

En términos de la perforación, la energía específica es la cantidad de energía necesaria para remover una unidad de volumen de roca. Por medio de este método se puede evaluar ciertas características que componen la broca, pero de manera indirecta ya que se usan parámetros de pozos de correlación, como son, el peso sobre la broca, el torque que se alcanzó en cada formación, las revoluciones de giro de la broca y la tasa de penetración.

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

$$E_s = \frac{WOB}{A_h} + \frac{13.33 * WOB * \varphi * N}{A_h * ROP} \quad (9)$$

$$\varphi = \frac{36 * T}{WOB * d} \quad (9.1)$$

Donde:

WOB = peso sobre broca [lbf].

A<sub>h</sub> = área del agujero [pg<sup>2</sup>].

N = velocidad rotando [rpm].

d = diámetro de la broca [pg].

ROP = tasa de penetración [pies/hora].

T = Torque [lb-ft].

$\varphi$  = agresividad [lb/lbf].

Teniendo los datos de energía específica se realiza el procedimiento propuesto por Kumar, J. en el que es necesario organizar la información obtenida en los intervalos de los pozos perforados, el tiempo de rotación y el tiempo acumulado. Posteriormente se calcula la energía específica en cada intervalo con la ecuación 9 y se grafican los datos de energía específica contra profundidad alcanzada. Es necesario aclarar que este método requiere la comparación de varias brocas usadas en pozos offset. Se escoge la broca que presente menor resultado de energía específica indicando que las características de la broca son las ideales. (Kumar J. 1976)

### 3.2.2 Selección por reporte de broca

Dentro de los múltiples parámetros que se pueden obtener de los pozos cercanos al pozo de desarrollo se encuentran cambios de litología, parámetros de perforación y los tipos de broca plasmados en los reportes respectivos.

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

Con el fin de obtener información probada sobre la broca que podría funcionar en, es prudente observar lo usado en los pozos vecinos. Con esa información no solo se puede tener una idea más clara del uso de las brocas sino también información de la litología presente, siendo esta análoga al desgaste resultante de las brocas usadas. Si el desgaste es mayor al estimado, puede que la formación usada tenga que ser corregida y reevaluada en la nueva perforación.

Las estimaciones y problemas con el uso de las brocas tienen que compararse con los reportes operacionales, con el fin de analizar si temas como el peso sobre la broca o las RPM se siguieron conforme lo dispuesto en la ficha de la broca. En la mayoría de los casos de optimización por dureza de la formación se recomienda la variación del número de aletas o el diámetro de los cortadores. Los cambios que se realicen a un diseño ya usado pueden hacer variar la tasa de penetración, pero es una forma efectiva de asegurar el buen fin de cada etapa, incurriendo en reducciones de tiempo y por consiguiente ahorro en la perforación.

De igual forma al encontrar un reporte con resultado de brocas sobre especificados, se recomienda hacer un ajuste de disminución de aletas o aumento del tamaño de los cortadores con el fin de hacer una disminución en el costo de la broca.

De esta manera los pozos de correlación son una guía importante en la selección de broca porque se tiene información verificada de comportamiento real en cada una de las etapas de perforación.

### ***3.2.3 Selección de broca usando UCS***

Es el método más usado en la selección de brocas ya que se hace la comparación entre valores de UCS determinados en laboratorio con el ajuste provisto por el método de Manson (1987) y el

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

tiempo de tránsito compresional y cizallamiento. Luego, ya conocidos los UCS en psi, se determina el tipo de litología y se aplica la clasificación IADC para la evaluación de la broca.

**3.2.3.1 Cálculo del UCS para el diseño.** Como se observó en las secciones anteriores, el UCS puede calcularse a partir de los diferentes registros básicos tomados en campo, a través de ellos se evalúa el módulo dinámico de Young y finalmente se estima la dureza de la sección.

De los registros sínicos se extrae el tiempo de tránsito de las ondas compresionales y de ser necesarios, los registros de densidad proveen este valor, con el siguiente flujo de trabajo es posible llegar al UCS:

$$\gamma = 1.347 * 10^{10} * (\rho_b/t_c^2) \quad (10)$$

$$\varepsilon_d = 2 * \gamma(1 + \nu) \quad (11)$$

Donde:

$\gamma$  = Módulo de Cizallamiento

$t_c$  = Tiempo de tránsito de la onda compresional (microsegundos)

$\rho_b$  = densidad de la formación ( $lb/ft^3$ )

$\varepsilon_d$  = Módulo dinámico de Young

$\nu$  = relación de Poisson

Una correlación alternativa para la determinación del módulo dinámico de Young utiliza el tiempo de tránsito emitido por el registro sínico y la densidad de la formación encontrada a partir de los registros.

$$\varepsilon_d(10^6 psi) = (1.13 * 10^4 * \rho_b)/t_c^2 \quad (12)$$

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

Por último, una correlación que solo utiliza la velocidad de la onda compresional obtenida por el registro sísmico y expresada en microsegundos por pie, está expresada como:

$$\varepsilon_d = 0.265 * V_c^{2.04} \quad (13)$$

Donde:

$\varepsilon_d$  = módulo dinámico de Young

$V_c$  = velocidad de la onda compresional

Luego de encontrar el módulo dinámico de Young se hace necesario conocer el porcentaje de arcilla en la formación estudiada, con el fin de hacer asunciones importantes en cuanto a la litología de la formación.

En este punto es prudente aclarar que por efectos de simplificar el análisis y hacer más efectiva la selección solo se toman 2 límites litológicos, cuando el  $V_{sh}$  es mayor a 0.35 se considera que el estrato es arena y si es menor o igual se habla de arcilla (Kumar, 1976).

En el caso de las arenas el módulo estático de Young ( $E_s$ ) se puede determinar mediante la siguiente correlación:

$$\varepsilon_s = 0.0293 * \varepsilon_d^2 + 0.4533 * \varepsilon_d \quad (14)$$

La ecuación 14 es el resultado de considerar una porosidad promedio de areniscas, pero en el caso que se tenga una estimación o se conozca la porosidad absoluta se puede usar la siguiente correlación, en donde los valores de  $A_1$  y  $A_0$  (Tabla 3) están especificados por la porosidad.

$$\varepsilon_s = 10 * (A_0 + A_1 \text{Log} \varepsilon_d) \quad (15)$$

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

Donde:

$A_0$  y  $A_1$  = constantes relativas a la porosidad

**Tabla 3**

*Parámetros empíricos para el módulo estático de Young*

Consolidación	Porosidad	$A_0$	$A_1$
Consolidada	10% a 15%	2.137	0.6612
Moderadamente Consolidada	15% a 25%	1.829	0.692
Poco consolidada	>25%	-0.4575	0.9402

*Nota:* De la Torre, Pablo. Selección de brocas por correlación. 2008

En el caso de las arcillas existe una correlación semejante donde los módulos estático y dinámico están dados en  $10^6$  psi.

$$\varepsilon_s = 0.0482 * \varepsilon_d^2 + 0.2334 * \varepsilon_d \quad (16)$$

Para finalizar el proceso, el esfuerzo uniaxial no confinado está dado por la ecuación 17.

$$UCS = 0.2787 * \varepsilon_s^2 + 2.458 * \varepsilon_s \quad (17)$$

Donde el UCS está expresado en Kpsi y el módulo estático en  $10^6$  psi.

Algunos estudios realizados en diferentes campos del mundo han permitido establecer correlaciones para estimar el valor del UCS haciendo uso de las propiedades de la roca, haciendo uso de registros. Se muestra en las tablas 4, 5 y 6 las principales correlaciones utilizadas para el cálculo de esfuerzo no confinado (UCS) para las principales litologías.

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

**Tabla 4**

*Relaciones empíricas entre la resistencia a la compresión no confinada (UCS) y otras propiedades físicas en areniscas*

Eq. no.	UCS (MPa)	Region where developed	General comments	Reference
(1)	$0.035V_p - 31.5$	Thuringia, Germany	–	Freyburg (1972)
(2)	$1200\exp(-0.036\Delta t)$	Bowen Basin, Australia	Fine grained, both consolidated and unconsolidated sandstones with all porosity range	McNally (1987)
(3)	$1.4138 \times 10^7 \Delta t^{-3}$	Gulf Coast	Weak and unconsolidated sandstones	-
(4)	$3.3 \times 10^{-20} \rho^2 V_p^4 [(1+v)/(1-v)]^2 (1-2v) [1+0.78V_{clay}]$	Gulf Coast	Applicable to sandstones with UCS > 30 MPa	Fjaer et al. (1992)
(5)	$1.745 \times 10^{-9} \rho V_p^2 - 21$	Cook Inlet, Alaska	Coarse grained sandstones and conglomerates	Moos et al. (1999)
(6)	$42.1 \exp(1.9 \times 10^{-11} \rho V_p^2)$	Australia	Consolidated sandstones with $0.05 < \phi < 0.12$ and UCS > 80 MPa	-
(7)	$3.87 \exp(1.14 \times 10^{-10} \rho V_p^2)$	Gulf of Mexico	-	-
(8)	$46.2 \exp(0.027E)$	-	-	-
(9)	$2.28 + 4.1089E$	Worldwide	-	Bradford et al. (1998)
(10)	$254 (1 - 2.7\phi)^2$	Sedimentary basins worldwide	Very clean, well-consolidated sandstones with $\phi < 0.3$	Vernik et al. (1993)
(11)	$277 \exp(-10\phi)$	–	Sandstones with $2 < UCS < 360$ MPa and $0.002 < \phi < 0.33$	-

*Nota:* Chang, Chandong. Empirical relations between rock strength and physical properties in sedimentary rocks 2006

**Tabla 5**

*Relaciones empíricas entre la resistencia a la compresión no confinada (UCS) y otras propiedades físicas en arcillas*

Eq. no.	UCS (MPa)	Region where developed	General comments	Reference
(12)	$0.77 (304.8 / \Delta t)^{2.93}$	North Sea	Mostly high porosity Tertiary shales	Horsrud (2001)
(13)	$0.77 (304.8 / \Delta t)^{2.93}$	Gulf of Mexico	Pliocene and younger	-

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

(14)	$1.35 (304.8 / \Delta t)^{2.6}$	Globally	-	-
(15)	$0.5 (304.8 / \Delta t)^3$	Gulf of Mexico	-	-
(16)	$10 (304.8 / \Delta t - 1)$	North Sea	Mostly high porosity Tertiary shales	Lal (1999)
(17)	$7.97E^{0.91}$	North Sea	Mostly high porosity Tertiary shales	Horsrud (2001)
(18)	$7.22E^{0.712}$	-	Strong and compacted shales	-
(19)	$1.001\phi^{-1.143}$	-	Low porosity ( $\phi < 0.1$ ) high strength ( $\sim 79$ MPa) shales	Lashkaripour and Dusseault (1993)
(20)	$2.922\phi^{-0.96}$	North Sea	Mostly high porosity Tertiary shales	Horsrud (2001)
(21)	$0.286\phi^{-1.762}$	-	High porosity ( $\phi > 0.27$ ) shales	-

*Nota:* Chang, Chandong. Empirical relations between rock strength and physical properties in sedimentary rocks 2006

**Tabla 6**

*Relaciones empíricas entre la resistencia a la compresión ilimitada (UCS) y otras propiedades físicas en caliza y dolomita*

Eq. no.	UCS (MPa)	Region where developed	General comments	Reference
(22)	$(7682/\Delta t)^{1.82} / 145$	-	-	Miltzer and Stoll (1973)
(23)	$10^{(2.44+109.14/\Delta t)} / 145$	-	-	Golubev and Rabinovich (1976)
(24)	$13.8E^{0.51}$	-	Limestone with $10 < UCS < 300$ MPa	-
(25)	$25.1E^{0.34}$	-	Dolomite with $60 < UCS < 100$ MPa	-
(26)	$276 (1 - 3\phi)^2$	Korobcheyev deposit, Russia	-	Rzhevsky and Novick (1971)
(27)	$143.8 \exp(-6.95\phi)$	Middle East	Representing low to moderate porosity ( $0.05 < \phi < 0.2$ ) and high UCS ( $30 < UCS < 150$ MPa)	-

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

(28)	$135.9\exp(-4.8\phi)$	-	Representing low to moderate porosity ( $0 < \phi < 0.2$ ) and high UCS ( $10 < \text{UCS} < 300 \text{ MPa}$ )	-
------	-----------------------	---	---	---

*Nota* : Chang, Chandong. Empirical relations between rock strength and physical properties in sedimentary rocks 2006

Los métodos nombrados en este capítulo permiten hacer la selección de la broca por medio del cálculo del esfuerzo no confinado para decidir cuáles son las características que va a tener la broca considerando algunas referencias dadas por la IADC para un intervalo de UCS.

Los valores de UCS permiten conocer el tipo de litología que se va a perforar por medio de tablas de referencias para un rango de valores de UCS para las formaciones más comunes (Tabla 7 y 8).

**Tabla 7**

*Relación de UCS con la resistencia de la formación*

UCS (PSI)	TIPO DE LITOLOGÍA
<b>MENOS DE 1500</b>	Formaciones muy débiles – Alta plasticidad con baja resistencia (margas y arcillas)
<b>1500 A 3000</b>	Formaciones débiles -Baja resistencia (margas, evaporitas y lutitas)
<b>3500 A 7500</b>	Formaciones débiles a medianamente débiles – baja resistencia, Inter laminadas con secuencias de alta resistencia (lutitas, pizarras, lignitos)
<b>7500 A 15000</b>	Formaciones medianamente duras - alta densidad, alta resistencia, pero sin lentes abrasivos (lutitas, areniscas y carbonatos)
<b>15000 A 30000</b>	Formaciones duras - alta resistencia, con lentes abrasivos (areniscas, limolitas y dolomitas)
<b>MAS DE 30000</b>	Formaciones extremadamente duras - resistencia muy alta, muy abrasivas (rocas ígneas y metamórficas)

*Nota*: Análisis y diseño de un plan de brocas estandarizado mediante el estudio litológico y de parámetros operacionales para la perforación de pozos direccionales en el campo sachá, 2015

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

**Tabla 8***Dureza de formación con base en UCS*

<b>UCS (PSI)</b>	<b>FORMACIÓN</b>
<b>MENOS DE 4500</b>	Muy blanda
<b>4500 A 9000</b>	Blanda
<b>9000 A 13500</b>	Blanda a media
<b>13500 A 18000</b>	Media
<b>18000 A 22500</b>	Medianamente dura
<b>22500 A 27000</b>	Dura
<b>MAS DE 27000</b>	Extremadamente dura

*Nota:* Análisis y diseño de un plan de brocas estandarizado mediante el estudio litológico y de parámetros operacionales para la perforación de pozos direccionales en el campo sachá, 2015

Conociendo el tipo de litología se puede estimar que tan abrasiva puede llegar a ser esta con respecto a la compresibilidad de la formación. Esta característica es fundamental al momento que se va a determinar el tamaño de la estructura de corte que está dada por el diámetro de los cortadores que se utilizará en la broca. Tomando en consideración el valor de UCS se puede hacer uso de las tablas de referencia para el número de aletas y diámetro de cortadores en función del esfuerzo no confinado (Tabla 9).

**Tabla 9***Estimación del diámetro de cortadores y número de aletas con el UCS*

<b>UCS (PSI)</b>	<b>DIÁMETRO DE CORTADORES (PULGADA)</b>	<b># DE ALETAS</b>
<b>MENOS DE 3000</b>	22	3 a 4
<b>3000 A 6000</b>	19	4 a 5

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

<b>6000 A 10000</b>	19 a 16	5 a 6
<b>10000 A 15000</b>	16	6 a 7
<b>15000 A 20000</b>	13	7 a 8
<b>20000 A 27000</b>	13 a 8	8 o mas
<b>MAS DE 27000</b>	Diamante	Impregnada

*Nota:* Análisis y diseño de un plan de brocas estandarizado mediante el estudio litológico y de parámetros operacionales para la perforación de pozos direccionales en el campo sachá, 2015

Una mayor cantidad de aletas permite tener más estructuras de corte, por lo que es capaz de perforar una mayor cantidad de pies sufriendo un desgaste menor. Mientras más cortadores tenga una broca, el repaso que tendrá que hacer cada uno es mínimo y en algunos casos, nula (Velasco, 2015).

Definido el número de aletas y el diámetro de cortadores se puede establecer el número de cortadores que puede tener la broca. Para tener una mayor tasa de penetración al momento de perforar se debe utilizar un menor número de cortadores, dado que entre mayor sea el número de cortadores es mayor el área de contacto que se tiene entre la broca y la formación.

Otra de las características de la broca que se ve influenciado por la abrasividad de la formación es el perfil de la broca, que es un factor que define otras propiedades como: la densidad de los cortadores, la hidráulica, la estabilidad y la capacidad de dirección de la broca.

El “perfil” se refiere a las distintas formas de cada aleta de la broca, vistas de lado. También se refiere a qué tan altos o bajos están los cortadores de la nariz con respecto al gauge. A diferencia de las brocas de conos, las cuales cuentan con perfiles muy similares, las brocas de cortadores fijos

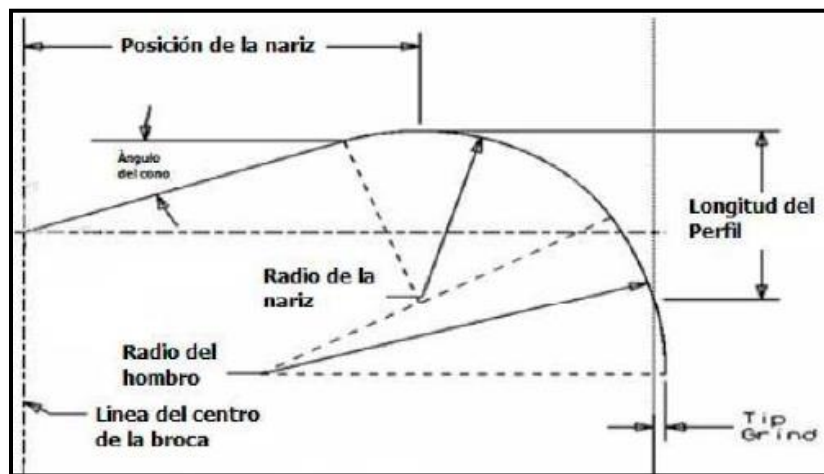
## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

cuentan con cuatro tipos principales. Cada uno de estos es utilizado para obtener un cierto resultado durante la perforación y debe ser escogido con cuidado (Velasco, 2015).

En la figura 17 se observa la estructura del diseño del perfil de una broca PDC.

**Figura 17**

*Estructura del diseño del perfil del la broca PDC*



*Nota:* Halliburton, 2012

#### **4. Metodología y elaboración de una herramienta computacional para el diseño de brocas PDC**

En el presente capítulo se muestra el flujo de trabajo y los diferentes aspectos integrados para entregar como resultado una herramienta computacional con lenguaje especializado, con la aplicación de las conclusiones y recomendaciones de diversos autores en el tema de brocas de perforación para entregar a la comunidad académica un instrumento guía en la comprensión del diseño y selección de las brocas de perforación PDC.

Con base en la literatura consultada, donde se evidencian las investigaciones de muchos expertos en temas de mecánica de rocas, desgaste de brocas y evaluación del comportamiento de

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

los parámetros de perforación con respecto a la correcta selección de la herramienta, se propone la siguiente metodología que busca unir las facilidades en integración computacional con el entorno concerniente al diseño de brocas PDC.

### 4.1 Elección del lenguaje de programación

El análisis bibliográfico y los diferentes procesos y correlaciones en la literatura fueron el primero paso para encontrar la mejor forma de diseñar una broca, pero en el momento de expresar una investigación en un entorno de programación existen muchas alternativas para elegir.

La mayoría de los lenguajes existentes son versátiles y aplicables a diferentes ámbitos, pero, en la mayoría de los casos, hay uno que se acopla de mejor manera a las necesidades que tiene el problema o la actividad a realizar.

Antes de elegir una estructura sobre el cual trabajar, se tuvo en cuenta que dependiendo del enfoque que hay para cada uno de forma específica e independiente a la elección general como es el caso de JavaScript o JQuery, que serán necesarios como complemento del desarrollo, los siguientes entornos de trabajo sirvieron como preselección del lenguaje ideal.

#### ✓ **Lenguaje para el desarrollo web**

En el mundo de las páginas web el lenguaje más usado y que servirá como estructura para una interfaz sólida en HTML, el cual es un lenguaje demarcado, para dar estilo es recomendable CSS. Para el caso de generar páginas de forma dinámica y a fin con grandes bases de información es PHP y Python. Cabe resaltar que al realizar una página web existe un entorno de usuario u otro de servidor que aplican diferentes atributos.

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

### ✓ **Lenguaje para escritorio**

Este tipo de lenguajes se direcciona a la lectura multiplataforma, es decir que pueden crear programas que se pueden usar en distintos sistemas, un ejemplo de ello es Python, el cual tiene una gran versatilidad y es un lenguaje relativamente fácil de aprender. Así mismo el lenguaje GTK+ es usado en el desarrollo de programas en sistema operativos como Windows y Mac.

### ✓ **Lenguaje para aplicativos móviles**

De igual manera a los entornos de escritorio, para equipos móviles también es necesario un lenguaje que permita la compatibilidad de sistemas y plataformas, por lo cual los diferentes creadores de sistemas de cada entorno móvil crearon sus lenguajes compatibles, Android, iOS, Ubuntu Phone Y PhoneGap son algunos de los ejemplos. HTML5 y Kivy pueden ser lenguajes validos a usar, pero la experiencia no será tan fluida.

### ✓ **Lenguaje para desarrollo en ciencias**

En el campo de las ciencias el lenguaje más usado y el más nutrido por aportes de toda la comunidad de desarrolladores en Python, se han creado un sin número de librerías que interactúan entre sí e incluso se pueden acoplar otros lenguajes al entorno. Para el enfoque estadístico se usa el lenguaje R y asimismo C++ y Matlab constituyen las mejores alternativas.

### ✓ **Lenguaje para entorno gráfico y de animación**

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

La animación gráfica muchas veces necesita de múltiples lenguajes para crear un entorno sólido y agradable con el usuario, los más destacados en el campo son Java, C++ y Python, se requiere un lenguaje multiplataforma y versátil.

### *4.1.1 Características de los lenguajes de programación más usados*

Con el fin de generar el desarrollo con las mejores características posibles y pensando en la adaptabilidad del aplicativo, se seleccionaron los lenguajes con mejor uso y versatilidad por diferentes campos del conocimiento. Cada uno de ellos tiene características que se evaluaron.

#### ✓ **Python**

Es un lenguaje que se puede denominar para prototipado, lo que indica que sus desarrollos se prestan para la creación de compendios independientes, es usado en mayor medida por la comunidad científica con el fin de generar aplicaciones rápidas para luego añadir mejoras.

Presenta facilidad para el aprendizaje y puede ser enseñado o usado por personas que inician en el desarrollo como primer lenguaje de programación. Python parte de la idea que los desarrolladores pasan más tiempo en la lectura de código que en su propia escritura, por lo cual forzar a los desarrolladores a proponer un código legible fácilmente con su sintaxis.

Hay diferentes proyectos en los que este lenguaje funciona de una manera excelente como páginas web, acceso a bases de datos, desarrollo gráfico, aplicaciones de escritorio, juegos entre otros.

#### ✓ **Matlab**

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

El lenguaje Matrix Laboratory o laboratorio de matrices en español, en un sistema de cómputo numérico más que un lenguaje propiamente dicho, ofrece un entorno de desarrollo integrado con sintaxis propia.

Su uso habitual en la representación de datos y funciones, creación de interfaz de usuario, implementación de algoritmos entre otras. Tiene la facultad de comunicación con programas desarrollados en otros lenguajes.

### ✓ **Java**

Este es un lenguaje multiplataforma orientado a objetos que es similar al lenguaje C++, pero con una especie de simplificación para evadir ciertas características que causan errores. El crecimiento de sus librerías y componentes obedece a la gran cantidad de usuarios y que su uso es direccionado mayormente a la creación de aplicativos portátiles o que se pueden ejecutar en diferentes sistemas.

Su portabilidad permita que esté presente en dispositivos que van desde celulares hasta electrodomésticos. Java no se compila habitualmente en código nativo, sino en bytecode. Esta estrategia de compilar el código hasta la ejecución de la aplicación mejora la portabilidad de las aplicaciones.

### ✓ **C++**

Es un lenguaje que, aplicado de manera correcta, genera una reducción en consumo de recursos por parte del equipo donde sea ejecutado, esto quiere decir que se realiza a bajo nivel, dando control de la manera cómo de usa los recursos en los dispositivos. Esto lo hace un lenguaje muy usado en el desarrollo gráfico y el mundo de los juegos de video.

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

Obedece a criterios de optimización en procesos, lo que lo hace ideal en el desarrollo de aplicaciones comerciales de escritorio como Adobe. En el ámbito web, cuando se necesita un rendimiento alto o de manejo excesivo de datos, es muy útil.

Uno de sus puntos en contra es que no es fácil de mantener ya que necesita de muchas líneas de código por lo que el tamaño de la consola del desarrollador debe ser de gran tamaño para escalar una aplicación y al necesitar del ingreso manual de muchas cosas, es fácil que las personas con poca experiencia cometan errores. En la Tabla 10 se observa un comparativo entre los lenguajes de programación más utilizados.

**Tabla 10**

*Comparativo de lenguajes de programación más usados*

LENGUAJE	USO ACTUAL	SOPORTE ORIENTACIÓN A OBJETOS. POO	CURVA DE APRENDIZAJE	VENTAJA	DESVENTAJAS
<b>PYTHON</b>	Múltiples áreas del conocimiento, diseño, bases de datos y web	La versión actualizada soporta todos los mecanismos POO	Iniciación un poco compleja, pero fácil escritura y apoyo común	Fácil lectura y aprendizaje	Más lento
<b>C++</b>	Es el tercer lenguaje más usado se centra en la rama de la ciencia.	Soporta todos los mecanismos POO	Al ser un lenguaje POO simple, pero puede ser difícil.	Menos memoria, Control de recursos, Código rápido	Manejo de memoria manual, mayor dificultad.
<b>JAVA</b>	Enfocado en aplicativos portátiles y como complemento de otros lenguajes.	Soporta la mayoría de mecanismos POO	Lenguaje un poco complejo por su sintaxis	Robusto, seguro, múltiples entornos de alto rendimiento	Reglas estrictas y usa más memoria que C++

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

Teniendo en cuenta que la metodología del presente trabajo se basa en la creación de una herramienta de escritorio para ordenador y tomando las diferentes recomendaciones encontradas en la literatura, se concluye que el mejor lenguaje de programación para la elaboración del software es Python.

### ***4.1.2 Python como lenguaje de alto nivel***

La elección del lenguaje de programación permitió enfocar las ideas evaluando las facilidades que tiene este lenguaje con sus diferentes librerías, con el fin de elaborar una herramienta amigable con el usuario, pero sin perder la robustez en su código madre. Para cumplir con este fin fueron usadas de manera general 3 librerías las cuales cuentan con los atributos que se plasmaron en el diseño, NumPy, Matplotlib y Tkinter.

Por medio de estas herramientas se dio origen al aplicativo BDS (Bit Design Software), el cual es el resultado de la presente investigación.

**4.1.2.1 Librería NumPy y su aplicación en BDS.** Es la biblioteca que controla toda la parte numérica del sistema, consta de objetos de matriz multidimensionales y colecciones de rutinas para procesamiento de las mismas. Se aplica para realizar operaciones matemáticas y lógicas en matrices, Transformaciones de Fourier y rutinas para manipulación de formas, tiene funciones integradas para diversas áreas de la matemática como álgebra lineal y generaciones aleatorias.

En combinación con SciPy (Scientific Python) es un reemplazo de Matlab, lo que quiere decir que permite una integración efectiva y comprensión rápida al momento de vincular los lenguajes.

Los detalles del uso de esta librería se encuentran en el APENDICE B correspondiente al Manual técnico de la herramienta.

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

**4.1.2.2 Uso y aplicación de la librería Matplotlib en el aplicativo de diseño de brocas (BDS).** Es una de las bibliotecas más populares en el lenguaje, principalmente usado para la visualización de datos, realiza los gráficos presentados a partir de datos en matrices. tiene una interfaz de procedimiento llamada Pylab que está creada para pertenecer también a Matlab. Su uso se centra en la creación de figuras, ejes, objetos, cuadrículas entre otros.

En la figura 18 se puede observar un fragmento del código que muestra el uso de las librerías Matplotlib y Math de Python utilizados para el desarrollo de la geometría de las aletas.

**Figura 18**

*Ejemplo del uso de MATPLOTLIP en BDS*

```
def VistalateralBladGeo():
    VistalateralBP()
    if CountBlPG.get() <= 4:
        for i in range(int(CountBlPG.get())):
            GrafSup.plot([0, r1*cos(math.radians(phi*(i))), [0, -r1*sin(math.radians(phi*(i)))], color='#1918B0', linestyle=
            GrafSup.plot([disp*cos(math.radians(phi*(i+1))), r1*cos(math.radians(phi*(i)+rot+9.54*disp)),
            [-disp*sin(math.radians(phi*(i+1))), -r1*sin(math.radians(phi*(i)+rot+9.54*disp))], color='#1918B0', Lines
            GrafSup.plot([0, disp*cos(math.radians(phi*(i+1))), [0, -disp*sin(math.radians(phi*(i+1)))], color='#1918B0', L
        else:
            for i in range(int(CountBlPG.get())):
                if (i)%2==0:
                    GrafSup.plot([0, r1*cos(math.radians(phi*(i))), [0, -r1*sin(math.radians(phi*(i)))], color='#1918B0', Lines
                    GrafSup.plot([disp*cos(math.radians(phi*(i+1))), r1*cos(math.radians(phi*(i)+rot+9.54*disp)),
                    [-disp*sin(math.radians(phi*(i+1))), -r1*sin(math.radians(phi*(i)+rot+9.54*disp))], color='#1918B0',
                    GrafSup.plot([0, disp*cos(math.radians(phi*(i+1))), [0, -disp*sin(math.radians(phi*(i+1)))], color='#1918B0
                else:
                    GrafSup.plot([r2*cos(math.radians(phi*(i))), r1*cos(math.radians(phi*(i)))],
                    [-r2*sin(math.radians(phi*(i))), -r1*sin(math.radians(phi*(i)))], color='#1918B0', linestyle='-', Lines
                    GrafSup.plot([r2*cos(math.radians(phi*(i)+rot+disp*(9.54+1.92*(r1-r2))), r1*cos(math.radians(phi*(i)+rot+
                    [-r2*sin(math.radians(phi*(i)+rot+disp*(9.54+1.92*(r1-r2))), -r1*sin(math.radians(phi*(i)+rot+9.54*di
                    GrafSup.plot([r2*cos(math.radians(phi*(i))), r2*cos(math.radians(phi*(i)+rot+disp*(9.54+1.92*(r1-r2)))],
                    [-r2*sin(math.radians(phi*(i))), -r2*sin(math.radians(phi*(i)+rot+disp*(9.54+1.92*(r1-r2)))], color='#
    VistalateralBladGeo()
    Data[0]=4
    Modulos.tab(4, state="normal")
```

*Nota:* Herramienta BDS

Los detalles del uso de esta librería se encuentran en el APENDICE B correspondiente al Manual técnico de la herramienta.

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

**4.1.2.3 Interfaz de usuario y la librería Tkinter.** Python provee diferentes opciones para el desarrollo de interfaces gráficas para la interacción de los usuarios, una de ellas es la librería Tkinter, la cual proporciona una forma rápida y fácil de crear aplicaciones.

El flujo de trabajo implementado con esta librería es: importe del módulo en el código madre, creación de la ventana principal, agregar los widgets compatibles y por último ingresar al bucle de eventos principal para tomar medidas contra cada evento que es realizado por el usuario.

En la figura 19 se aprecia un fragmento del código que muestra el uso de las librerías Tkinter de Python utilizados para el desarrollo de los botones y widgets en la herramienta BDS.

**Figura 20**

*Ejemplo del uso de Tkinter en BDS*

```
Inicia modulo Blades Profile
countB1PG=DoubleVar()
countB1PGLabel=tk.Label(OpcB1PG,text="Blade count").place(x=1,y=1)
countB1PGEntry=tk.Entry(OpcB1PG,textvariable=CountB1PG,state='normal')
countB1PGEntry.bind('<Return>',CountB1PGfuntion)
countB1PGEntry.place(x=85,y=1)

aB1PG=DoubleVar()
aB1PGLabel= tk.Label(OpcB1PG,text="2nd radius bl.").place(x=1,y=26)
aB1PGLabelmed=tk.Label(OpcB1PG,text="inch").place(x=213,y=26)
aB1PGEntry=tk.Entry(OpcB1PG,textvariable=RaB1PG,state='disabled')
aB1PGEntry.bind('<Return>',RaB1PGfuntion)
aB1PGEntry.place(x=85,y=26)
```

*Nota:* Herramienta BDS

## 4.2 Selección del método para la interfaz de diseño

Contando con el lenguaje Python y las diferentes características que este provee, así como con el análisis de las metodologías de selección de brocas expuestas en el capítulo 2, se escoge el método de resistencia al esfuerzo uniaxial no confinado (UCS) ya que cuenta con una manera sencilla y efectiva de vincular la dureza de las rocas con interacción de los diversos parámetros que la conforman.



## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

### 4.2.2 Diámetro de los cortadores

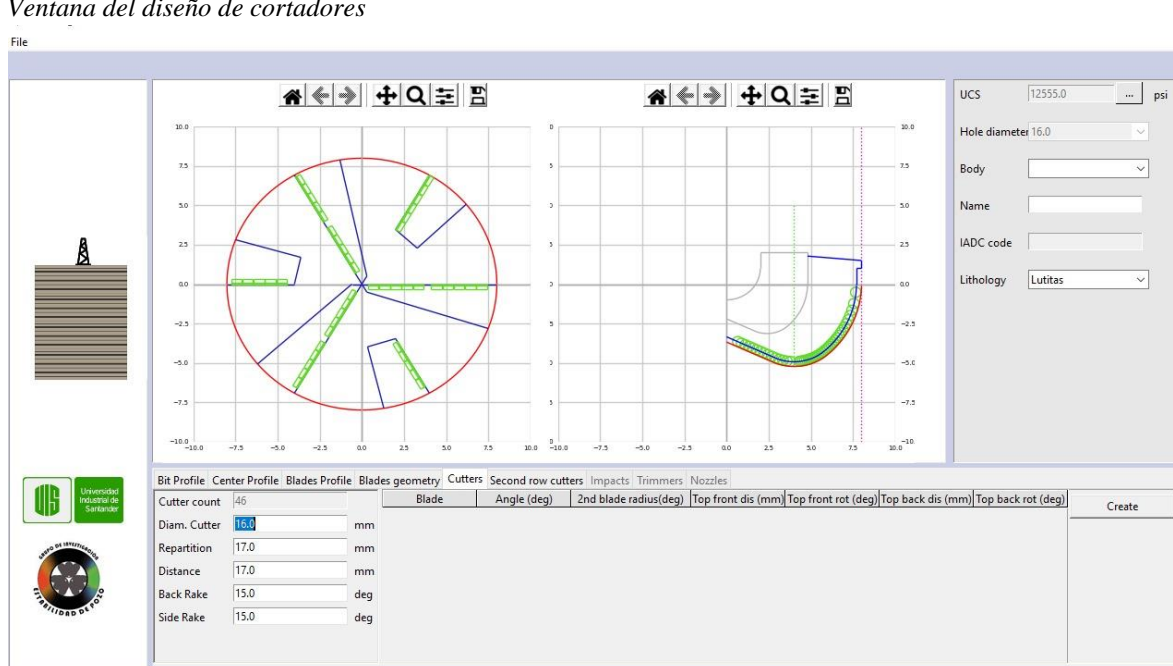
Con lo descrito en el capítulo dos se pudo observar que la compresibilidad de la formación es el punto de mayor importancia en la selección del diámetro de los catadores. La tabla 9 muestra la relación de este parámetro con el Esfuerzo Uniaxial No confinado y de allí se parte para hacer la incorporación de valores a la herramienta computacional.

En BDS la sección del diámetro de los cortadores está evaluado con la tabla 9 y el sistema permite que el usuario ingrese valores según el rango estimado con el UCS ingresado. Mientras mayor sea el número de cortadores, menor será la tasa de penetración, ya que es mayor el área de la broca que está en contacto con el fondo del agujero, pero alargará la vida de la broca y la cantidad de metros que podrá perforar. Para ver en detalle dirigirse al Apéndice B.

En la figura 21 se puede apreciar el perfil de los cortadores obtenidos con la herramienta BDS.

**Figura 26**

*Ventana del diseño de cortadores*



*Nota:* Herramienta BDS

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

## 4.2.3 Numero de aletas

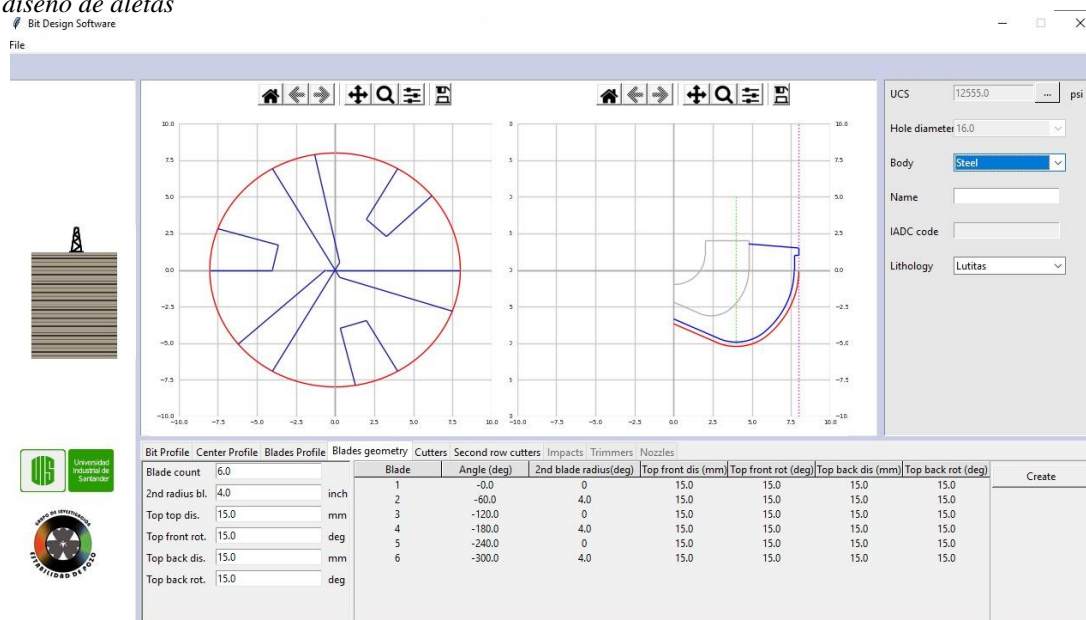
La litología esperada es el parámetro más importante en el momento del diseño de las aletas, para el caso particular de las areniscas que son rocas abrasivas, es prudente aplicar, mayor número de aletas, en la tabla 9 se muestra la relación entre el esfuerzo uniaxial no compresivo y el rango de aletas que pueden ser usadas.

La herramienta BDS brinda la posibilidad de seleccionar la cantidad de aletas dentro del rango definido por el UCS y adicionalmente parametriza el radio de las aletas secundarios, y permite ingresar los parámetros para dar forma y el grosor de las aletas, que de igual manera se encuentra enmarcado en el dato de UCS inicial. El principio de desarrollo se encuentra plasmado en el Apéndice B.

En la figura 22 se muestra la interfaz de la herramienta BDS en el módulo de geometría de las aletas.

Figura 29

Ventana de diseño de aletas



Nota: Herramienta BDS

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

**4.2.4 Densidad de los cortadores**

A mayor cantidad de cortadores la tasa de penetración se verá reducida debido al área de contacto, por lo que es prudente estimar este dato de acuerdo con el número de aletas que el UCS ha determinado.

Con la herramienta BDS la densidad de cortadores está parametrizada por la cantidad de aletas ingresadas y el diámetro respectivo para cada cortador, de igual manera el diámetro de la broca limita su ubicación, el programa hace una distribución geométrica del espacio disponible.

**4.2.5 Angulo de corte**

Este parámetro es la inclinación con la cual será intervenida la formación con el contacto de los cortadores, estos ángulos mejoran la resistencia al impacto ocasionados por las intercalaciones. Si la formación perforada es suave, se recomienda el uso de ángulos bajos, por el contrario, para formaciones agresivas es prudente un ángulo alto.

El valor del ángulo de corte que se debe considerar con respecto a la dureza de la formación se muestra en la Tabla 11.

**Tabla 11**

*Angulo de corte y características de la roca*

<b>Ángulo (grados)</b>	<b>Dureza de la formación</b>	<b>Otras características</b>
5 a 10	Muy suave	Genera una mayor ROP
15	Todas las formaciones	Funciona mejor en formaciones blandas
20	Todas las formaciones	Mejora la vida del cortador y funciona mejor en formaciones abrasivas (areniscas)
30	Formaciones duras	Los cortadores con éste ángulo generalmente se ubican em el calibre

*Nota:* De La Torre Pablo, 2008

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

### **4.3 Integración de la sección de evaluación**

Dentro de los atributos de la herramienta computacional se encuentra una sección que, a diferencia de la sección de diseño, se encarga de hacer un análisis de las brocas que el usuario posea y compararlas con los estratos subyacentes por medio del UCS, este análisis se lleva a cabo en conformidad con los parámetros IADC. Si una broca determinada cumple con todos será apta para perforar, de lo contrario será rechazada. Adicionalmente se presenta la tabulación de un reporte en el que se expresa la o las razones que dieron el rechazo para que el usuario aplique conocimientos ingenieriles en brocas y tome la determinación que consideres más conveniente.

La herramienta genera una evaluación en bucle digito por dígito del código IADC con el propósito de compararlo con las condiciones de compresibilidad que debería tener una formación ideal para el uso de esta, al encontrar una inconformidad del rango establecido finaliza el proceso y descarta la broca. En el Apendice B se encuentran los lineamientos que sigue esta sección.

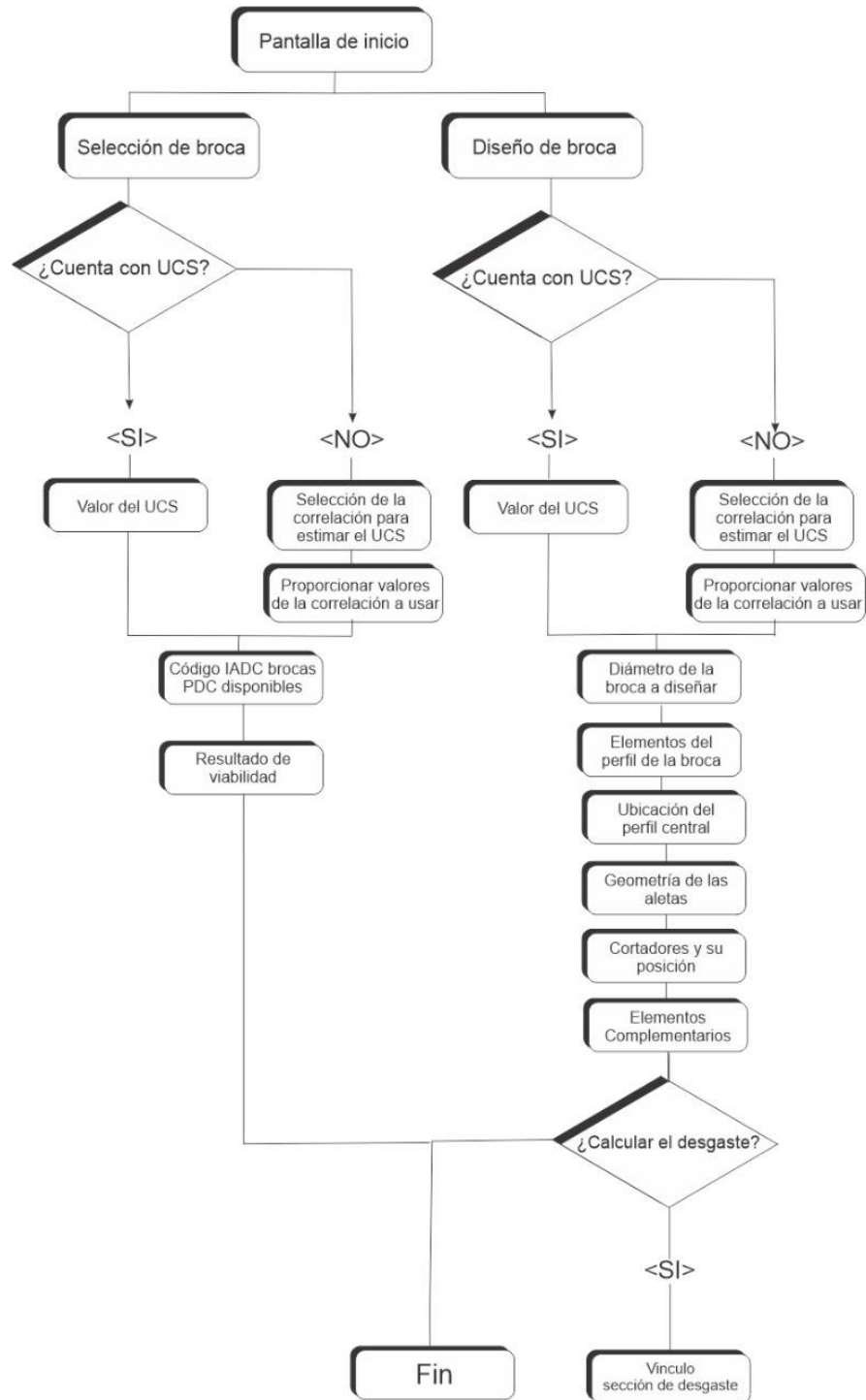
### **4.4 Estructura esquemática de la herramienta computacional**

El flujo de trabajo que presenta la herramienta BDS es de secuencia, en donde los parámetros iniciales son necesarios para activar las opciones posteriores, de esta manera el sistema puede almacenar la información suministrada para usarla en los diferentes procesos. En la figura 23 se puede observar el cuerpo general del software y la manera cómo hace el recorrido lógico para solicitar o vincular cada una de las secciones.

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

Figura 32

Esquema general BDS



Nota: Herramienta BDS

#### 4.5 Requerimientos del sistema

Para el funcionamiento adecuado de la herramienta BDS es prudente contar con parámetros mínimos en el equipo de cómputo que se desee ejecutar, en la tabla 12 se pueden observar estos lineamientos mínimos con los que se puede usar el software.

**Tabla 12**

*Requerimientos del sistema*

<b>CPU</b>	Intel Celeron 800 MHz (Intel Core 2 Duo 2 GHz recomendados)
<b>RAM</b>	256 MB (2 GB recomendados)
<b>Espacio disponible en disco</b>	200 MB
<b>Sistema operativo</b>	Windows 8 o Windows 10

Además de los requisitos anteriores, para el módulo de Desgaste de la broca se requiere tener instalada la versión de MATLAB Runtime R2021a.

#### 4.6 Rango operativo

La herramienta BDS cuenta con un entorno de visualización plasmado en un plano que tiene unas dimensiones de 1280\*680 pixeles, los cuales pueden definir de manera aceptable diseños de broca de hasta 48 pulgadas.

De la misma manera el número de aletas para que el diseño sea definido y no haya problemas de visualización es de máximo 10, teniendo como base mínima de diseño 3 aletas ya que no se presentan usos menores en la industria.

Continuando con los cortadores, el sistema no tiene límite en cantidad, pero de acuerdo con el número de aletas y la posición en que se deseen insertar, el analista deberá identificar la cantidad ideal a trabajar. El diámetro de los cortadores está dado en milímetros y por datos de actividad comercial pueden ir de 22 a 8 milímetros.

Los parámetros puntuales de localización en el espacio estarán enmarcados en las dimensiones dadas por el usuario para las secciones descritas anteriormente.

#### 4.7 Alcance de aplicación de la herramienta BDS

De acuerdo con las facilidades que se cuentan actualmente para el diseño y selección de brocas de PDC, el software BDS puede brindar el siguiente alcance (Tabla 13).

**Tabla 13**

*Alcance de aplicación de la herramienta BDS*

<b>Alcance</b>	<b>Descripción</b>
Uso particular del UCS	La herramienta define los parámetros geométricos de las brocas PDC en función del UCS.
Dinamismo	Cuenta con una interfaz muy didáctica e intuitiva para el usuario.
Interdependencia	Cuenta con módulos dedicados en cada fase del diseño de la broca que son sucesivos en su desarrollo.
Correcta selección	Permite hacer la correcta selección de las brocas con respecto a las clasificaciones IADC y el UCS
Software libre	No se necesita licencia algún programa para ejecutarlo.
Visibilidad versátil	Cuenta con la vista lateral y superior de la broca diseñada, así como interactuar con las vistas.

Como se puede observar en la tabla 13 la herramienta tiene muchas facilidades para el usuario y permite una detección intuitiva de cada sección, pero de la misma manera, hay algunos detalles con los que no cuenta.

#### 4.5 Diagrama de entidad relación

Al igual que una estructura general, el comportamiento de los actores para con la herramienta está definido por una secuencia lógica, a la que tienen acceso los diferentes usuarios de acuerdo

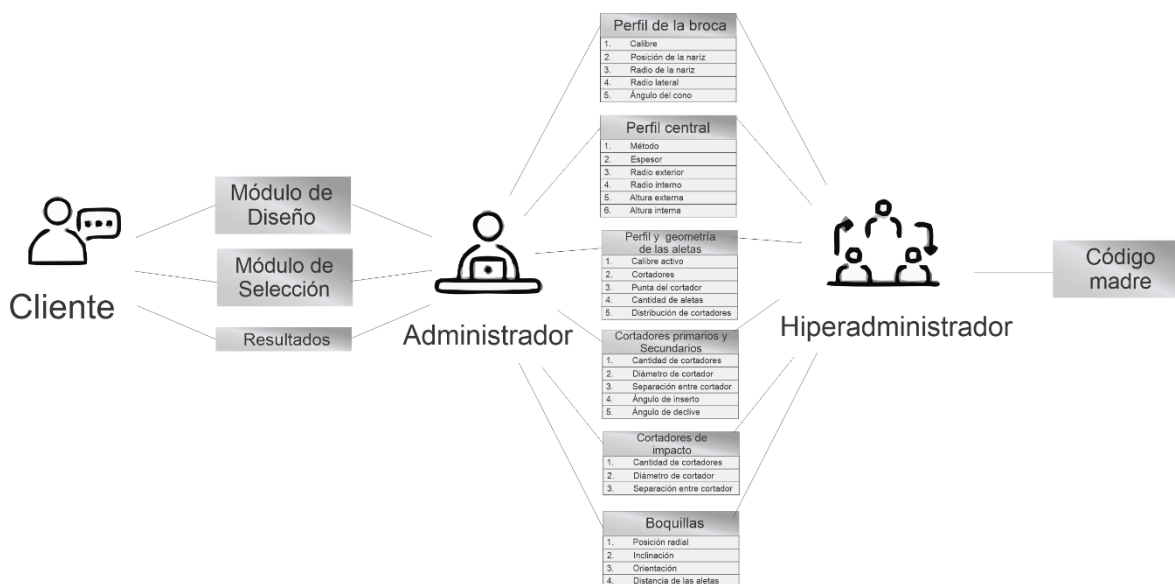
## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

con su nivel de profundidad dentro de la cadena de realización. En primera medida se encuentra el cliente, quien es el ente que solicita bien el diseño de una broca respectiva teniendo los parámetros necesarios o la escogencia de una broca para un estrato determinado a perforar. Luego el administrador tomará la información y por medio del software soluciona las solicitudes del cliente. Finalmente, el hiperadministrador es quien tiene el conocimiento y facultades del sistema para modificar directamente los atributos de la herramienta BDS, con el fin de acoplarla a necesidades de los demás involucrados. La figura 24 muestra el diagrama de entidad-relación y los accesos de cada uno. Parara mayor profundización dirigirse al manual técnico del APENDICE

B.

**Figura 35**

*Diagrama entidad - relación del software BDS*



*Nota:* Herramienta BDS

## 5. Análisis de resultados

La comparación de desempeño y resultados de la herramienta computacional BDS se realizó en 2 etapas, en primer lugar, se evaluó que los rangos de manejo de la herramienta coincidieran

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

con las diferentes brocas usadas en la optimización del programa de brocas para un campo de estudio en el Ecuador, lo que se presentó como análisis investigativo de la Escuela Politécnica Nacional. En segunda instancia, se evaluó el módulo de diseño de la herramienta BDS, para lo cual se compararon las principales características como son perfil de la broca, número de aletas y densidad de cortadores.

### 5.1 Análisis de resultados de la aplicación BDS en comparación con trabajos de campo

Javier López, autor de la investigación en optimización para el campo ecuatoriano, propone el uso de las brocas en las formaciones relacionadas en la tabla 14, donde se puede evidenciar las características de las brocas PDC usadas. Según el autor, este diseño representa una configuración adecuada para la reducción de costos y aumento de la tasa de penetración en cada caso.

**Tabla 14**

*Brocas óptimas pozo Ecuatoriano*

FORMACIÓN	TIPO DE BROCA	CÓDIGO IADC	CUERPO	#ALETAS	# CORTADORES	PERFIL	D"
ORTEGUAZA	PDC	S123	Acero	5	47	Parabólico medio	16
CONG. SUPERIOR CONG. INFERIOR	PDC	M423	Matriz	5	80	Parabólico medio	12 1/4
TENA BASAL TENA	PDC	M122	Matiz	4	35	Parabólico corto	12 1/4
NAPO HOLLÍN	PDC	M322	Matriz	6	46	Parabólico corto	8 1/2

*Nota:* Tomado y adaptado López R, 2012

Los datos obtenidos fueron el resultado del desarrollo técnico y cualitativo de la investigación y comparados con el programa de brocas que se tenía de manera convencional, en la tabla 13 se

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

puede observar el comparativo de las brocas que se usarían y las brocas optimizadas para esa perforación.

De esta manera se usa el aplicativo BDS para estimar si el módulo de selección cumple con lo propuesto por López R, y posteriormente se evalúa el módulo de diseño. Para efectos del programa, se presentan los UCS respectivo para las formaciones que se exponen (Tabla 15).

**Tabla 15**

*Optimización de brocas*

<b>FORMACIÓN</b>	<b>BROCA</b>	<b>BROCA</b>
	<b>INICIAL</b>	<b>OPTIMIZADA</b>
<b>ORTEGUAZA</b>	S223	S123
<b>TIYUYACU</b>	M423	M423
<b>TENA</b>	M324	M122
<b>NAPO HOLLÍN</b>	M322	M322

*Nota:* Tomado y adaptado López R, 2012

La optimización de las brocas descritas en la Tabla 15 por López R, se dio gracias a la aplicación Halliburton Drill Bits and Services. Este sistema global asociado a una aplicación puede hacer un análisis en el rendimiento de los registros de brocas ingresados, lo cual proporciona incremento en la eficiencia del programa de brocas, acceso rápido a la información y análisis comparativo del desempeño alcanzado durante la perforación. El autor tomo un total de 24 pozo perforados y al implementar la herramienta de Halliburton se obtuvo la correspondiente clasificación optimizada.

### **5.1.1 Comparación Módulo de selección**

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

Para hacer la evaluación de la efectividad del módulo de selección, se ingresan los valores de UCS de las formaciones expuestas por López R. con el objetivo de que el programa reconozca la selección correcta y emita un criterio de valor a tener en cuenta para la selección. En la figura 25 se observa el resultado obtenido con la herramienta BDS, se busca que la lectura de las tablas sea intuitiva para facilitar el trabajo del analista.

**Tabla 16**

*UCS de las formaciones analizadas*

FORMACIÓN	UCS	TOPE FT	BASE FT
ORTEGUAZA	3000	5619	6209
TIYUYACU	15000	6209	8143
TENA	4200	8143	8782
NAPO	9800	8782	10013
HOLLÍN	10300	10013	10240

*Nota:* Tomado y adaptado López R, 2012

Con base en la información de resistencia de la roca y las brocas para el caso inicial y optimizado, se obtuvo la siguiente relación de la herramienta BDS (figura 25):

**Figura 38**

*Resultado relación de bocas y formaciones*

Fms/IADC	S223	S123	M423	M324	M122	M322
Orteguaza(3000.0)	X	✓	X	X	✓	X
Tiyuyacu(15000.0)	X	X	✓	✓	X	✓
Tena(4200.0)	✓	✓	X	X	✓	X
Napo(9800.0)	✓	X	X	✓	X	✓
Hollin(10300.0)	X	X	✓	✓	X	✓

*Nota:* Herramienta BDS

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

Para poder hacer una comparación entre los datos de campo y los obtenidos en el módulo de Selección de la herramienta BDS, se ingresan los valores correspondientes al UCS de cada formación en estudio y de igual forma el código IADC de las brocas utilizadas. Las brocas optimas que da la herramienta se obtiene de un análisis de los caracteres del código IADC con respecto al UCS de la formación correspondiente. Para que la broca se reconozca como apropiada para el intervalo seleccionado, los cuatro caracteres del código deben estar acorde a las características geométricas de la broca dada por el rango de UCS ingresado.

Como se puede observar en la figura 25 el software emite un resultado en código de color, donde el color verde equivale a la correcta compatibilidad entre la broca y la formación a perforara, y el color rojo indica que la broca no es la más adecuada para la formación especificada, dado que uno de sus parámetros no es óptimo o no cumple con el rango de UCS para ese ítem y puede generarse mayor desgaste o menor tasa de penetración.

Los resultados muestran que, efectivamente, las brocas optimizadas son apropiadas para la formación que se seleccionaron y que las brocas, en el plan inicial, para las formaciones Orteguaza y Tena no constituían una selección eficiente.

### ***5.1.2 Análisis Módulo de diseño***

Los principales datos de entrada para el funcionamiento del módulo de diseño son: UCS, diámetro de la broca, posición de la nariz, numero de aletas, diámetro de los cortadores y distancia entre cortadores, para mayor profundización en el manual técnico (APENDICE B) se detalla los valores a ingresar en cada fase del diseño de la broca PDC.

El diseño de broca trae consigo la definición de algunos parámetros específicos como son la densidad de contadores en las aletas, el número de aletas, el diámetro de los cortadores, entre otros.

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

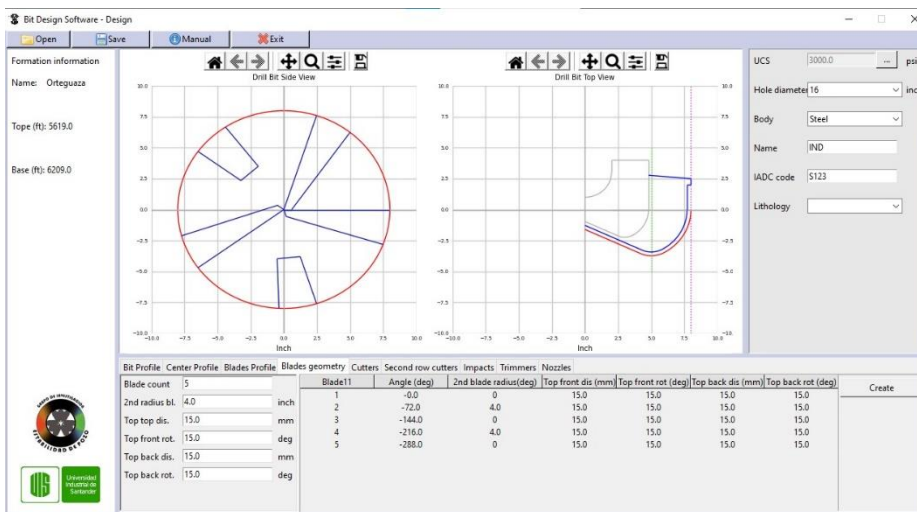
En el caso de estudio, los parámetros óptimos especificados se encuentran en la tabla 12. Por medio de la herramienta BDS se pudo determinar que:

### ✓ Perfil

Con base en el UCS y aplicando la herramienta computacional BDS se observó que los rangos aconsejados por el software para la elaboración del perfil dan como resultado un estimado a lo relacionado en la tabla 12, que son las formas óptimas de perfil para cada caso, cabe resaltar que geoméricamente el perfil está dado por la posición de la nariz, lo que lo hace el parámetro más crítico. En la figura 26 se evidencia el perfil parabólico medio de la broca necesaria para la formación Orteguaza.

**Figura 40**

*Perfil de broca para la formación Orteguaza*



*Nota:* Herramienta BDS

La figura 27 muestra el perfil parabólico corto necesario para perforar la formación Tena y una vista de plano del diseño base de la broca que se está diseñando.

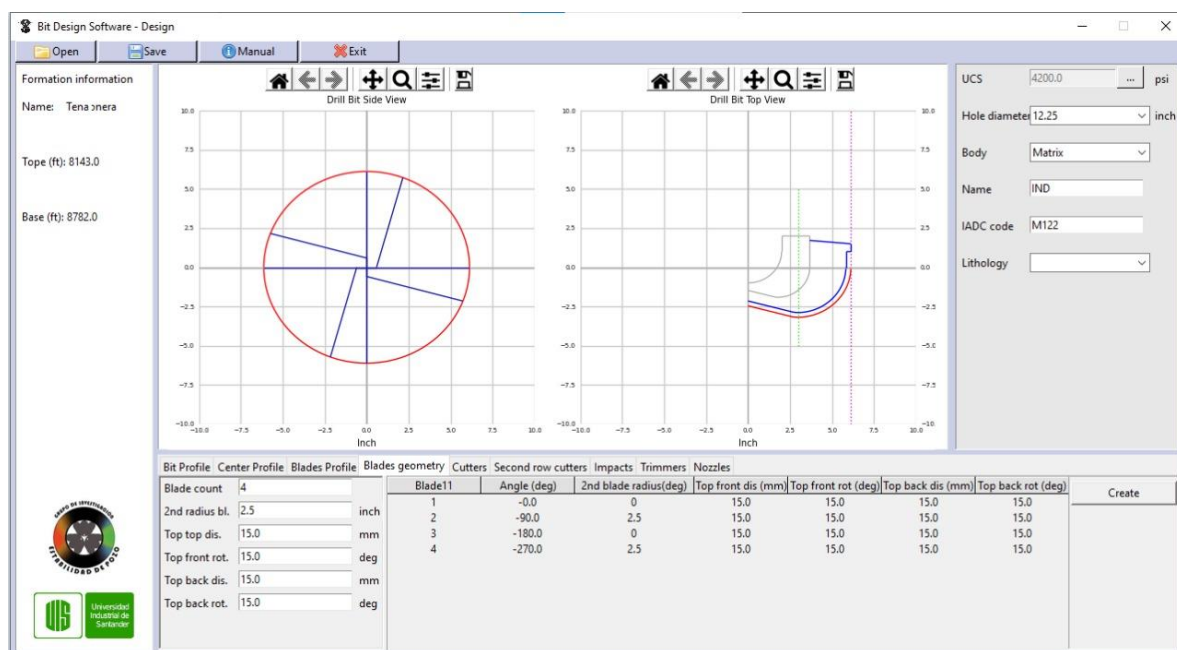


## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

En la Tabla 14 se puede observar que en el rango brindado por la herramienta BDS se encuentra el usado en el proceso de optimización del caso de estudio, de esta forma brinda una guía que, usando el criterio adecuado, da como resultado la selección correcta. En la figura 28 se puede evidenciar el resultado de las aletas obtenidas para la formación Tena.

**Figura 46**

*Número de aletas formación Tena usando BDS*



*Nota:* Herramienta BDS

De la misma manera, en la formación Tena, el valor de las aletas optimas está dentro del rango aceptado por la herramienta como se evidencia en la figura 28.

### ✓ Densidad de cortadores

Los cortadores con un parámetro que depende directamente de las dimensiones de la broca y de su tamaño respectivo, para el caso de estudio se tuvo en cuenta la densidad de cortadores como los cortadores totales incluidos los principales, secundarios y de impacto. En este sentido se pudo observar que la densidad de cortadores totales que la herramienta propone en su rango coincide

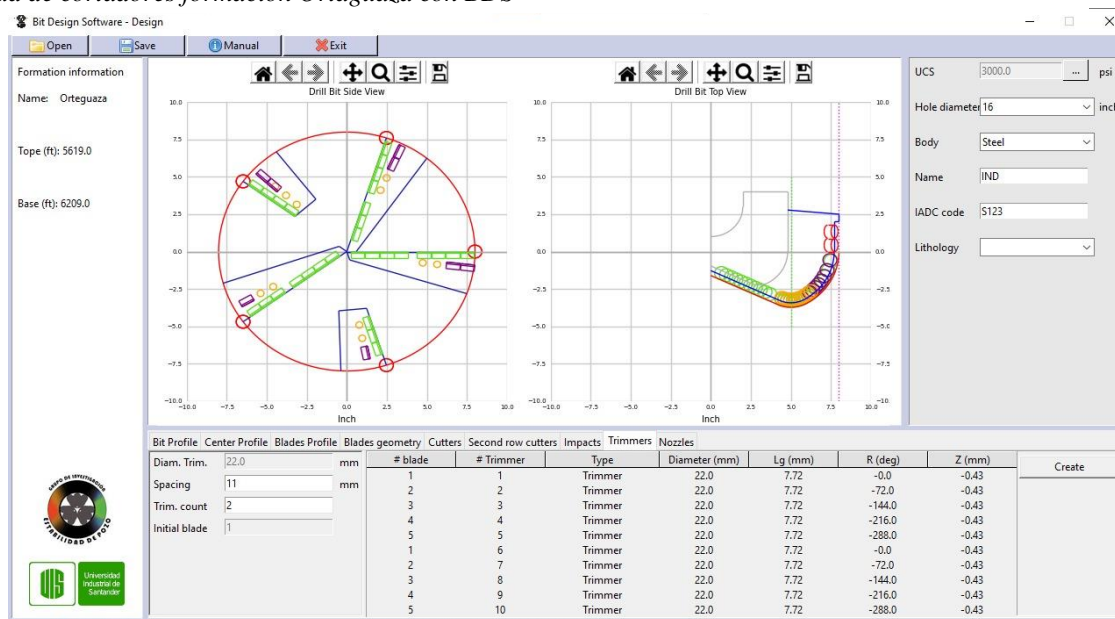
## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

con la optimización realizada para la perforación en las formaciones Ortegua y Tena (Tabla 17).

En la figura se puede observar la densidad de cortadores obtenida con la herramienta BDS para la formación Ortegua.

**Figura 48**

*Densidad de cortadores formación Ortegua con BDS*



*Nota:* Herramienta BDS

**Tabla 17**

*Resultados obtenidos en BDS comparados con los de campo*

FORMACIÓN	UCS (PSI)	PERFIL DE LA BROCA		# ALETAS		# CORTADORES	
		Campo	BDS	Campo	BDS	Campo	BDS
<b>ORTEGUAZA</b>	3000	Parabólico medio	Parabólico medio	5	5	47	47
<b>TENA</b>	4200	Parabólico corto	Parabólico corto	4	4	35	35
<b>NAPO HOLLÍN</b>	10300	Parabólico corto	Parabólico corto	6	6	46	44

*Nota:* Herramienta BDS

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

La Tabla 17 contiene un comparativo de los resultados de diseño encontrados en la optimización del diseño de brocas de un campo ecuatoriano y los bridados por la herramienta BDS, como se observa, el diseño se acopla con las condiciones óptimas, dando como incertidumbre de 5% para el numero de cortadores en formaciones con UCS iguales o superiores a 10300.

## 6. Conclusiones

- ✓ Mediante el presente proyecto se estructuró la herramienta BDS creada para computador programada en el lenguaje Python, la cual sirve para el diseño y selección de brocas PDC bajo el parámetro geomecánico UCS.
- ✓ Se desarrollo el manual técnico y de usuario de la herramienta BDS donde se presenta las especificaciones geométricas y de ingreso de datos del programa para el diseño y selección de brocas PDC.
- ✓ De acuerdo con la revisión bibliográfica realizada, el proceso de selección de brocas PDC de perforación se realiza principalmente de manera cualitativa, se realiza el análisis de registros y de pozos vecinos, pero en la mayoría de los casos prima el análisis de experiencias más que una evaluación sistematizada, lo cual puede generar algunos errores en el diseño de parámetros importantes de la broca PDC.
- ✓ Con base en la comparación de los resultados de campo y los emitidos por la herramienta BDS, se puede ratificar que el UCS brinda gran versatilidad como variable base de selección y diseño de brocas PDC.
- ✓ Al ser lenguaje de código abierto, Python permite la integración con otros lenguajes de programación y es muy versátil en la programación orientada a objetos, en comparación con los demás lenguajes especializados, facilita su aprendizaje y comprensión.
- ✓ Con base en la optimización de metodologías usadas en campo, la herramienta Bit Design Software brinda rangos de selección que se acoplan al diseño optimo, el analista tiene la responsabilidad de ingresar el valor que, de acuerdo con el desarrollo técnico, sea el apropiado para el perfil de la broca, el número de aletas y la densidad de cortadores que mejor se acople a las necesidades de la perforación en cuestión.

## 7. Recomendaciones

- ✓ Evaluar la posibilidad de incluir en el proceso de selección las características de algunos de los campos más importantes del país, para así generar bases de datos y reducir el tiempo en la selección cuando se trate de perforaciones en dichos campos.
- ✓ Incluir el efecto directo del esfuerzo uniaxial confinado (CCU) en la investigación y en el aplicativo, ya que puede generar una alternativa más precisa en la selección y diseño de cortadores, su tamaño y posición.
- ✓ Considerar la posibilidad de adaptar la herramienta BDS a otras plataformas digitales para el uso en tablets o celulares.
- ✓ Evaluar el comportamiento de la herramienta en formaciones con cambios muy representativos en el UCS, es decir, con alta heterogeneidad.
- ✓ Tener en consideración para incluir en el diseño de las brocas PDC parámetros operacionales como: ROP, RPM y WOB.
- ✓ Analizar el comportamiento de la herramienta en pozo con altas profanidades donde se presente temperaturas anormalmente elevadas.
- ✓ En el caso del diseño de la geometría para las aletas es prudente tener en consideración diferentes modelos para este fin, ya que la hidráulica y condiciones de la perforación pueden afectar en gran medida.
- ✓ Para la disposición de los cortadores se puede usar un esquema diferente a la distribución en espiral, con el fin de evaluar sus efectos y determinar la mejor para el proceso de diseño.

**Bibliografía**

- Agarwal S. & Agarwal N.(2008). Expandable and Contractable Drill Bit- A novel technology for hole enlargement. SPE 112345.
- Behbehani H; Behbehani M; Al-Khaldy M. & Esmail A. (2009). Two stages cutting structures of bi-center PDC bit provides two phases of destroying volumen of the rock, results faster penetration rate through deep section of carbonates formation in Kuwait. SPE 127473
- Botelho R.; Barreto J. ; Anato W. ; Uzayegui G. (2006). Drilling Optimization at the Aloctono Block in venezuela with the Utilization of Latest Technologies in Impregnated Bits and Turbines. SPE 99602.
- Cabrera Pazmiño, Andrés Iván; Cunduri Morocho, Jéssica Vanessa (2012). Caracterización del conglomerado de la formación tiyuyacu de la cuenca oriental del ecuador en los bloques 7 y 18 para la adecuada selección de brocas en la sección de 12 1/4" (Tesis de pregrado). Universidad Central del Ecuador.
- Catalinas, E. Q. (2002). Sistemas operativos y lenguajes de programación. Editorial Paraninfo.
- Ceruzzi, P. E. (2019). Breve historia de la computación. Fondo de Cultura Economica.
- Changdon Chang, Mark D. Zoback, Abbas Khaksar. (2006) Empirical relations between rock strength and physical properties in sedimentary rocks. Department of Geophysics, Stanford University
- Chen S.; Dahlem J. & Dennis J.(2001). Development and Application of a New Roller Cone Bit with Optimized Tooth Orientation. SPE 71053.

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

De la Torre González, Pablo Antonio (2009). Selección de brocas por correlación (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Autónoma de México.

Drilling Engineering Workbook, 80270h Rev. B, (1995). Baker Hughes Inteq. Training & Development. A Distributed Learning Course.

Escobar, F. H., Ramírez, A. C., & Enciso, O. L. (2010). Software para interpretar registros de producción de pozos y su aplicación en Campos Petroleros. Ingeniería y Región, 7, 93-101.

Fernández, A. (2017). Principios básicos de Linux y software libre. TIA Tecnología, investigación y academia, 5(2), 262

Feltrero Oreja, R. (2015). Software libre y la construcción ética de la sociedad del conocimiento.

Ford, arett; Thomas M. Warren; Behr, Suzanne (1990). Bit Whirl-A New Theory of PDC Bit Failure, SPE.

Gordon, Orlando (2015). Seminario de mechas de perforación nivel básico. PDVSA.

Hightowe, W. J (1964). Proper selection of drill bits and their use. SPE.

Jaeger J.C, Cook N. G(1969). Fundamentals of Rock Mechanics. 4th edición. Blackwell publishing

Jaramillo Vargas, L. M., & Laserna Villarraga, S. A. (2018). Desarrollo de un software para el procesamiento de datos obtenidos de pruebas de inyectividad en campos petroleros, Bachelor's thesis, Fundación Universidad de América.

Manohar La. (1999) Shale Stability: Drilling Fluids Interaction and Shale Strength, SPE, BP Amoco

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

Mongue, S. (2015). ¿Es aplicable el modelo de producción del software libre a contenidos educativos? RED. Revista de Educación a Distancia.

Nygaard R. & Hareland U. (2007). How to select PDC bit for optimal drilling performance. SPE 107530.

Perry P. & Evans J.; Curry D. (2004). New method of representing rock properties over entire bit run improves computer generated bit recommendations. SPE/IADC 87100.

Quintero, J., & Álvarez, P. (2011). Asimilación tecnológica en el proceso de migración de software en la industria petrolera. Télématique: Revista Electrónica de Estudios Telemáticos, 10(2), 11-21.

Ramos, Jorge Luis (2011). Estado del arte brocas de perforación. Grupo de investigación de perforación, Universidad de américa.

Schunnesson, H. (1998) "Rock characterization using percussive drilling" International journal of Rock Mechanics and mining sciences (vol. 35, No. 6, pp, 711-725)

Shell International (1998), Well engineers notebook 4th edition. Shell.

Silberschatz, A., Galvin, P. B., & Peterson, J. L. (1994). Sistemas operativos: conceptos fundamentales. Addison-Wesley Iberoamericana.

Vasconcelos Santillán, J. (2018). Introducción a la computación. Grupo Editorial Patria.

Velasco Carrillo, Jonathan Daniel (2015). Análisis y diseño de un plan de brocas estandarizado mediante el estudio litológico y de parámetros operacionales para la perforación de pozos direccionales en el campo sacha (Tesis de pregrado). Universidad Tecnológica Equinoccial.

W. J. Hightower (1964). Proper Selection of Drill Bits and Their Use. Hughes Tool Co. SPE 794

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

Well Engineers Notebook, 2nd Edition, (2001). Shell International Exploration And Production  
B.V. Ep Learning And Development.

Woerhrl B, Pei J, Renner J (2010). Comparison of Methods to Derive Rock Mechanical Properties  
from Formation Evaluation Logs. Trabajo de investigación.

## SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE BROCAS PDC

### **Apendices**

#### **Apendice A**

Manual de usuario, contiene una guía básica para aquellos que no requieren el detalles matemático y geométrico de la herramienta, documento presentado de manera anexa al presente trabajo debido a su contenido.

#### **Apendice B**

Manual Técnico, documento presentado de manera anexa al presente trabajo debido a su contenido, enuncia los lineamientos para que el usuario pueda hacer uso del aplicativo y contiene los diferentes diseños matemáticos y de programación que permiten el uso completo de la herramienta.

#### **Apendice C**

Ejecutable de la herramienta computacional, Comprimido con el ejecutable y demás archivos para que la herramienta funcione de manera correcta. Presentado de manera anexa al documento.