

Simulación del Desgaste de la Broca y su Influencia en la Rata de Perforación.

Cristian Hiroshi Morimitsu Rueda

Camilo Andrés Mateus Santos

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

Director

Maika Gambús Ordaz

Doctora Ingeniería de Yacimientos

Codirector:

Néstor Saavedra

Magister Ingeniería de Petróleos

Universidad Industrial de Santander

Facultad de ingenierías fisicoquímicas

Escuela de ingeniería de petróleos

Bucaramanga

2019

Dedicatoria

Un proyecto investigativo recoge diferentes experiencias que fueron posibles gracias a cada uno de los compañeros, docentes, amigos y familiares que estuvieron presentes a lo largo de la carrera. Esta dedicatoria va para cada una de esas personas excepcionales, amorosas y pujantes que aparecieron en nuestro camino; la amistad de esos grandes seres humanos es una exhortación a seguir adelante, luchar y seguir con los sueños acogidos.

Agradecimientos

Agradecemos especialmente al grupo de investigación de estabilidad de pozo (GIEP), por su apoyo constante en la investigación de este proyecto, a la empresa DrillScan® por conceder la licencia de su software Bitscan de vital ayuda para el abordaje y marco teórico de este trabajo y a la Universidad Industrial de Santander alma mater de conocimiento, investigación y saber.

Tabla de contenido

Introducción	15
1. Objetivos	17
2. Marco teórico	17
2.1. Brocas de perforación.....	18
2.2. Tipos de brocas.....	19
2.2.1. Broca tricónica.....	19
2.2.2. Mecanismos de desgaste de las brocas tricónicas	20
2.2.3. Metodología desgaste IADC brocas tricónicas	21
2.2.4. Brocas de diamantes policristalinos compactos (PDC).....	24
2.2.5. Mecanismos de desgaste de las brocas PDC	26
2.2.6. Metodología desgaste IADC brocas PDC	27
2.2.7. Brocas de diamante Naturales e Impregnados.....	28
2.2.8. Brocas híbridas	29
2.3. Aspectos operacionales que afectan la broca	33
2.3.1. Tasa de penetración (ROP).....	33
2.3.2. Torque.....	34
2.3.3. Peso sobre la broca (WOB)	34
2.3.4. Velocidad de rotación de la broca	35
2.3.5. Presencia de desechos.....	35
2.4. Aspectos litológicos que afectan la broca	36
2.4.1. Resistencia a la compresión sin confinamiento (UCS)	36
2.4.2. Resistencia a la compresión con confinamiento (CCS).....	36
2.4.3. Dureza de la roca	36
2.5. Modelos analíticos que miden el desgaste de la broca.....	38
2.5.1. Energía Mecánica Específica.....	38
2.5.2. Abrasión a tres cuerpos.....	43
2.6. Modelos que estiman la rata de penetración	47
2.6.1. Bourgoyne and Young (1973)	47
2.6.2. Hareland and hoberock.....	49
3. Metodología de estudio	51

3.1. Introducción y modo de uso de la herramienta computacional (SBW)	51
3.2. Interfaz de la herramienta computacional	53
3.3. Resultados esperados.....	54
3.4. Análisis: influencia del desgaste en la rata de penetración	55
4. Caso de estudio.....	55
5. Conclusiones	62
6. Recomendaciones.....	64
Bibliografía	66
Anexos.....	68

Lista de ilustraciones

Ilustración 1 partes principales broca tricónica.	19
Ilustración 2 sistema graduación de desgaste iadc.	22
Ilustración 3 grado de desgaste iadc de 0 a 8	22
Ilustración 4 códigos de características de desgaste iadc	23
Ilustración 5 códigos de finalización de carrera iadc	24
Ilustración 6 componentes de las brocas pdc	24
Ilustración 7 sistema graduación de desgaste iadc	27
Ilustración 8 tipos brocas de diamante	28
Ilustración 9 broca híbrida onix 360 con cortadores móviles	30
Ilustración 10 broca kimera, combinación entre tricónica y pdc	31
Ilustración 11 broca híbrida.	32
Ilustración 12 ejemplo calificación de salida broca pdc	33
Ilustración 13 abrasión a tres cuerpos	44
Ilustración 14 esquema herramienta computacional	52
Ilustración 15 modelos de energía mecánica específica (mse)	53
Ilustración 16 desgaste del software bitscan	56
Ilustración 17 datos extraídos mse de la herramienta computacional	57
Ilustración 18 gráficas extraídas mse de la herramienta computacional	57
Ilustración 19 datos entrada tesis rafid (2015)	58
Ilustración 20 energía específica vs profundidad y el desgaste de la broca rafid (2015)	59
Ilustración 21 datos entrada abrasión de la herramienta computacional	59
Ilustración 22 datos extraídos abrasión de la herramienta computacional	59
Ilustración 23 desgaste comparando los dos modelos y datos reales rafid (2015)	62
Ilustración 24 pantalla de inicio	68
Ilustración 25 menú principal	69
Ilustración 26 panel mse	69
Ilustración 27 resultados mse	70
Ilustración 28 análisis rop	71
Ilustración 29 panel abrasión a tres cuerpos	71
Ilustración 30 información variables	72

Lista de tablas

Tabla 1 clasificación brocas tricónicas.	20
Tabla 2 clasificación (iadc) brocas pdc	25
Tabla 3 tipo de broca pdc dependiendo de la dureza de la formación.	26
Tabla 4 clasificaciones brocas de diamante	29
Tabla 5 dureza de las rocas según la formación	45
Tabla 6 constantes dentro de la ecuación de bourgoyne & young.	49
Tabla 7 comparación software y tesis rafid (2015) para mse	60
Tabla 8 comparación mse y abrasión 3 cuerpos	61

Lista de Anexos

(Dentro del libro se anexa instructivo de la herramienta computacional, los demás anexos se encuentran adjuntos en el CD y pueden visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS)

Anexo A. Instructivo de la herramienta	68
Anexo B. Ejecutable Software of Bit Wear	
Anexo C. Manual de la herramienta computacional	

Glosario

IADC: International association of drilling contractors

N_{cone}: Speed rotation of the cone of the bit (rpm)

PDC: Polycrystalline diamond compact.

Bbl.: Barrels.

ROP: Rate of Penetration

PSI: Pounds per Square Inch.

MSE: Mechanics specific energy.

WOB: Weight on bit.

EF: Bit drilling efficiency

FD: Dimensionless tooth flatness.

TOB: Torque on bit

RPM: Revolutions per minute

N: Measured revolutions

B_{hd}: Bit hardness

F_{hd}: Formation hardness

Resumen

Título: Simulación del desgaste de la broca y su influencia en la rata de perforación.*

Autores: Camilo Mateus & Cristian Morimitsu**

Palabras clave: Desgaste, Predicción, Modelos Matemáticos, Broca, Parámetros, Tiempos no productivos (NPT), Matlab, Rata de penetración.

Descripción: El estudio sobre el desgaste de un material requiere la combinación de diversos conocimientos metalúrgicos, mecánicos e ingenieriles que logren una predicción asertiva. Desde el punto de vista de ingeniería de petróleos predecir el desgaste, o conocer el comportamiento de la **broca** de perforación significa ahorros de viaje de tubería y **tiempos no productivos (NPT)** que significan menos costos operacionales.

En esta tesis investigativa se presenta un estudio de los tipos de broca, la interacción con el subsuelo y algunos modelos matemáticos que permiten estimar el daño que sufrió la herramienta basado en parámetros como el peso, torque, revoluciones y dimensiones de la broca; dichas variables se usan al momento de la perforación de un pozo petrolero. Posteriormente se combina todo en un lenguaje de programación que ofrece la herramienta **Matlab** (licencia otorgada por la Universidad Industrial de Santander) y permite interactuar al lector con un entorno computacional o interfaz gráfica sencilla y amigable que simule el desgaste que sufrió la herramienta y analizar los resultados obtenidos con los datos reales de la corrida de broca.

Al final del software se agrega el análisis de como el desgaste influye sobre la **rata de penetración**, parámetro que ayuda a identificar los tiempos de perforación, la eficiencia de nuestra broca frente a un tipo de roca y como se mencionó con anterioridad a través de este análisis minimizar los costos de la actividad.

* Trabajo de Grado

** Facultad Físico-Químicas. Escuela de petróleos. Director Maika Gambús. Codirector Néstor Saavedra

Abstract

Title: Simulation of bit wear and its influence on penetration rate. *

Author: Camilo Mateus & Cristian Morimitsu. **

Keywords: Drill Bit, Non-productive times (NPT), Matlab, and Penetration rate

Description: the study about the wear of a material requires the combination of diverse metallurgical, mechanical and engineering knowledge that achieves an assertive prediction. The petroleum engineering point of view, **drill bit** wear means pipeline travel savings and **non-productive time (NPT)** which means less operational costs.

In this research thesis will study: the types of bit, the interaction with the subsoil and mathematical models that allow estimating how much damage the tool suffered based on parameters such as weight, torque, revolutions and dimensions of the bit will be developed; these variables are used in an oil well construction. Subsequently, everything will be combined in a high-level programming language offered by the **Matlab** tool (license granted by the Industrial University of Santander) and will allow the reader to interact with a simple and friendly computer environment or graphical interface that simulates the wear suffered by the tool and analyze the results obtained with the actual data of the drill run.

At the end of the software, the analysis of how the wear influences the **penetration rate** will be added, a parameter that helps optimize drilling times and as mentioned above minimizes activity costs.

* Bachelor Thesis

** Facultad Físico-Químicas. Escuela de petróleos. Director Maika Gambús. Codirector Néstor Saavedra

Introducción

En el momento de caracterizar un yacimiento en específico, gran parte de la investigación que se realiza del subsuelo depende de la actividad de perforación, siendo esta la base tangible del mapa geológico y de los fluidos que el mismo posee. Es cierto que la ingeniería de petróleos no solo abarca el estudio y desarrollo de lo que sucede bajo tierra en relación a hidrocarburos ya sean convencionales o no convencionales, pero en esta era global dependiente de la energía que se genere de los derivados del hidrocarburo, se hace necesario pensar en los nuevos retos que enfrenta la industria y optimizar los procesos que se vienen realizando desde el siglo pasado la cual ha ido mejorando partiendo de perforación de pozos de más de 30 millones de dólares en tierra y aproximadamente 40 millones costa afuera a los perforados hoy en día que se redondean a un costo de 11 millones costa adentro y hasta 17 millones en plataformas marítimas, a pesar de lo anterior, pocas metodologías se han enfocado en la interacción broca-roca dando prioridad a la interacción roca-fluido. Así, nace como propuesta la investigación de la interacción broca-roca y como este parámetro influye en la rata de perforación.

El problema se centra en la carencia de software que permitan cuantificar el desgaste de la broca por efecto de formaciones abrasivas o el embotamiento en formaciones con alto contenido de arcilla siendo las formaciones abrasivas el enfoque de este trabajo. Entre los registros geofísicos se encuentra los *MWD* (*measure while drilling*, por sus siglas en ingles) que han permitido corregir problemas en tiempo real referentes a la interacción broca-roca que causan diversos problemas tales como: remoción ineficiente de roca, pérdida de tiempo al bajar la tubería de perforación,

aumento de costos en la perforación, mal funcionamiento del equipo de subsuelo, problemas de la estabilidad del pozo y demás problemas que se resuelven en base a los registros que se corren mientras se perfora, esto ha impulsado la investigación sobre ecuaciones, correlaciones o software que estimen el mejor escenario operativo para un viaje de la sarta de perforación (se hace énfasis en esta variable ya que es esta la que implica mayor ahorro en costos de perforación) en función del desgaste de la broca.

Para desarrollar el proyecto se optó por estudiar la literatura a nivel mundial que analiza el desgaste de la broca, se seleccionaron tres modelos de entre toda la literatura porque discriminaba muchos datos de laboratorio que son en la mayoría de los casos confidenciales, a diferencia de los modelos seleccionados que maneja datos de perforación en tiempo real y que se pueden obtener en registro de perforación, el primer modelo son las ecuaciones de energía mecánica específica (*MSE*) del sistema resultante de la ley universal de la conservación de la energía, segundo encontramos los cálculos adimensionales que usan variables estáticas (tiempo igual a cero) para predecir el comportamiento del desgaste de la broca y por último la abrasión a tres cuerpos que intenta por medio de la geometría y la interacción entre el ripio de perforación, la broca y la formación calcular el volumen de roca removido que comparándolo con el volumen teórico que se tiene se puede llegar a cuantificar el desgaste que sufrió la broca en la perforación. Los parámetros que influyen en el desgaste de la broca según los modelos previamente mencionados son: peso sobre la broca, torque, revoluciones por minuto, diámetro y área de la broca, factor de deslizamiento de la broca y rata de penetración. El objetivo es comprobar que las ecuaciones de los modelos anteriormente descritos funcionan para predecir el desgaste de la broca y relacionarlos con ecuaciones que midan su influencia en uno de los parámetros importantes que afecta el desgaste de la broca: la rata de perforación.

1. Objetivos

Objetivo general.

- Desarrollar una herramienta computacional que permita simular el desgaste de la broca y su incidencia en la rata de perforación

Objetivos específicos.

- Realizar la revisión bibliográfica de los diferentes modelos matemáticos que describan el desgaste de la broca mientras se perfora.
- Seleccionar el modelo más adecuado para calcular el desgaste de la broca y su efecto en la rata de perforación con base en los parámetros que más influyen en la interacción broca-roca.
- Construir la herramienta computacional con lenguaje de alto nivel teniendo en cuenta los modelos seleccionados.
- Validar la herramienta computacional con datos reales.

2. Marco teórico

Durante el proceso de perforación, la broca cumple un papel protagonista llevado a cabo por un factor o principio esencial, el cual es vencer los esfuerzos de corte y de compresión que posee la roca. Para realizar este proceso los dientes o cortadores de la broca utilizan diferentes mecanismos, por ejemplo, los dientes de la broca tricónica se incrustan en la formación y posteriormente la

cortan cuando se desplaza dentro de la misma. En cambio, proceso del tipo PDC se centra en el cizallamiento generado por los cortadores de la broca que superan la resistencia de la formación. Sin embargo, estos mecanismos se ven afectados por los parámetros operacionales y litológicos de la formación lo que hacen que los mecanismos de corte se desgasten haciendo que baje la eficiencia de la broca frente a la formación que estamos perforando, este desgaste ocurre por varios factores tales como: parámetros litológicos y de perforación. Este trabajo aborda en profundidad las brocas de tipo tricónicas y PDC (Diamantes Policristalinos Compactos) debido a que en Colombia domina este tipo de brocas en el proceso de perforación de pozos petroleros. El marco teórico abarca los capítulos que contextualizan al lector sobre las herramientas y parámetros que influyen en el desgaste de la broca de perforación; ayudando a la comprensión de los fenómenos físicos y mecánicos que dañan la herramienta y el posterior análisis que brinda la herramienta computacional que compila toda la información expresada en esta tesis.

2.1. Brocas de perforación

Es la herramienta de corte localizada en el extremo inferior de la sarta de perforación y se utiliza para triturar y/o cortar las formaciones del subsuelo durante el proceso de perforación (González, Jara , Ramirez , & Malavé , 2017). En la actualidad el método hidráulico rotatorio de perforación de un pozo petrolero es el dominante e implica necesariamente el empleo de una broca, que es la herramienta de corte localizada en el extremo inferior de la sarta perforación y funciona triturando o cortando las formaciones del subsuelo durante el proceso de perforación; el análisis y la selección de esta herramienta es clave para lograr el éxito en el proceso de perforación. Existe gran variedad de brocas en la industria, fabricadas por varias compañías para diferentes tipos de pozos debido a que cada broca tiene que cumplir con las condiciones de la formación que se pretende perforar y el equipo disponible.

2.2. Tipos de brocas

2.2.1. Broca tricónica

Es conocida como la broca de tres conos y es considerada como la más usada en las operaciones de perforación de perforación rotatoria debido a que utiliza gran variedad de diseños de dientes y cojines que se ajustan los diferentes tipos de formación. La ilustración 1 detalla las partes principales de una broca tricónica:

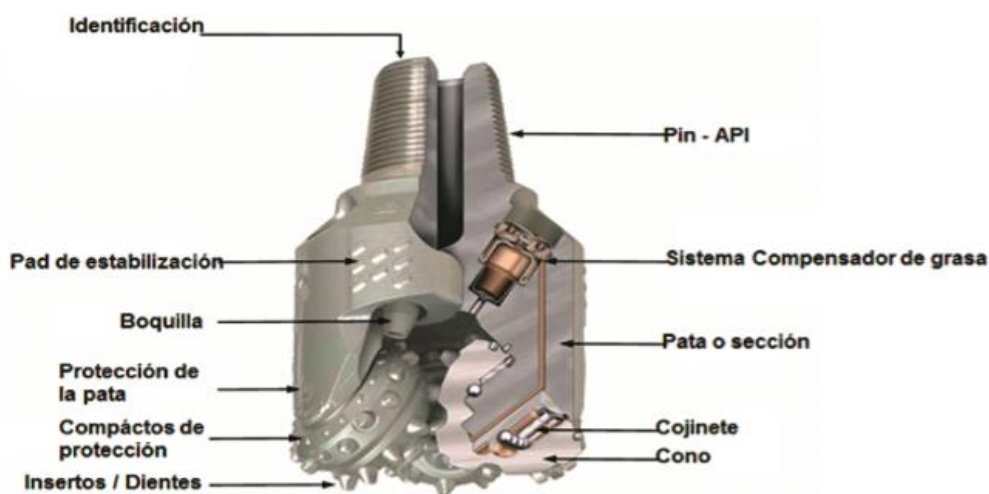


Ilustración 1 Partes principales broca tricónica.

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

El mecanismo de corte de las brocas tricónicas difiere del tipo de diente o tipo de cortador que posee, para los dientes de acero el mecanismo es por paleo de la formación típicamente utilizados en formaciones blandas a medias en dureza. En cuanto a los insertos de carburo de tungsteno tiene aplicaciones de baja ROP en formaciones duras a muy duras y el mecanismo de corte es por impacto y fractura de la formación.

La Asociación Internacional de Contratistas de Perforación (IADC) ha desarrollado un sistema estandarizado para clasificar las brocas tricónicas de rodillos. Se clasifican de acuerdo con el tipo

dientes de acero o de insertos, la clase de formación para la cual fueron diseñadas en términos de serie y tipo, las características mecánicas, y en función del fabricante. En el primer dígito se detalla la identificación del tipo de estructura de corte y también el diseño de la estructura de corte con respecto al tipo de formación. El segundo dígito se identifica el grado de dureza de la formación en la cual se usará la barrena. En el tercer y último dígito define el sistema de rodamiento y lubricación de la barrena en ocho (8) clasificaciones. Sin embargo, los tres dígitos de la clasificación IADC se pueden unificar como se detalla en la tabla 1.

Tabla 1 Clasificación brocas tricónicas.

	1 dígito		2 dígito		3 dígito								
	sistema de corte		Dureza		sistema de Rodameinto								
					1	2	3	4	5	6	7	8	9
Dientes de Acero	1	Dientes de acero para formacion blanda	1	suave	toberas para lodo y baleras estandar	toberas para aire / lodo y baleras estandar	protección al calibre y balero estándar	balero sellado y autocalibre	balero sellado y proteccion al calibre	chumacera sellada	chumacera sellada y proteccion al calibre	para perforacion direccional	otro
			2	medio suave									
			3	medio dura									
			4	Dura									
	2	Dientes de acero para formacion media	1	suave									
			2	medio suave									
			3	medio dura									
			4	Dura									
	3	Dientes de acero para formacion dura	1	suave									
			2	medio suave									
			3	medio dura									
			4	Dura									
Dientes de inserto	4	Dientes de inserto para formacion muy blanda	1	suave									
			2	medio suave									
			3	medio dura									
			4	Dura									
	5	Dientes de inserto para formacion blanda	1	suave									
			2	medio suave									
			3	medio dura									
			4	Dura									
	6	Dientes de inserto para formacion media	1	suave									
			2	medio suave									
			3	medio dura									
			4	Dura									
	7	Dientes de inserto para formacion dura	1	suave									
			2	medio suave									
			3	medio dura									
			4	Dura									
	8	Dientes de inserto para formacion extra dura	1	suave									
			2	medio suave									
			3	medio dura									
			4	Dura									

Nota: Clasificación de las brocas también conocidas como de insertos móviles según la norma IADC. Orlando Gordon R: seminario de brocas de perforación. Nivel básico (2011). PDVSA.

2.2.2. Mecanismos de desgaste de las brocas tricónicas

El desgaste que sufren los cortadores de la broca se puede definir en forma general como cualquier degradación que reduzca considerablemente la vida útil de la broca o como la reducción o fractura

macroscópica y microscópica de la materia. Mouritz y Hutchings (1991) hicieron estudios sobre las tasas de desgaste de los dientes de broca rotativos y los mecanismos de desgaste abrasivo, en el estudio se analizaron las tres capas que componen un diente de broca, la primera capa está compuesta por un revestimiento duro de tungsteno, la segunda capa está hecha de acero martensítico alto en carbono y por último la tercera capa es el núcleo del diente que consiste en acero martensítico bajo en carbono. Los investigadores utilizaron areniscas y piedras calizas las cuales penetraron con cilindros fabricados con materiales utilizados en los dientes de broca rotativa, los resultados arrojaron que la abrasión de la piedra caliza causa un pequeño desgaste por el mecanismo de arado en los materiales de acero con bajo alto contenido de carbono, mientras que en las rocas areniscas con alto contenido de cuarzo el daño por abrasión es más considerable. Larsen-Basse (1973) analizo el desgaste de la broca y saco la conclusión de que los principales modos de falla para las brocas tricónicas son **fractura por impacto, fatiga térmica, desgaste abrasivo y fatiga mecánica debido a sobrecargas**, por otro lado los Reshetnyak y Kuybarsepp (1994) estudiaron la erosión abrasiva de metales duros como las aleaciones carbono y cobalto que forman los dientes de las brocas tricónicas y evaluaron e indicaron que en contacto entre la dureza de los materiales no es la propiedad dominante en la erosión abrasiva si no que hay que tener en cuenta propiedades como la resistencia a la compresión y resistencia a la fractura.

2.2.3. Metodología desgaste IADC brocas tricónicas

Este sistema es una herramienta para obtener información precisa del desgaste que sufrió la estructura de los cortadores cuando la broca sale del pozo, el método consiste en realizar una inspección minuciosa de las estructuras de corte desgastada y se registra en las ocho columnas del bit record como se detalla abajo en la ilustración.

T				B		G		Observaciones			
Estructura Cortadora						B		G		Observaciones	
Hileras Interiores	Hileras Exteriores	Caracter Desgast	Ubicación	Cojinete Sello	Calibre 1/16	Otros Desgast	Razón Salida				
(1)	(O)	(D)	(L)	(B)	(G)	(O)	(R)				

Ilustración 2 Sistema Graduación de Desgaste IADC.

Sistema de Graduación de Desgaste de IADC para Trépanos Tricónicos. BAKER HUGHES (2015, pág.3).

La primera columna se utiliza para reportar la condición de los elementos de los cortadores que no están en contacto con la pared del pozo (I-interior), La segunda columna se utiliza para reportar la condición de los cortadores que tocan las paredes del pozo , para cuantificar esta condición de desgaste se utiliza una escala lineal de 0 a 8 para describir la condición de la estructura , en donde 0 significa que el diente no perdió altura y 8 es lo contrario , el diente perdió toda su altura.

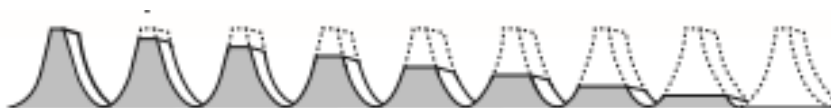


Ilustración 3 Grado de desgaste IADC de 0 a 8

Sistema de Graduación de Desgaste de IADC para Trépanos Tricónicos. BAKER HUGHES (2015, pág.3).

La tercera columna utiliza un código de dos letras para indicar la característica principal del desgaste, en la siguiente ilustración 4 se detallan los códigos de dos letras utilizados en esta columna.

*BC — Cono Roto	LN — Boquilla perdida
BF — Falla en el enlace	LT — Dientes perdidos
BT — Diente/cortador roto	OC — Desgaste excéntrico
BU — Trépano embolado	PB — Trépano comprimido
*CC — Cono fisurado	PN — Boquillas o canales tapados
*CD — Cono arrastrado	RG — Calibre redondeado
CI — Interferencia de conos	RO — Anillado
CR — Coroneado	SD — Daño en el extremo de la pata
CT — Dientes astillados	SS — Autoafilado
ER — Erosión	TR — Sobre huella
FC — Crestas achatadas	WO — Lavado
HC — Fisuras x calentamiento	WT — Diente/cortador desgastado
JD — Daño por chatarra	NO — Sin desgaste
*LC — Cono perdido	

Ilustración 4 códigos de características de desgaste IADC

Sistema de Graduación de Desgaste de IADC para Trépanos Triconicos. BAKER HUGHES. (2015, pág.4).

La cuarta columna define la ubicación en donde ocurre la característica principal del desgaste y se define de la siguiente manera:

N- Hilera de la nariz, la estructura cortadora más central del trépano.

M- Hilera intermedia, estructura entre la nariz y el calibre.

G- Hilera de calibre, estructuras cortadoras que tocan la pared del pozo.

A- Todas las hileras.

La quinta columna se utiliza para medir la condición del cojinete de los trépanos a rodillo, para cojinetes no sellados se utiliza la escala de 0 a 8 en donde un cero indica cojinete sin desgaste y un ocho un cojinete sin vida útil. Para cojinetes con sello se utiliza una letra, la “E” indica sello efectivo, “F” indica sello fallado y “N” significa que no se pudo graduar. La sexta columna indica el calibre de la estructura tricónica donde la letra “I” indica que no hubo reducción de calibre, si el trepano tiene una reducción se registra en 1/16 “de pulgada. La séptima columna se utiliza para registrar otra característica del desgaste que sufrió la broca, en adición a la tercera columna. Por último, tenemos la octava columna que se utiliza para reportar la causa por la cual la broca fue sacada del pozo. En la ilustración 5 aparece un listado con los códigos y su significado.

BHA	—	Cambio de ensamble de fondo
CM	—	Tratamiento fluido
CP	—	Coroneado
DMF	—	Falla de Motor de Fondo
DP	—	Barra tapada
DSF	—	Falla de barras
DST	—	Ensayo de formación
DTF	—	Falla de herramientas de fondo
FM	—	Cambio de formación
HP	—	Problema de diámetro
HR	—	Horas
LIH	—	Dejado en el pozo
LOG	—	Perfilaje
PP	—	Presión de la bomba
PR	—	Penetración Menor
RIG	—	Reparación del Equipo
TD	—	Profundidad final/Profundidad de entubamiento
TQ	—	Torque
TW	—	Barra torcida
WC	—	Condiciones climáticas

Ilustración 5 códigos de finalización de carrera IADC

Sistema de Graduación de Desgaste de IADC para Trépanos Triconicos. BAKER HUGHES. (2015, pág.5).

2.2.4. Brocas de diamantes policristalinos compactos (PDC)

Es un tipo de broca caracterizada por un cuerpo sólido y cortadores fijos de diamantes policristalinos sintéticos, adheridos a un sustrato de carburo de tungsteno fabricados mediante un proceso de alta presión y temperatura. Fueron desarrolladas a mediados de los años 70 y diseñadas especialmente para obtener altas tasas de penetración en formaciones blandas, firmes y medianamente duras, no abrasivas. En la ilustración 6 se observan las diferentes partes que componen una broca.

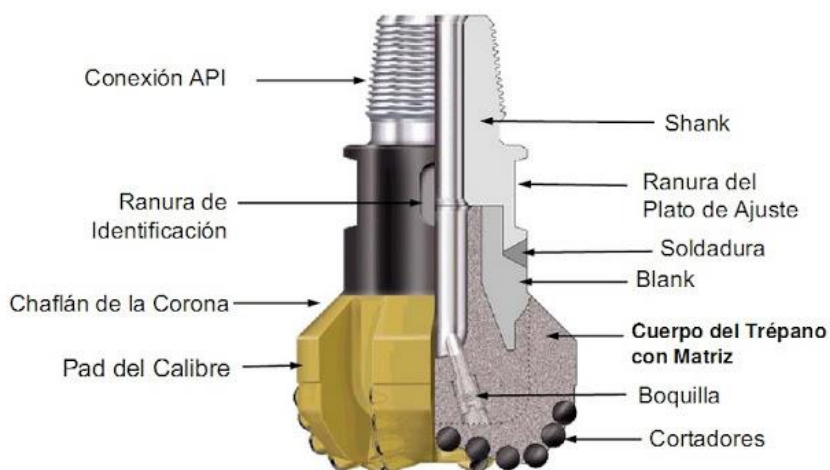


Ilustración 6 Componentes de las brocas PDC

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

El mecanismo de corte característico de estas brocas es el cizallamiento, este mecanismo tiene la ventaja de perforar la formación sin producir impacto en la misma y de esta forma se obtienen altas tasas de penetración.

La IADC desarrolló un sistema de codificación para la identificación de barrenas de cortadores fijos que incluye a todos los tipos: diamante natural, compactos de -diamante policristalino (PDC) o de diamante térmicamente estable (TSP). En la Tabla 2 se especifica este código, que consiste en cuatro caracteres una letra y tres números que describen siete características básicas; en la Tabla 3 se aprecia la clasificación en función de la identificación con el código IADC, existen por lo menos cinco aspectos fundamentales en el diseño de brocas de diamante: la forma de los cortadores, ángulos de inclinación lateral y de retardo, dureza de la formación, tipo de protección al calibre y longitud de la sección del calibre.

Tabla 2 Clasificación (IADC) brocas PDC

Tipo de cortadores.
Material del cuerpo de la barrena.
Perfil de la barrena.
Diseño hidráulico para el fluido de perforación.
Distribución del flujo.
Tamaño de los cortadores.
Densidad de los cortadores.

Nota: atributos del tipo de broca PDC que aparecen dentro de la clasificación IADC.

Tabla 3 Tipo de broca PDC dependiendo de la dureza de la formación.

Primer Caracter	
Material del cuerpo	
Matriz (Diamante natural)	D
Matriz (PDC)	M
Acero (PDC)	S
Matriz (TSP)	T

Segundo Caracter	
Densidad de cortador	
PDC	1.
	2
	3
	4
Diamante	6
	7
	8
Entre menor sea la cantidad mas ligera será la broca	

Tercer Caracter		
Tamaño del cortador		
PDC	1	>24 mm
	2	14-24 mm
	3	8-14 mm
	4	<8
Diamante	1	Diamante Natural
	2	TSP
	3	Diamante natural + TSP
	4	Impregnada

Cuarto Caracter	
Perfil	
1	Perfil plano
2	Perfil corto parabólico
3	Perfil medio parabólico
4	Perfil largo parabólico

Nota: Nuevo sistema de Clasificación de barrenas de cortador fijo IADC. Adaptado del artículo “Development of a New IADC fixed cutter drill bit classification system” SPE 23940 (1992).New Orleans, EU.

2.2.5. Mecanismos de desgaste de las brocas PDC

Se conoce que las brocas de diamante policristalino son más efectivas que las brocas tricónicas, especialmente en formaciones de roca blanda, Debido a esta eficiencia en perforación se debe estudiar a detalle el desgaste de los cortadores de la broca PDC ya que se deduce debido a que más del 50 % de la energía de perforación se disipa si los cortadores sufren daño, por lo tanto, es importante estudiar el mecanismo de desgaste en las brocas PDC. Existen varios estudios que definen los mecanismos de desgaste. Dunn y Lee (1979) creyeron que la razón principal de falla de la broca PDC era la tracción que surge después del proceso de fabricación o sintetización que induce grietas en el material cortante, también definieron otros problemas de falla en los cortadores como son:

- Desgaste en la capa de diamante.
- Broca embolada.
- Rotura de pernos en rocas duras.
- Desgaste abrasivo.

- Falla hidráulica.
- Eficiencia de limpieza insuficiente.
- Deflexión de la broca.
- Rayado de la capa de los cortadores debido a la mala unión de los pernos y falla térmica.

En 1984 Ortega y Glowka ilustraron otros mecanismos de falla de la broca entre los que encontramos:

- disminución de la interfaz del diamante y las capas del sustrato.
- deformación plástica de los cortadores.
- astillamiento en el borde del corte.
- desprendimiento de los granos de diamante.
- desgaste abrasivo y fatiga térmica.

Existen muchas más investigaciones que analizan tanto los métodos de fabricación de síntesis de brocas PDC como los mecanismos de falla de estas brocas, sin embargo, Fang (2001) ilustra que las principales fallas de los cortadores de PDC se deben al calor por fricción y la alta abrasividad de la roca y se debe hacer énfasis en estos mecanismos para fabricar brocas PDC de calidad.

2.2.6. Metodología desgaste IADC brocas PDC

La tabla de graduación IADC de desgaste para las brocas PDC es la misma adoptada para brocas tricónicas es decir el sistema incluye tanto como cortadores fijos como brocas de trépanos triconos.

Hilera Interior	Hilera Exterior	Caract. del Desgaste	Ubicación	Sellos del Cojinete	Calibre 1/16"	Otras Carac	Razón Salida
2	6			X			

Ilustración 7 Sistema Graduación de Desgaste IADC

Sistema de Graduación de Desgaste de IADC para Trépanos Triconicos. BAKER HUGHES. (2015, pág.7).

2.2.7. Brocas de diamante Naturales e Impregnados

Las brocas de diamantes impregnados se diseñaron con la función de obtener un mejor desempeño en las formaciones que no son frágiles, de alta dureza y abrasividad. Sus cortadores están contruidos por una gran cantidad de diamantes colocados en una matriz de tungsteno. Para obtener condiciones apropiadas de operación, solo los diamantes entran en contacto con la formación, lo que deja una pequeña brecha entre la matriz y el fondo. Las características de diseño más importantes en este tipo de broca se enfocan en el perfil de la corona, el tamaño y numero de los insertos de diamante y el mecanismo de corte de la formación a perforar.



Ilustración 8 Tipos brocas de Diamante

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

El mecanismo de corte de estas brocas es por fricción o abrasión mecánica, de esta forma puede penetrar las formaciones de muy alta dureza y abrasividad, se descarta utilizar en formaciones plásticas este tipo de broca.

Por lo general son brocas PDC con diamantes sintéticos o naturales, pero también, aunque es poco común se pueden encontrar brocas tricónicas con dientes de diamante. A diferencia de las brocas tricónicas el código IADC para barrenas de diamante no los relaciona con la formación a

perforar. Únicamente se puede identificar sus características más elementales, como se detalla en la Tabla 4.

Tabla 4 Clasificaciones brocas de diamante

1er CARACTER			2do CARACTER				3er CARACTER				4to CARÁCTER			
TIPO DE CORTADOR	MATERIAL DEL CUERPO	ALTURA DEL FLANCO	PERFIL DEL CUERPO			DISTRIBUCION DE CORTADORES	DISEÑO HIDRAULICO			TAMAÑO	DENSIDAD			
			ALTURA DEL CONO				TIPO DE ORIFICIO				DENSIDAD			
			ALTA	MEDIA	BAJA		TUBERÍAS	ORIFICIO FIJO	SALIDA ABIERTA		ALTA	MEDIA	BAJA	
	DIAMANTE NATURAL	MATRIZ	ALTO	1	2	3	EN ALETAS	1	2	3	GRANDE	1	2	3
M	PDC	MATRIZ	MEDIA	4	5	6	EN COSTILLAS	4	5	6	MEDIANO	4	5	6
	PDC	ACERO	BAJO	7	8	9	NO AGRUPADOS	7	8	9	PEQUEÑO	7	8	9
	TSP	MATRIZ	O = DE DOBLE CENTRO O ASIMETRICO				R = FLUJO RADIAL X = FLUJO CRUZADO O = OTRO				O = IMPREGNADO			

Nota: Clasificación de las brocas impregnadas de diamante en base a cuatro características principales. Adaptado de Orlando Gordon R: seminario de brocas de perforación. Nivel básico (2011). PDVSA.

2.2.8. Brocas híbridas

Las brocas híbridas combinan la tecnología de las brocas PDC y de las tricónicas, combinando la fuerza de los conos móviles con la superioridad del raspado y el corte que ofrecen las PDC. Este ofrece mejor desempeño al perforar, un mejor control direccional, gran durabilidad y la confianza de mantener una ROP constante en intervalos que intercalen formaciones duras y suaves (DATALOG, 2002). En las zonas de mayor contacto con la roca se disponen los cortadores

móviles, permitiendo que la fricción se propague homogéneamente por el cortador, evitando el desgaste drástico de la herramienta. Muchas brocas poseen lo que se llaman cortadores de respaldo, que van detrás de los fijos y son construidas de materiales más fuertes para atacar las formaciones duras y dejan que los cortadores “suaves” se encarguen de la formación blanda; en otras palabras, cualquier combinación entre los dos tipos de brocas clásicas que permita perforar con las características de ambas brocas es considerada una broca híbrida. En las siguientes imágenes se muestran dos de las brocas que más se usan en el mercado, una de ellas la Onix 360 que posee cortadores móviles y por otro lado Kimera donde combinan los cojines de las brocas tricónicas con los cortadores fijos PDC.

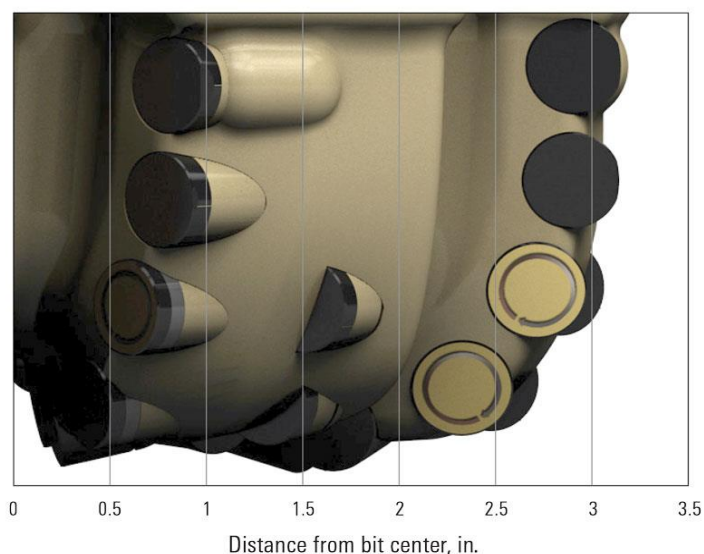


Ilustración 9 Broca híbrida Onix 360 con cortadores móviles
Empresa Drilling Contractor EU (2015) retrieved from: <https://www.drillingcontractor.org>



Ilustración 10 Broca Kimera, combinación entre tricónica y PDC
Nuevas tecnologías adaptadas a nuevos retos por la empresa Baker Hughes (2014) extraído de:
<https://www.bhge.com/upstream/drilling/drill-bits/hybrid-drill-bits>

Estas brocas disponen de tecnología avanzada en forma de sensores que transmiten en tiempo real la respuesta del subsuelo, así el perforador puede programar intervalos donde los parámetros sobre la broca son críticos y evitar problemas durante la perforación. En el mercado existen diversas brocas híbridas y cada día se crean ante la necesidad de nuevos descubrimientos petroleros, en aguas profundas, sobre glaciares, para extracción de hidratos, en zonas áridas y lugares inaccesibles. Ante estos nuevos retos es menester para el ingeniero de perforación diseñar y analizar las diferentes complejidades que se encontrarán en el diseño del pozo, agregando herramientas que combinen lo mejor de las brocas del pasado.

Las brocas híbridas son un desarrollo tecnológico reciente, ya que su sistema de perforación híbrido está diseñado para afrontar retos relacionados con formaciones intercaladas en las cuales las fluctuaciones de torque pueden causar fallas en las aplicaciones de los motores direccionales, para ello esta broca combina la perforación agresiva y rápida de la broca de las brocas PDC junto con la regulación y bajo torque de la broca tricónica. La estructura de corte se divide en dos, la parte PDC es responsable de perforar la roca del fondo de pozo mientras que los conos tricónicas

se encargan de la parte lateral, el principal beneficio de esta estructura es un mejor control en la perforación direccional, disminuyendo el torque en un promedio de cuatro veces, así como las vibraciones. También se obtiene una perforación más rápida y efectiva en formaciones difíciles con transición litológica y un incremento de ROP en formaciones duras.



Ilustración 11 broca híbrida.
DRILLING CONTRACTOR "Drilling & Completion Tech Digest". (2011).

Tal como indica BAKER HUGHES las brocas híbridas se tienen que clasificar tres veces, una clasificación para el sistema PDC otra para el sistema tricónica y otro sistema general. A continuación, en la siguiente ilustración se detalla un ejemplo referente a la calificación de una broca híbrida.

Calificación de salida híbrida (PDC)							
Interior	Exterior	Desgaste	Localización	Cojinetes-sellos	Calibre	Otra característica	Motivo de retiro
2	2	BT	N	X	1	NO	RIG
Calificación de salida híbrida (TRICÓNICA)							
Interior	Exterior	Desgaste	Localización	Cojinetes-sellos	Calibre	Otra característica	Motivo de retiro
1	1	WT	N	E	1	NO	RIG
Calificación de salida general							
Interior	Exterior	Desgaste	Localización	Cojinetes-sellos	Calibre	Otra característica	Motivo de retiro
2	2	BT	N	E	1	NO	RIG

Ilustración 12 ejemplo calificación de salida broca PDC

BAKER HUGHES. Reporte final corrida de broca, Calificación broca Híbrida. (2014)

2.3. Aspectos operacionales que afectan la broca

2.3.1. Tasa de penetración (ROP)

Es un indicador consistente y efectivo de la velocidad que se tiene en la perforación, es decir cuanta distancia efectiva se va atravesando a medida que pasa el tiempo, este indicador es normal y coherente cuando ciertas condiciones de perforación se mantienen constantes. Estas condiciones se dividen en dos los parámetros de perforación como lo son peso sobre la broca, velocidad de rotación, presión y caudal de bomba y las propiedades reológicas del lodo de perforación en especial la densidad y la viscosidad. Un incremento en el ritmo de penetración cuando la presión de formación es menor que la ejercida por la hidráulica del lodo, se puede interpretar como la existencia de una formación o zona con presión anormal. La tasa de penetración es un parámetro muy importante debido a que indica si se debe seguir perforando con la misma broca, debido a que si la broca no cumple con el valor apropiado de perforación significa que no es la adecuada. (DATALOG, 2002)

2.3.2. Torque

Se puede definir como el momento de torsión aplicado a la tubería de perforación aumentando gradualmente con la profundidad debido al aumento efectivo entre en agujero, al igual que las formaciones compactadas tienden a disminuir el diámetro del hueco del pozo y aumentar la fricción. Una condición de perforación que afecta en gran manera el torque es la presencia de recortes en el espacio anular por lo que impide el movimiento de rotación de la tubería de perforación.

En las brocas PDC Cuando se presenta un alto torque en las mediciones de perforación implica que la broca se encuentra excavando o en el caso de que el torque es elevado y la tasa de penetraciones es baja significa que el BHA es quien podría estar causando esta elevación en el torque. En el caso contrario si se presenta un nivel bajo de torque se puede inferir que se está perforando una formación muy dura y el sistema de corte podría estar embolado. En el caso de las brocas tricónicas el nivel del torque puede indicar varios aspectos operacionales, si el torque tiene un nivel medio la broca está excavando con normalidad, si el torque es alto se podría inferir que los conos están obstruidos y por lo tanto el nivel torque irá disminuyendo a medida que los dientes de la broca se van desgastando, por último, si el nivel de torque es bajo indica que los cortadores están sin filo o embolados. (DATALOG, 2002)

2.3.3. Peso sobre la broca (WOB)

La carga soportada por el gancho del top drive cuando se para el bombeo de lodo en el pozo se puede interpretar como el peso sobre la broca y se mide en superficie. Si La presión ejercida por el lodo es menor que la presión de formación, se presenta un incremento alto y brusco en la carga soportada, esta situación también se puede presentar cuando el agujero es desviado con un alto ángulo. Si el incremento en la presión de formación es leve con respecto al incremento en

profundidad o la zona de transición es grande, la carga se incrementa levemente y no es notable de conexión en conexión. (DATALOG, 2002)

2.3.4. Velocidad de rotación de la broca

En el proceso de perforación la velocidad de rotación en la broca se mide en revoluciones por minuto (RPM), este parámetro depende en gran medida de la abrasión y dureza de la formación a perforar, debido a que cuando la compresión de la formación aumenta las revoluciones por minuto tienen que reducirse ya que si se presenta vibración en la sarta se induce desgaste en la broca. (DATALOG, 2002)

2.3.5. Presencia de desechos

En el proceso de perforación se manejan una gran cantidad de equipos y herramientas que por influencia operacional generan desechos que se alojan en el fondo de pozo, afectando la zona intervenida por la broca (Dykstra, Chen, & Warren, 1994). Esta es una de las principales razones por las que se debe tener el apropiado fluido o lodo de perforación que permita subir todos los ripios y desechos hasta superficie; este fluido también lubrica y enfría la broca evitando el sobre esfuerzo en puntos críticos de la herramienta y proporciona la fuerza hidráulica necesaria para reducir el esfuerzo compresivo de la roca y su tasa de penetración sea más efectiva. Cabe resaltar que la mayoría de nuevas tecnologías de toma de medidas en tiempo real, usan pulsos mediante el fluido de perforación. Para conocer las propiedades del lodo con el que se debe perforar primero se debe conocer la presión de poro y fractura de la formación evitando daño al pozo, es importante hacer analogías o correr sísmica que arroje un vistazo previo del subsuelo y los posibles fluidos que se van a encontrar, esto para prevenir cualquier contingencia como una pata de pozo. Este parámetro no se incluirá en los posteriores estudios debido a que los modelos seleccionados que se estudiarán adelante no hacen uso del fluido de perforación y aunque algunos autores lo

incluyeron mediante la fuerza hidráulica se convertía en un estudio de parámetros de tiempo real que no es el alcance de este proyecto; por esta razón se asumirá que el pozo se trabajó bajo las selecciones adecuadas y el estudio previo que conlleva circular el fluido de perforación.

2.4. Aspectos litológicos que afectan la broca

2.4.1. Resistencia a la compresión sin confinamiento (UCS)

Es el valor del esfuerzo en el momento en que ocurre la falla en una roca cuando está sometida a un esfuerzo de compresión uniaxial, uno de los métodos más efectivos a la hora de determinar el UCS es la prueba de laboratorio de compresión uniaxial que consiste en someter una carga en un cilindro recto la muestra de roca con una presión de confinamiento igual a cero y se incrementa hasta que falle, también se utilizan correlaciones que ayudan a determinar este parámetro. (México, 2017)

2.4.2. Resistencia a la compresión con confinamiento (CCS)

Es el valor de máximo esfuerzo que soporta una roca cuando es sometida a compresión con confinamiento, se determina comúnmente con la prueba de laboratorio triaxial que consiste en incrementar la carga axial y de confinamiento simultáneamente hasta alcanzar el esfuerzo hidrostático recomendado, luego se mantiene la presión de confinamiento constante y la carga axial aumenta hasta que se falla la muestra de roca. (Reyes, 2015)

2.4.3. Dureza de la roca

La dureza es la resistencia de los materiales para resistir la penetración de otro cuerpo, para el caso de las rocas se evalúa esta propiedad con varios métodos como lo son la resistencia al rayado, a la indentación, a la abrasión, al rebote y al impacto. Dado que las rocas son materiales de gran complejidad no permite una correlación clara entre los distintos parámetros de resistencia

mecánica y de dureza, aunque en general la dureza de los materiales aumenta con a medida que la resistencia a la compresión aumenta. Debido a que las rocas presentan una moderada resistencia al impacto se hace más fácil medir esta propiedad con herramientas de impacto como lo es el martillo Schmidt que se utiliza en pruebas de laboratorio para este tipo de mediciones. (Ramos, 2011)

Un buen estudio geológico, no solo aporta datos de la dureza de la roca, es un mapa completo de las diferentes dificultades que se pueden tener en la perforación, como fallas que deslicen o traigan sedimentos llamados *cavings* que dañen la estabilidad de pozo debido a sus tamaños mayores e irregulares; también los diferentes tipos de rocas y su composición mineralógica que hacen que su grado de compactación varié, se debe recordar que ante mayor consolidación de la roca mayor esfuerzo se espera, sin embargo una formación blanda no es sinónimo de fácil perforación ya que otros problemas aparecen como el embolamiento de la broca y la complejidad de mantener la estabilidad de pozo ante una roca que se desmorona fácilmente. En Colombia se vive un caso especial sobre todo en el piedemonte llanero donde la depositación geológica ha creado intercalaciones de pequeños espesores, obligando al ingeniero de perforación a tener precauciones con los parámetros de perforación y el tipo de lodo con el que va a controlar el pozo que se está perforando. En resumen para obtener una perforación exitosa se debe tener información litológica completa que mínimo incluya: diagnóstico y tipo de fallas, análisis composicional de la roca, posibles fluidos que saturan la roca, presión de poro y fractura, presiones y temperatura del subsuelo.

2.5. Modelos analíticos que miden el desgaste de la broca

A lo largo de la literatura dos modelos fueron los más usados, recurrentes y estudiados para medir el desgaste de la broca, cada uno con un modelo matemático independiente que no tiene punto de convergencia como se mostrará adelante. Si se desea obtener el desgaste en metodología IADC se recomienda usar el modelo de abrasión a tres cuerpos que arroja valores certeros en base a esta clasificación internacional de desgaste de la broca, por otro lado el de energía mecánica específica muestra el aplastamiento del diente, dato que es usado para comparar en que parte de la perforación la broca sufrió el mayor daño o desgaste identificando fácilmente el intervalo de roca problemático, pero su transformación a desgaste IADC no es exacta sin pruebas de laboratorio. Se empezará explicando el modelo de MSE (energía mecánica específica)

2.5.1. Energía Mecánica Específica

Como su nombre lo indica, los cálculos se generan por medio de la ley de la conservación de la energía. A continuación, una breve explicación del método; su principio fundamental está basado en la cantidad de energía que se necesita para destruir una unidad de volumen de roca y la eficiencia con la que la broca destruye dicha roca. Es un parámetro altamente usado ya que también puede predecir los requerimientos de poder (torque y revoluciones por minuto) para un tipo de broca en específico y una rata de perforación esperada en un determinado tipo de roca. Esta teoría no es nueva y ha sido aplicada desde hace muchos años. La primera ecuación que se encuentra en la literatura es la de Teale que se generó a partir de la rotación de la perforación a condiciones atmosféricas (laboratorio); la ecuación de energía específica es la siguiente (Abbas, Colin, & Mojtava, 2014):

$$ES = \frac{WOB}{A_b} + \frac{120 * \pi * N * T}{A_b * ROP} \quad (1)$$

Donde:

Es = energía específica (psi)

WOB = peso sobre la broca (lb)

Ab = área del hueco de pozo (in²)

N = revoluciones por minuto (RPM)

T = torque (ft-lb)

ROP = rata de penetración (ft/s)

En la ecuación solo se observa la energía suministrada a la broca y no hay ninguna variable que involucre las propiedades de la roca a perforar; más adelante se buscará incorporar los esfuerzos naturales de la formación. Pressier (1973) validó la ecuación de Teale (ecuación 1) bajo condiciones de presión hidrostática; debido a que la mayoría de los datos de campo están medidos en superficie se generó el coeficiente específico del deslizamiento de la broca μ que buscaba expresar el torque en función del peso sobre la broca; este coeficiente también ha sido usado para computar los valores de energía específica en la ausencia de valores certeros de torque, usando la siguiente ecuación:

$$\mu = \frac{36 * T}{D_B * WOB} \quad (2)$$

Donde:

T = torque de la broca (ft-lbf)

Db = diámetro de broca (in)

μ = coeficiente específico de deslizamiento de la broca (adimensional)

Teale (1975) introdujo dos conceptos a la ecuación: mínima energía específica y máxima eficiencia mecánica. La mínima energía específica se alcanza cuando la energía específica alcanza o es casi igual a la fuerza compresiva de la roca que se está perforando. La eficiencia mecánica (*Off*) para cualquier tipo de broca se calcula de la siguiente manera:

$$EFF_M = \frac{Es_{min}}{Es} * 100 \quad (3)$$

Donde:

Es min = fuerza de la roca (CSS, GPa)

Es = energía especifica aplicada a la broca (GPa)

De las ecuaciones anteriores se genera el torque de la broca para un tipo de broca, rata de perforación y tipo de roca (CCS) dado; quedando la siguiente ecuación:

$$T = \left(\frac{CCS}{EFF_m} - \frac{4*WOB}{\pi*Db^2} \right) * \left(\frac{Db^2*ROP}{480*N} \right) \quad (4)$$

En la ecuación (4) todos los términos son conocidos. Este proyecto está enfocado a determinar la rata de perforación incluyendo en su cálculo el desgaste de la broca, si sustituimos los términos de la energía especifica incluyendo la mecánica y el torque encontrado en función del peso sobre la broca podemos tener una ecuación que calcule el ROP de la siguiente manera:

$$ROP = \frac{13,33*\mu*N}{Db*\left(\frac{CCS}{EFF_m*WOB} - \frac{1}{Ab}\right)} \quad (5)$$

Todas las variables han sido usadas anteriormente y así se obtiene una rata de perforación que se ve influenciada por el tipo de broca que estamos perforando. Posteriormente la investigación se enfocó en cuantificar la fuerza aparente que se ejerce sobre la broca; se originó un nuevo sistema de energía específica denominado con las iniciales SEROP (energía específica por el modelo de rata de perforación); determinando todos los coeficientes necesarios para la ecuación (5) en función de los esfuerzos de la roca para todos los tipos de broca, incluyendo:

- Brocas con dientes de acero
- Brocas con dientes insertados para formaciones blandas
- Brocas con dientes insertados para formaciones medias
- Brocas con dientes insertados para formaciones duras
- Brocas PDC de 3 a 4 aletas.
- Brocas PDC de 5 a 7 aletas.
- Brocas PDC de más de 7 aletas.
- Brocas TSP
- Brocas de diamante impregnados y de diamantes naturales.

De esta manera, es calculada la rata de perforación conociendo las propiedades de la roca a perforar de manera certera sin necesidad de alguna calibración. Sin embargo, mucha de la energía extra que se le imprime a la broca es para controlar otras variables que influyen en la perforación; como es la construcción de ángulo, imprevistos del subsuelo, zonas con presencia de fluidos presurizados y prevenir patadas de pozo; esto ocasiona pérdidas de eficiencia gigantes que traducidas a desgaste dan valores fuera de lo común. Por lo tanto, fue necesario incluir cálculos adimensionales que brinden un desgaste cercano a la realidad; estas ecuaciones son (Abbas, Colin, & Mojtava, 2014):

$$TD = a1 + a2\sqrt{PR_D} \quad (6)$$

Dónde: TD es el torque adimensional, PR_D es la rata de perforación adimensional, $a1$ y $a2$ son constantes de torque, varían con la litología y el desgaste de la broca. El desgaste de la broca también está afectado mayormente por la constante $a1$ y de acuerdo con la ecuación (7) puede ser modificada como:

$$TD = a1ED + a2\sqrt{PR_D} \quad (7)$$

Donde, ED es la eficiencia de la broca la cual es función del desgaste de la broca y va de un rango de 1-0, se asume de 1 es un valor para una broca nueva y 0 para una broca totalmente desgastada. Ordenando la ED ecuación (7) es igual a:

$$ED = \frac{TD - a2\sqrt{PR_D}}{a1} \quad (8)$$

$$TD = \frac{T}{Wob * D} \quad (9)$$

Donde T (lb-ft) es el torque medido, W (lb) el peso sobre la broca y D (in) el diámetro de la broca; ecuación (9)

$$PR_D = \frac{PR}{N.D} \quad (10)$$

Donde PR es la rata de perforación medida, N (rpm) la velocidad de la broca y D (in) el diámetro de la broca. FD es un parámetro adimensional que representa el aplastamiento de la broca (**en otras palabras, el desgaste de la broca**) y se representa en la ecuación (11) como:

$$FD = WD * (1 - ED) \quad (11)$$

$$WobD = \frac{PRD}{4*a1*ED} \quad (12)$$

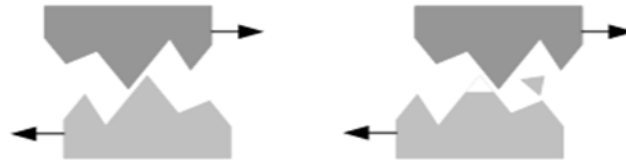
Donde WD ecuación (12) es el peso adimensional, los valores de las constantes de los torques a1 y a2 pueden ser determinados graficando TD vs la raíz cuadrada del PRD donde a1 es el intercepto y a2 es la pendiente. Con esta técnica, es posible medir el desgaste de los dientes de la broca en tiempo real utilizando medidas de MWD, cuando el desgaste ocurre ED decrece de 1 a 0, mientras que FD se comporta inversamente (Abbas, Colin, & Mojtava, 2014).

2.5.2. Abrasión a tres cuerpos.

La abrasión se define como la interacción de un material duro (broca) contra un material suave (formación). Se habla de una abrasión de dos cuerpos cuando la interacción es netamente entre el material duro y el blando, pero sabemos que en el proceso de perforación se generan ripios de la formación que interactúan entre la broca y la litología que se está atacando. El investigador Kopeliovich (1977) crea las ecuaciones para encontrar el volumen de la roca removida y luego en el 2015 varios investigadores trabajan para agregar las correcciones pertinentes para una abrasión de tres cuerpos; donde claramente el ripio de la formación se incluye también en los cálculos para hallar el desgaste de la broca. En la ilustración 11 se observa la diferencia entre el modelo de dos y tres cuerpos, posteriormente se mostrará el estudio y las ecuaciones necesarias para desarrollar el modelo.

Desgaste por abrasión

Abrasión dos cuerpos



Abrasión tres cuerpos

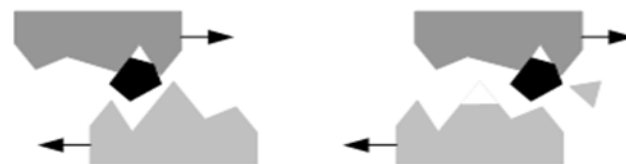


Ilustración 13 Abrasión a tres cuerpos

Fuente: Analysis of the wear of oil well drill bits by Rafid Kadhim (Abbas, 2015)

Para describir la abrasión de tres cuerpos primero se empieza por la ecuación de volumen de roca removida modificada:

$$V_r = \frac{F \cdot \tan(\theta) \cdot X}{\pi \cdot H_R} \quad (13)$$

Donde:

$H_r < 0,8 \cdot H_b$; ya que la dureza de la broca debe ser superior a la formación a perforar.

V_r = volumen de roca removida (m^3)

H_b = dureza del material de la broca (N/m^2)

H_r = dureza de la roca (N/m^2)

F = fuerza con la que el grano es presionado sobre una superficie determinada

X = distancia que se desliza el grano abrasivo (m).

Θ = ángulo de abrasión

Para poder identificar la dureza de la roca se utiliza el estudio realizado por los investigadores Mouritz y Hutchings que en 1991 hicieron un análisis de la micro dureza de las rocas y posteriormente Gokhale en 2010 realizó pruebas en laboratorio para obtener los resultados en mega pascales.

Tabla 5 Dureza de las rocas según la formación

Tipo de roca de formación	Micro – dureza (hv)	Dureza (Gpa)
areniscas	1100	10,79
Limolitas	110	1,079
shale	250	2,45
dolomita	200	1,961
anhidrita	160	1,569
conglomerado con calcita	120	1,17

Nota: tabla ilustrativa de la dureza de la roca según el tipo de formación predominante en su matriz. Micro dureza medida por Mouritz and Hutchings (1991). La dureza Vickers medida por Gokhale (2010).

El volumen de roca removido teórico sobre el volumen de roca real, permite calcular la eficiencia de la broca en tiempo real, pero el viaje de los sedimentos hasta superficie no sucede constantemente por la complejidad del subsuelo; por ende, se calculó el volumen que puede remover un inserto de la broca (V_i):

$$V_i = \frac{0.205 \left(\frac{W}{\# \text{ de insertos}} \right) * d_{\text{cone}} * N_{\text{cone}} * L * \tan(\theta)}{PR * Hb} * \left(\frac{HR}{HB} \right)^n \quad (14)$$

Donde:

W = peso sobre la broca

Dcone= diámetro del cono de la broca

Ncone = número de conos (por lo general 3 para tricónica y 1 para PDC, corroborar con el diseñador de la broca)

L = longitud de la broca

Θ = ángulo de abrasión (ángulo con el que perfora la broca y por ende se desgasta)

PR = rata de penetración (ROP)

Hb = dureza del material de la broca (N/m^2)

n = índice de poder (2-3.5)

Ya se tiene el volumen que puede remover la broca, pero sin datos de cuanta roca sale de la zaranda vibratoria en tiempo real no se puede calcular una eficiencia y el desgaste teórico que ha sufrido la broca. Por esta razón se realizó el cálculo del volumen que puede remover el inserto o diente de la broca, ya que al final esta es la parte de la broca que está en continuo contacto con la formación; aunque el resto de la broca puede sufrir desgaste por la fricción y erosión de la actividad perforativa, la parte que más sufre daños y que incide directamente en la eficiencia de la perforación son los dientes o insertos de la broca; por esta razón se incluyó la siguiente ecuación (Rafid 2015) en la herramienta computacional que calcula la altura del inserto o diente.

$$hb = \sqrt{\frac{3 \cdot Vb \cdot \tan(\theta)}{\pi}} \quad (15)$$

Hb (pulgadas)

Vb = volumen de roca removido teórico (V_i)

Θ = ángulo de abrasión (ángulo con el que perfora la broca y por ende se desgasta)

Todas las variables anteriores son conocidas. Una vez se tiene la altura del inserto en función del volumen de roca que puede remover la broca, con la ecuación 16 se calcula el desgaste que sufrió la herramienta.

$$\text{Desgaste Estimado} = \frac{hb}{\text{Altura inicial del inserto o diente}} * 8 \quad (16)$$

De esta forma se determina el desgaste de la broca según metodología IADC por medio del modelo de abrasión a tres cuerpos, por esta razón la ecuación se multiplica por el número ocho, para hacer la conversión a la metodología IADC

2.6. Modelos que estiman la rata de penetración

El daño en brocas de perforación está influenciado por **varios factores** relacionados con los parámetros operacionales de perforación y las propiedades de la roca. El tipo y magnitud del desgaste es dependiente de **diversos factores** que necesitan ser considerados para predecir el **daño**; como son la geometría de la broca al igual que los parámetros de perforación junto con las propiedades mecánicas de los materiales que forman la broca de perforación y propiedades mecánicas de la roca. Por lo tanto, se presentará el estudio previo de cada uno de los parámetros descritos en la justificación en base a los autores y softwares que usan estos modelos para cuantificar el desgaste de la broca y posteriormente se presentarán los diferentes métodos para medir la influencia del deterioro de la broca en la rata de perforación siendo esta última una relación de la longitud perforada sobre el tiempo necesario para perforar esa longitud, normalmente dada en pies (ft) sobre hora (h).

2.6.1. Bourgoyne and Young (1973)

El modelo se basa en un conjunto de funciones exponenciales abarcando 8 diferentes factores de influencia en la rata de perforación, cada factor como es el efecto del WOB, RPM, desgaste de los dientes de la broca y otros es independiente el uno del otro. (KUTAS, 2015)

$$R = (F1) * (F2) * (F3) * (F4) * (F5) * (F6) * (F7) * (F8) \quad (17)$$

Donde cada término posee su propia ecuación y sentido físico; estos son:

- $F1 = e^{2.303*a1}$ efecto de la fuerza de la formación. (17a)

- $F2 = e^{2.303*a2*(10000-TVD)}$ efecto de la compactación. (17b)

- $F3 = e^{2.303*a3*TVD^{0.69}*(EPP-9)}$ efecto de la presión de poro. (17c)

- $F4 = e^{2.303*a4*TVD*(EPP-ECD)}$ efecto de la presión diferencial. (17d)

- $F5 = \left\{ \frac{\frac{WOB_{sf}}{OD_{bit}} - \left(\frac{WOB_{sf}}{OD_{bit}} \right)_{limite}}{4 - \left(\frac{WOB_{sf}}{OD_{bit}} \right)_{limite}} \right\}^{a5}$ efecto del diámetro de la broca. (17e)

- $F6 = \left(\frac{RPM_{sf}}{100} \right)^{a6}$ efecto de las revoluciones por minuto. (17f)

- $F7 = e^{-a7*h}$ efecto del desgaste de la broca. (17g)

- $F8 = \left(\frac{F_j}{1000} \right)^{a8}$ efecto de la fuerza hidráulica de la broca. (17h)

Donde:

TVD = profundidad vertical verdadera. (Ft)

EPP = equivalencia actual del gradiente de presión de poro (lb/gal)

ECD = densidad de circulación equivalente (lb/gal)

WOBsf = peso sobre la broca medido en superficie (kilo-lb)

ODbit = diámetro externo de la broca (pulgadas)

RPMsf = revoluciones por minuto registradas en superficie

H = grado fraccional del desgaste del diente.

Fj= fuerza hidráulica aplicada detrás de la broca de perforación.

Tabla 6 Constantes dentro de la ecuación de Bourgoyne & Young.

CONSTANTE	LÍMITE INFERIOR	LÍMITE SUPERIOR
a1	0.5	1.9
a2	0.000001	0.0005
a3	0.000001	0.0009
a4	0.000001	0.0001
a5	0.5	2
a6	0.4	1
a7	0.3	1.5
a8	0.3	0.6

Nota: la siguiente tabla muestra los valores de las constantes usadas en la ecuación de la rata de penetración, adaptado de “A study of the applicability of Bourgoyne & Young ROP model and fitting reliability through regression”, SPE 182521-MS (2015)

2.6.2. Hareland and hoberoock

En 1981 Tommy y Warren definieron un modelo de rata de penetración el cual podía ser usado para optimizar la operación basándose en condiciones de operación, tipo de broca y propiedades de formación. Después, Hareland & Hoberoock modificaron el modelo en 1993 para incluir el efecto del diferencial de presión, la rata de desgaste en la broca y problemas en un hoyo limpio en el análisis.

$$R = W_{f*} [f_c(p_c) \left(\frac{a*S^2*d_b^3}{N*W^2} + \frac{b}{N*d_b} \right) + \frac{C*d_b*\gamma*\mu}{F_{jm}}]^{-1} \quad (18)$$

En la ecuación a, b y c son tres constantes de la broca las cuales son función de las características y pueden ser calculadas de laboratorio basadas en experimentos. La modificación del impacto de la fuerza del chorro hidráulico puede ser analizada en la siguiente ecuación

$$Fjm = (1 - av^{-0.22}) * Fj \quad (19)$$

Donde fj es el impacto que se ejerce en un plano por una boquilla circular y av es la relación entre la velocidad que sale de la boquilla y la que se retorna, el cual es un término adimensional.

$$fj = 0.000516p * q * vn \quad (20)$$

$$AV = \frac{vn}{vf} = \frac{0.15db^2}{3dn^2} \quad (21)$$

En el modelo la función del diferencial de presiones en fondo de pozo es definida como:

$$fc(pe) = Cc + Ac * (Pe - 120))^{Bc} \quad (22)$$

Las constantes Cc , Ac , y Bc dependen de la permeabilidad de la formación y se encuentran en tablas de la literatura.

La ecuación de desgaste está definida como:

$$Wf = 1 - \frac{\Delta BG}{8} \quad (23)$$

ΔBG es definido como el grado de desgaste y es definido como:

$$\Delta BG = \sum_{j=1}^n w.n.ARabr.S \quad (24)$$

Por último, tenemos la fuerza de la roca confinada que fue definida por Rampersed et (1994) en la siguiente ecuación:

$$S = So * (1 + as * Pe^{bs}) \quad (25)$$

3. Metodología de estudio

Como se mencionó al principio del capítulo que habla sobre los modelos seleccionados, la metodología de estudio se basó en dos métodos matemáticos que miden el desgaste de manera independiente, conservando la similitud en los parámetros operacionales sobre la broca; y dos modelos matemáticos que calculan la tasa de penetración en función de este desgaste calculado. Para ampliar el análisis del lector se combinó todo en una herramienta computacional programada con la ayuda del software Matlab. A continuación, se mostrará el procedimiento y funcionamiento de la síntesis de este proyecto.

3.1. Introducción y modo de uso de la herramienta computacional (SBW)

Software of Bit Wear (SBW) es el nombre de la ayuda pedagógica que desarrolla este trabajo. El propósito principal de la herramienta es predecir el desgaste que sufre la broca en su interacción con la roca a perforar, **sin tomar en cuenta** la incidencia del tiempo o en otras palabras los cálculos en tiempo real. El software ofrece dos modelos que se denominarán módulos; estos son: La energía mecánica específica que se basa en la conservación de la energía y la abrasión a tres cuerpos que mide el desgaste por la dureza del material y la fuerza compresiva que debe efectuar para perforar la roca. El ambiente que ofrece la herramienta es de tipo académico permite que el usuario realice un recorrido sencillo dentro de la herramienta y segundo tenga información adicional de los cálculos y la data correcta que se debe ingresar para su óptimo funcionamiento. La estructura del programa fue creada en el módulo de **GUIDE** que incluye la herramienta **MATLAB** y gracias a su compilador interno se genera el ejecutable, ofreciendo la posibilidad de instalar el software donde el usuario lo considere pertinente. Los resultados se muestran en forma de gráficos y tablas, permitiendo analizar la energía mecánica específica o abrasión que sufrió la herramienta por los

diferentes modelos que se usaron para calcularla; posteriormente el desgaste teórico en función de la eficiencia que desempeña la broca y por último está el módulo para analizar como el desgaste influye en la tasa de perforación: El enfoque y análisis extra que ofrece la herramienta computacional sobre esta variable (ROP) brinda un panorama global de las demás variables que están presentes en la perforación como son el peso, torque y revoluciones sobre la broca; agregando la velocidad el cual es un indicativo económico que ayuda a reducir tiempos no productivos (NPT) y optimizar la perforación del pozo. Bajo la premisa de eficiencia se construyó la herramienta que no contiene ninguna complejidad en su uso; la cual dispone de un manual independiente dentro del software con el fin de brindar ayuda extra que ayude a la comprensión de su funcionamiento interno; el programa posee el siguiente esquema del software.

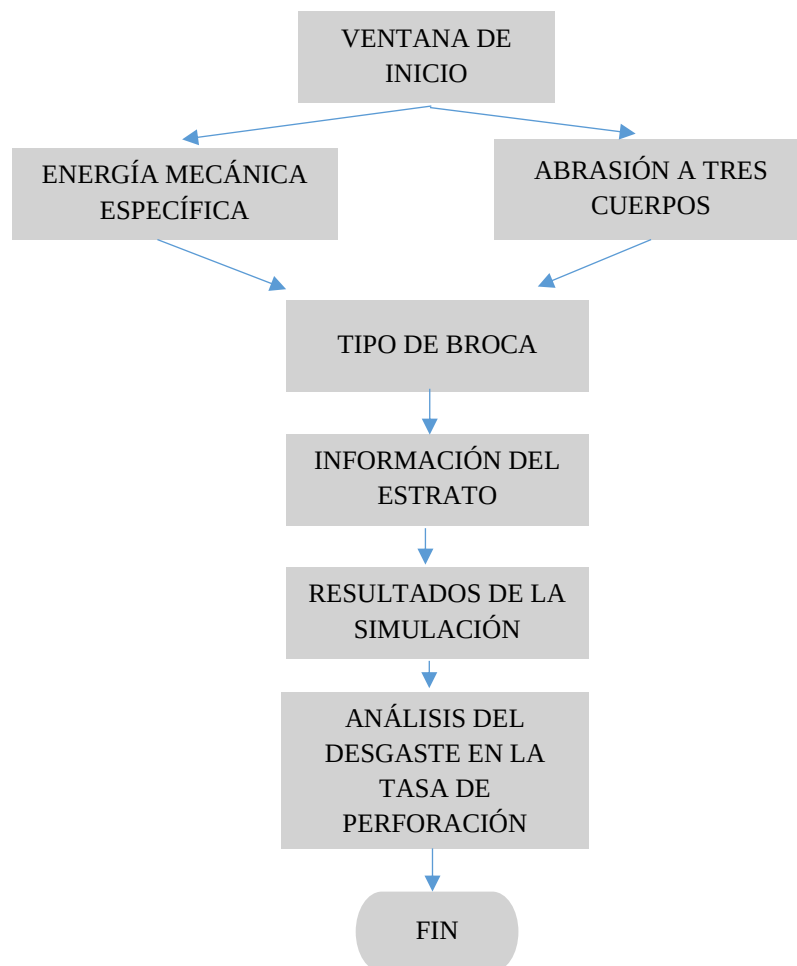


Ilustración 14 Esquema herramienta computacional

3.2. Interfaz de la herramienta computacional

La interfaz principal se resume en una tabla que contiene todas las variables necesarias para realizar los cálculos del modelo de Energía Mecánica Específica. Estos datos son la clave para realizar una óptima simulación y son la base para calcular la eficiencia de la broca, por este motivo se añade en el módulo la opción de ingreso manual con el fin de agregar exactitud del desgaste inicial que posee la broca de perforación con el que se perforó el intervalo de interés donde se medirá el desgaste posterior que sufrió la broca.

Es importante tener referenciada la litología que se perforó, ya que la tabla debe ser llenada por intervalo de roca perforada y se le solicitará al usuario que ingrese la información operacional de la broca, como lo es el peso sobre esta, torque, revoluciones por minuto y rata de penetración; también se debe incluir información sobre la roca, como su dureza que es calculada en función al tipo de roca (arcilla, arena o caliza) y su porosidad o compactación. Esta data es suficiente para realizar los cálculos de energía mecánica específica, con el fin de comparar los modelos más populares de la literatura, cuatro modelos diferentes son usados en el cálculo de la energía necesaria sobre la broca para perforar dicha roca, estos son:

No	Model	Model formula
1	Teale (1965)	$MSE = \frac{WOB}{A_b} + \frac{120\pi N \cdot T}{A_b \cdot ROP}$
2	Pessier and Fear (1992)	$MSE = WOB \left(\frac{1}{D_b} + \frac{13.33\mu_b N}{A_b \cdot ROP} \right)$ $\mu_b = 36 \left(\frac{T}{D_b \cdot WOB} \right)$
3	Dupriest and Koederitz (2005)	$MSE = 0.35 \left(\frac{WOB}{A_b} + \frac{120\pi N \cdot T}{A_b \cdot ROP} \right)$
4	Cherif and Bits (2012)	$MSE = E_m \left(\frac{4WOB}{\pi D_b^2} + \frac{480N \cdot T}{\pi D_b^2 \cdot ROP} \right)$

Ilustración 15 Modelos de Energía Mecánica Específica (MSE)
Analysis of the wear of oil well drill bits by Rafid Kadhim (Abbas, 2015)

Posteriormente esta energía suministrada a la broca es convertida en eficiencia la cual enseña el desarrollo y compartimiento de la broca en el subsuelo, la escala de la eficiencia es la fracción de trabajo efectivo efectuado por la herramienta y su valores oscilan entre 0 (mínima eficiencia) y 1 (máxima eficiencia); teóricamente una broca nueva con todas las variables operacionales optimizadas debería tener una eficiencia de 1 es decir máxima y cada vez que se deba aumentar una variable operativa para mantener la rata de penetración estable se observa como una pérdida de eficiencia que a su vez se traduce al desgaste de la herramienta. Gráficamente se muestra el desgaste, que en pocas palabras es el exceso de energía que se le imprime a la broca para que se desempeñe a su máxima eficiencia con ayuda de los cálculos adimensionales que se mencionaron anteriormente.

El módulo de abrasión a tres cuerpos lo compone una tabla muy similar a la de energía mecánica específica, donde se piden datos de la broca y de la formación que se quiere perforar; agregando dos variables nuevas: la dureza de la roca y la altura del inserto o el diente (dependiendo del tipo de broca). Luego de tener los datos de los intervalos perforados el usuario debe oprimir el botón continuar y se mostraran los resultados gráficos de la simulación; en esta ventana emergente se muestra la gráfica del desgaste. Por último, tenemos la ventana de análisis donde se calcula la rata de penetración incluyendo el desgaste, de este modo se puede comparar con la rata de penetración real que ingreso el usuario al simulador.

3.3. Resultados esperados

Las gráficas que muestran los dos módulos son los resultados de los respectivos modelos matemáticos que miden el desgaste de la broca de perforación, se incluyen también los cálculos de desgaste en función de los resultados de los modelos anteriormente mencionados. Los resultados también son un análisis crucial para entender que roca fue la que nos causó más

problemas en la perforación, al igual se buscó entender el desempeño de la broca en toda la corrida de pozo y luego poder tener una base de estudio analógica que permita perforar un pozo cercano con menos incertidumbre.

3.4. Análisis: influencia del desgaste en la rata de penetración

La herramienta computacional calcula la rata de penetración agregando los resultados del desgaste; usando dos modelos matemáticos que agregan la variable del desgaste dentro los cálculos para obtener la rata de penetración. El usuario podrá analizar como el desgaste influye en la rata de penetración; cabe resaltar que el simulador toma los datos que ingresa el usuario de ROP como si la broca no hubiese sufrido desgaste a lo largo de la perforación; esto con el fin de visualizar la diferencia entre perforar con una broca nueva y una desgastada.

4. Caso de estudio

Previamente a mostrar la data de entrada para la validación teórica de este trabajo, se mostrará la información del software de la empresa DrillScan®, llamado BitScan. Gracias a la versión demo suministrada por su equipo de trabajo y en especial Christophe Plee* fue seleccionado el modelo de energía mecánica específica, base de este proyecto de grado. El software BitScan está enfocado al diseño de la broca, permitiendo simular los diferentes diámetros, materiales, rastrillos, cortadores, dientes y separación entre capas de la herramienta. Además, incluye un módulo de

* Ingeniero de la empresa DrillScan®

análisis que permite simular el desgaste que sufre la herramienta diseñada bajo unos parámetros de perforación que establece la versión demo; debido a que estos datos no se pueden modificar fue imposible usarlo como el validador de la herramienta, pero fue de gran ayuda para comenzar la investigación del marco teórico de la herramienta diseñada. Su interfaz 3D de desgaste luce de la siguiente manera:

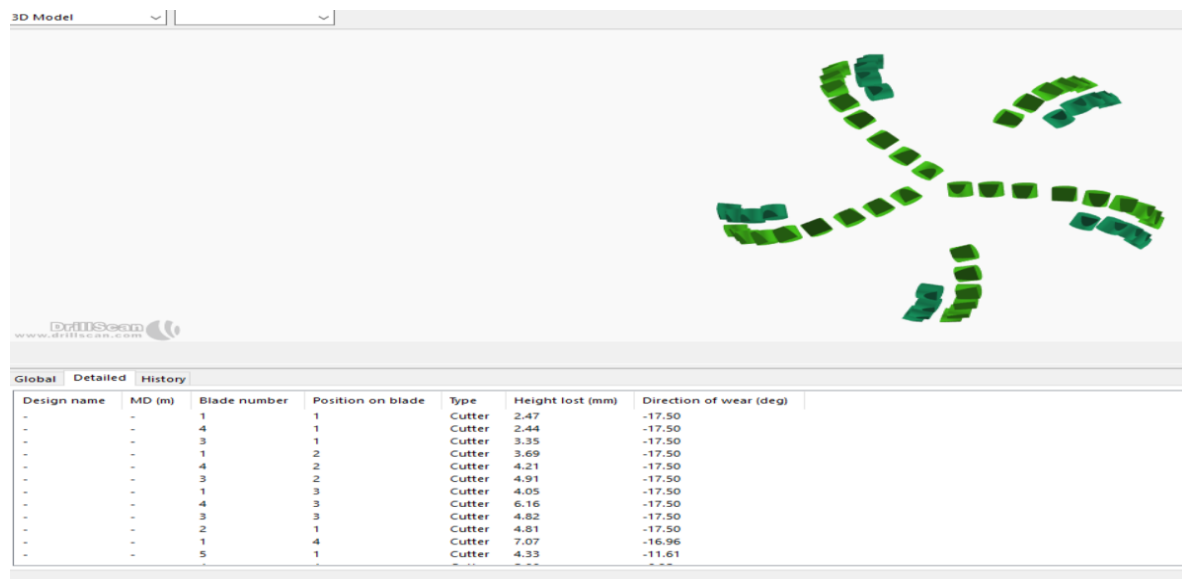


Ilustración 16 Desgaste del software BitScan

Extraído de la herramienta computacional de la empresa DrillScan® para diseño de brocas denominado BitScan

La visualización 3D que ofrece el programa permite estudiar los cortadores que más sufren desgaste, haciendo seguimiento a la sombra gris que aparece sobre dicho elemento de la broca y permitiendo hacer mantenimiento preventivo preciso y exacto.

Para poder realizar nuestro análisis se estudió un caso propuesto en la tesis de Rafid Kadhim (Abbas, 2015) donde también se analiza el desgaste de la broca de perforación. Estos son los datos de entrada que se agregaron por medio de un botón (“Test”) para ser usados automáticamente por el usuario, en caso de probar el funcionamiento de la herramienta *Software of Bit Wear* (SBW).

Test							
	Espesor	Diametro de broca	Tipo de roca	Peso sobre la broca	Torque sobre la broca	RPM	ROP
1	38	26	Roca muy i ✓	10	2.7886e+03	100	20.7620
2	660	17.5000	Roca muy i ✓	10	1.4175e+03	100	18.9580
3	947	12.2500	Roca dura ✓	18	2.3658e+03	70	16.2030
4	1440	12.2500	Roca debil ✓	18	2.1987e+03	75	20.8610
5	1530	12.2500	Roca dura ✓	18	2.5828e+03	75	14.7600
6	1721	12.2500	Roca medic ✓	18	2.0801e+03	90	7.1830
7	1925	12.2500	Roca medic ✓	18	2.0983e+03	90	8.0360
8	2074	8.5000	Roca debil ✓	15	1.3935e+03	100	11.4800
9	2440	8.5000	Roca debil ✓	15	1.3576e+03	60	11.4800

Ilustración 17 Datos extraídos MSE de la herramienta computacional

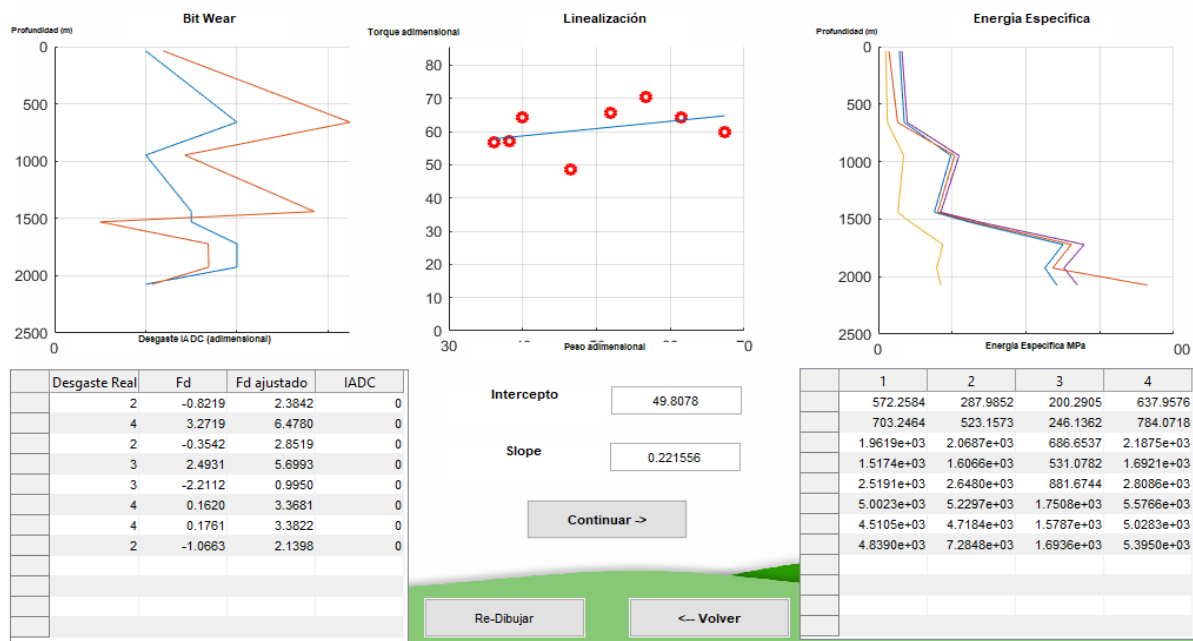


Ilustración 18 Gráficas extraídas MSE de la herramienta computacional

Como se observa en las dos ilustraciones anteriores, se tienen los datos de entrada que son de un caso en estudio señalado en la tesis desarrollada por Rafid y también los resultados tanto en graficas como en tabla de datos; si lo comparamos con la ilustración 19, observamos que los

valores son muy cercanos, lo que ratifica que la corrida dentro del simulador para energía mecánica específica fue exitosa.

Depth (m)	μ	Torque (lb.ft.)	T_D	$T_D \cdot 10^3$	R_D	$Sq(R_D) \cdot 10^3$	F_D	Bit tooth wear (0-8)
0-38	0.193	2788.605	0.064	64.352	0.002	39.964	-0.805	2
38-660	0.146	1417.530	0.049	48.601	0.002	46.548	3.194	4
660-947	0.193	2365.806	0.064	64.376	0.004	61.475	-0.416	2
947-1440	0.179	2198.652	0.060	59.827	0.005	67.388	2.311	4
1440-1530	0.211	2582.809	0.070	70.281	0.003	56.684	-2.209	2
1530-1721	0.170	2080.115	0.057	56.602	0.001	36.098	0.169	3
1721-1925	0.171	2098.304	0.057	57.097	0.001	38.181	0.180	3
1925-2074	0.197	1393.456	0.066	65.574	0.003	51.973	-1.069	4
2074-2440	0.192	1357.608	0.064	63.887	0.005	67.097	0.244	2

Ilustración 19 Datos entrada tesis Rafid (2015)

Extraído de la tesis de doctorado; Analysis of the wear of oil well drill bits by Rafid Kadhim (Abbas, 2015)

Igualmente se comparan los resultados gráficos obtenidos por la herramienta computacional diseñada y el estudio elaborado en la universidad de Londres (ver ilustración 20)

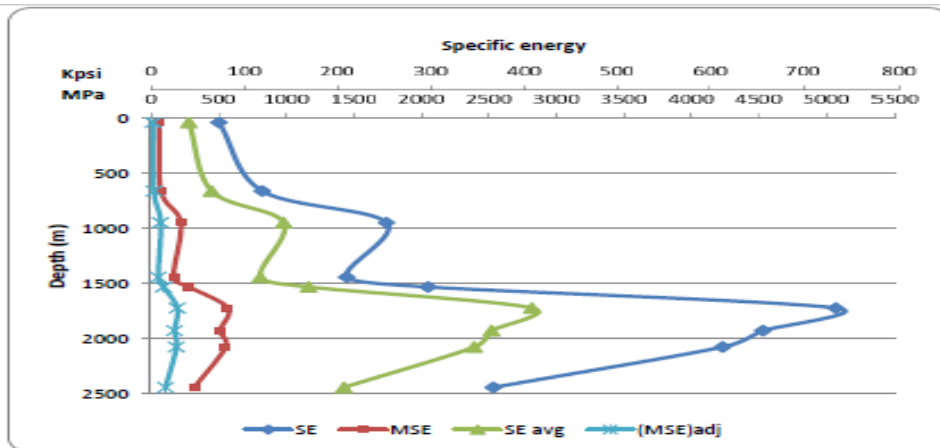


Figure 3.3 Specific energy vs. depth for well A₁

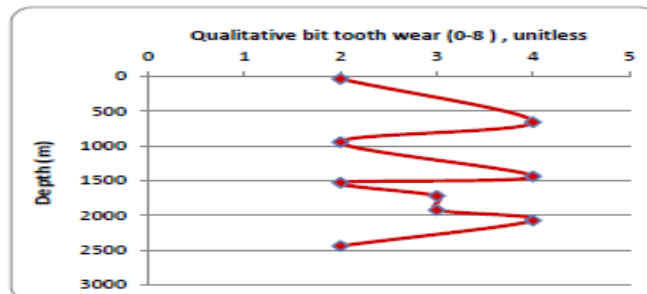


Ilustración 20 Energía específica vs Profundidad y el desgaste de la broca Rafid (2015)

Extraído de la tesis de doctorado; Analysis of the wear of oil well drill bits by Rafid Kadhim (Abbas, 2015)

Para abrasión a tres cuerpos se tiene la misma estructura comparativa, los datos de entrada para los cálculos pertinentes y las gráficas de resultados, la única variable diferente es la dureza de la roca fundamental para medir el desgaste sufrido por la herramienta.

Test												
	Profundidad	Diametro de broca	Número de Insertos	Peso sobre la broca	Initial Tool Height	RPM	ROP	M	Bit Tooth Wear	Rock Hardness	Bit Hardness	Torque sobre broca
	38	26	50	10	1.5000	100	20.7620	0.1930	2	1.1700	12.9500	2.7886e+03
	660	17.5000	50	10	1.5000	100	18.9580	0.1460	4	1.2500	12.9500	1.4175e+03
	947	12.2500	50	18	1.5000	70	16.2030	0.1930	2	1.0790	12.9500	2.3658e+03
	1440	12.2500	50	18	1.5000	75	20.8610	0.1790	4	1.9610	12.9500	2.1987e+03
	1530	12.2500	50	18	1.5000	75	14.7600	0.2110	2	1.0790	12.9500	2.5828e+03
	1721	12.2500	50	18	1.5000	90	7.1830	0.1700	3	1.7000	12.9500	2.0801e+03
	1925	12.2500	50	18	1.5000	90	8.0360	0.1710	3	1.0790	12.9500	2.0983e+03
	2074	8.5000	50	15	1.5000	100	11.4800	0.1970	4	2.2000	12.9500	1.3935e+03
	2440	8.5000	65	15	1.5000	60	11.4800	0.1920	2	1.7500	15	1.3576e+03

Ilustración 21 Datos entrada abrasión de la herramienta computacional

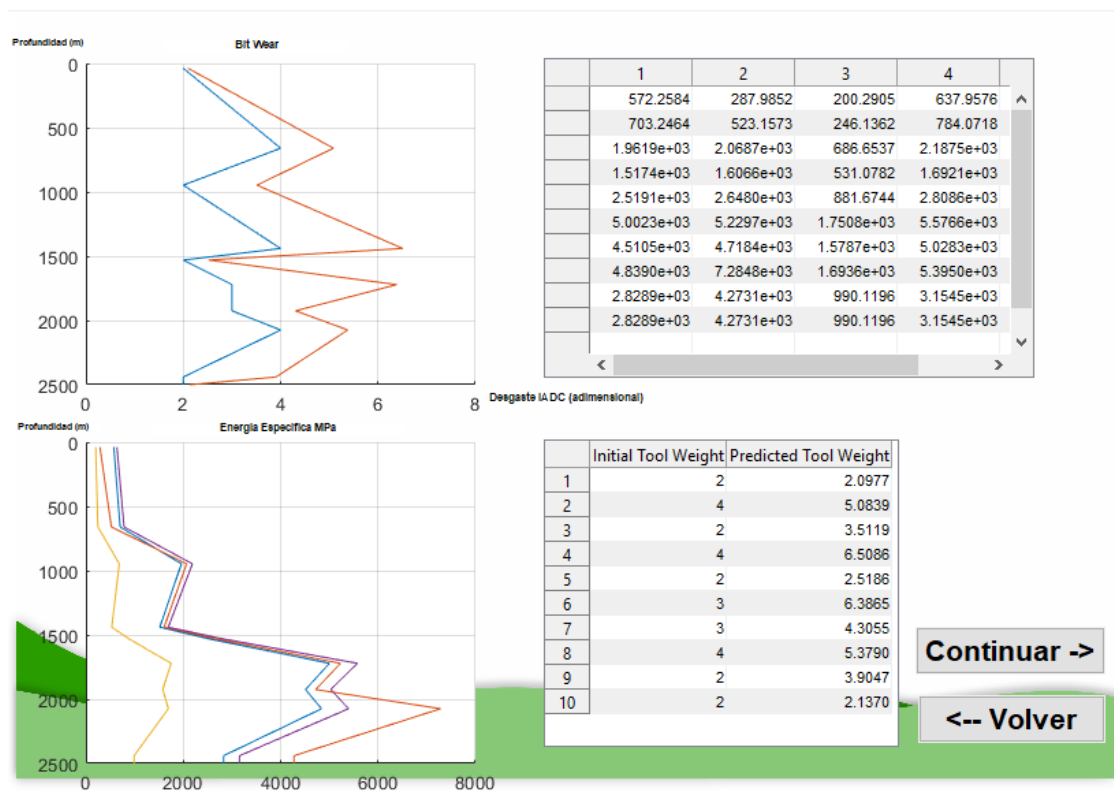


Ilustración 22 Datos extraídos abrasión de la herramienta computacional

Comparando cualitativamente los resultados con las gráficas iniciales de la tesis de Rafid (2015) se observa la concordancia entre datos. A continuación se muestra la tabla 7 con la comparación numérica entre los resultados de la herramienta computacional creada y la literatura para energía mecánica específica.

Tabla 7 comparación software y tesis Rafid (2015) para MSE

Energía Mecánica Específica		
Desgaste SBW	Desgaste Rafid	% error
-0,80	-0,81	0,07
3,19	3,19	0,01
-0,42	-0,42	0,24
2,31	2,31	0,06
-2,21	-2,21	0,04
0,17	0,17	0,18
0,18	0,18	0,28
-1,07	-1,07	0,08
0,24	0,24	0,29
Promedio de % error		0,14

Nota: comparación de los resultados obtenidos del modelo MSE simulado dentro de la herramienta computacional y los datos arrojados por la tesis de Rafid (2015)

Como se observa en la tabla anterior el porcentaje de error es cercano al 0,1% verificado con los datos de la literatura. Para el modelo de abrasión a tres cuerpos no se tiene la comparación con los datos exactos de literatura, ya que el autor combino datos de pruebas de laboratorio y creo un nuevo modelo cuyos resultados no usan las ecuaciones primarias explicadas anteriormente en este proyecto. Por lo tanto, se generó una comparación con los resultados que arrojó el módulo de energía específica que fueron convertidos a desgaste IADC que se lee en la tabla de resultados del software como “FD ajustado”, el cual es una interpolación entre el menor y mayor valor arrojado

del FD o desgaste inicial con el fin de normalizarlo en la escala de 0-8 que usa la metodología IADC. Los resultados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 8 Comparación MSE y Abrasión 3 cuerpos

Comparación Métodos		
Desgaste FD ajustado MSE	Desgaste Abrasión 3 cuerpos	% error
2,4	2,10	12,1
4,8	5,08	5,9
2,4	3,51	46,5
3,6	6,51	80
3,6	2,52	30
6	6,39	6,5
4,8	4,31	10,2
4,8	5,38	12
2,4	3,90	62,5
Promedio de % error		29,6

Nota: comparación de los resultados obtenidos de los dos modelos dentro de la simulación realizada en la herramienta computacional

El amplio porcentaje de error era esperado, por esta razón cada modelo se trabajó por separado como recomendaba la literatura sobre el tema. Este amplio margen de error se debe a las variables que se ingresan para hacer los cálculos iniciales; como la dureza de la roca que no toma en cuenta la energía mecánica específica, por otro lado la interpolación creada para convertir a grado IADC no tiene soporte científico que arroje los resultados esperados y sus valores se salen de lo común, es por esto que se adiciono una columna dentro de la tabla para que el usuario digite en el módulo de MSE el desgaste real y pueda hacer la comparación grafica con los resultados interpolados. Algunos autores aconsejaban algunas ecuaciones con el fin de convertir el aplastamiento del diente a la metodología IADC, pero la cercanía con los datos reales no fue conseguida, por este motivo se optó por este método donde cada modelo funciona independiente. Por último se muestra la comparación entre el modelo creado a partir de abrasión a tres cuerpos que Rafid llama *power*

index, el cual transformo en aplastamiento de diente (FD) con datos de laboratorio para poder analizarlo con los resultados por energía mecánica específica y el desgaste real.

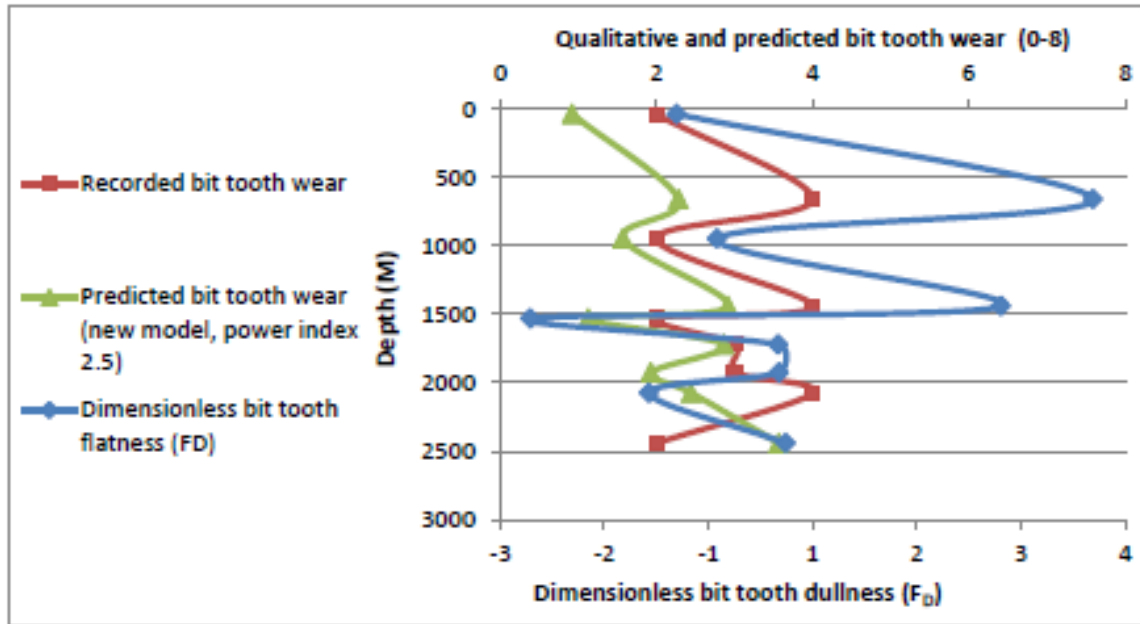


Ilustración 23 Desgaste comparando los dos modelos y datos reales Rafid (2015)

Extraído de la tesis de doctorado; Analysis of the wear of oil well drill bits by Rafid Kadhim (Abbas, 2015)

5. Conclusiones

- La comparación con los datos de la literatura evidencia que la energía mecánica específica junto con los cálculos adimensionales arroja resultados confiables sobre el aplastamiento de los dientes de la broca (valor adimensional que depende de los parámetros sobre la broca), con un porcentaje de error no mayor al 1%, sin embargo, no se debe comparar los dos modelos, esto debido a la transformación a metodología IADC que no es exacta para el modelo matemático de MSE y la medición del desgaste de cada modelo que funciona de manera independiente, manejando escalas sin un punto en común entre ellos, esto no

significa que estén erradas, solo son puntos de partida diferentes. Por otro lado, como la abrasión a tres cuerpos usa la altura inicial del inserto o diente como dato de entrada, hace más exacto el cálculo del desgaste en términos de IADC, para hacer un estudio completo del impacto del desgaste se deben usar ambos métodos independientemente y analizar su influencia en la tasa de penetración.

- El estudio del desgaste de cualquier herramienta es complejo como se observó en todo el análisis realizado en esta tesis. El nivel de dificultad aumenta cuando la interacción es con el subsuelo, donde no se puede ver o controlar el medio con el que interactúa la broca y la única imagen que se tiene de la litología del subsuelo y sus posibles esfuerzos son por medio de estudios sísmicos o analogías con pozos cercanos, los cuales son de carácter predictivo y no certeros como se quisiera. Por esta razón se deben tener buenos equipos calibrados que muestren todas las variables operacionales en tiempo real con alto nivel de exactitud y precisión, agregando límites de operación donde se generen alarmas que avisen al personal de perforación la posible falla que se está generando. **El nivel de complejidad de tomar estos datos en tiempo real fue la razón para crear esta herramienta pedagógica que busca estudiar los errores cometidos en los parámetros aplicados sobre la broca para corregir o colocar esos límites que no fueron visibles en tiempo real, reduciendo costos por tiempos no productivos y viajes innecesarios de sarta de tubería de perforación**
- Las grandes empresas de servicios petroleros se destacan principalmente por dos razones: la tecnología que acoplan a sus herramientas y como se maneja la información que arroja dicha herramienta. El mercado de software y manejo de datos está en crecimiento y tiene

una gran variedad de aplicaciones dentro de la industria del petróleo. Esta razón impulso el desarrollo de esta tesis que integra los conocimientos de programación y la ingeniería de petróleos. La globalización ha generado más competencia laboral y es menester usar el ingenio integralmente, aprendiendo de todas las habilidades que solvente o reduzcan las necesidades de la industria y analizar cada variable que influye dentro de cada proceso, aliviando la transición energética que vive nuestra comunidad y aprovechando al máximo este recurso no renovable que es el petróleo.

6. Recomendaciones

- La variable del tiempo se debe agregar, para hacer análisis reales en pozo mientras se realiza la perforación; otros parámetros como la vibración de la broca, el lodo, la fuerza hidráulica y la dirección de la perforación entrarían en juego al momento de realizar los cálculos matemáticos pertinentes. Por ende, es necesario pensar en un modelo de simulación numérica que integre y crezca mientras se obtienen datos de los estratos perforados con los respectivos valores que se le imprimen a la broca desde la torre de perforación. Una red neuronal agregaría el manejo de datos necesario para hacer perforaciones analíticas en tiempo real en el mismo campo o con zonas que presenten las mismas propiedades petrofísicas.
- La herramienta BitScan de la empresa DrillScan fue de gran ayuda para entender los modelos matemáticos que miden el desgaste, sin embargo, un gran avance más analítico

sería crear un entorno visual que permita ver en 3D el desgaste ya que ayudaría a cambiar las piezas más desgastadas y saber que insertos o dientes son los que más interactúan con la roca y por consiguiente se desgastan más rápido. Anexar un módulo de diseño de broca tal como lo hace el software BitScan permitiría optimizar los puntos críticos de desgaste y se diseñaría la herramienta para el pozo en específico que se desee perforar, aumentando así su vida útil y ahorrando en costos de viaje de tubería. Las desventajas son los equipos y materiales necesarios para crear la broca.

- Anexar un módulo de análisis económico permitiría cuantificar el ahorro en pro de evitar el desgaste de la broca. Los tiempos no productivos son pérdida de dinero y agregar un informe económico gerencial a la herramienta permite analizar el costo-beneficio de utilizar la herramienta adecuada al momento de la perforación. Los costos son la veracidad para que un proyecto en la industria se ejecute o no sea tomado en cuenta.
- Trabajar los dos métodos en conjunto y agregar el modelo matemático que permita acoplar los resultados de aplastamiento del diente y desgaste de la altura del diente es el siguiente paso de la investigación para predecir el desgaste que sufrió la broca durante la perforación.

Bibliografía

- Abbas, R. K. (2015). *Analysis of the wear of oil wells drill bits*. London: University of Leeds.
- DATALOG. (2002). Mud Loggin Instrumentación e Interpretación. In D. Hawker, K. Vogt, & A. Robinson, *Manual de Perforación Procedimientos y Operaciones en el Pozo* (pp. 198-205). Alberta: Datalog Canada.
- González, A., Jara , M., Ramirez , L., & Malavé , K. (2017). Diseño del programa de brocas requerido para perforar el pozo direccional. *Escuela Superior Politécnica del Litoral*, 2.
- Matlab. (2019, septiembre 10). *Mathworks*. Retrieved from https://la.mathworks.com/company.html?s_tid=hp_ff_a_company
- México, U. A. (2017). *Propiedades ingenieriles de las rocas*. México: Introduccion Ingeniería Civil.
- Ramos, J. L. (2011). Estado del arte de brocas de perforación. *Ingeniería de petróleos*, 99-113.
- Reyes, W. (2015). *Diseño de la perforación de pozos*. Colombia: Autonomo .
- A real mathematical model to compute the pdc cutter wear value to terminate pdc bit run. G. Mohamed Gouda, M. Maestrami- Eni, M.A Abu Saif, S.E Shalaby, M.S. Farhat
Faculty of engineering Suez University, A.S.Dahab faculty of engineering Cairo
University
- Use of Mechanical Specific Energy Calculation in Real-Time to Better Detect Vibrations and Bit Wear While Drilling. S. Menand and K. Mills, DrillScan US Inc.
- Development and Applications of a New System to Analyze Field Data and Compare Rate of Penetration (ROP) Models. Cesar Mattos de Salles Soares 2015.

Drag Bit Wear Model. by L.A. Sinor and T.M. Warren, Amoco Production Co.

Drag Bit Wear Model. A. Sinor, SPE, and T.M. Warren, SPE, Amoco Production Co.

Practical Evaluation of Rock-Bit Wear During Drilling. Hubert Fay, SPE, Inst. Francais du
Petrole

Hareland, G., and L.L Hoberock. 1993. Use of Drilling Parameters to Predict In-Situ Stress
Bounds. In the Proceedings of the Drilling Conference in Amsterdam, February 22-25,
1993.

Instantaneous monitoring of drill bit wear and specific energy as a criteria for the appropriate
time for pulling out worn bits,Rafid k.Abbas , Dr.Ali Hassanpour ,Dr Colin Hare and
Prof .Mojtaba Ghadiri , institute of particle Sciencie Engineering , University of Leeds,
Leeds,LS2 9jt , UK.

NGUYEN, Don Tuan. Drill Bits Technology – Introduction of The New Kymera Hybrid Drill
Bit. Stavanger, 2012. Tesis de maestría (Ingeniero de petróleo con especialización en
perforación). Universidad de Stavanger. Facultad de ciencias y tecnología. Departamento
de ingeniería de petróleo. 68 p.

Anexos

Instructivo de la herramienta

Para su instalación si se tiene el software *Matlab* se ingresa por la carpeta “*for testing*” y ejecutamos el programa, en caso contrario ingresamos por “*for redistribution*” y se ejecuta el instalador. A continuación, por medio de ilustraciones de la herramienta computacional se explicará brevemente su uso.

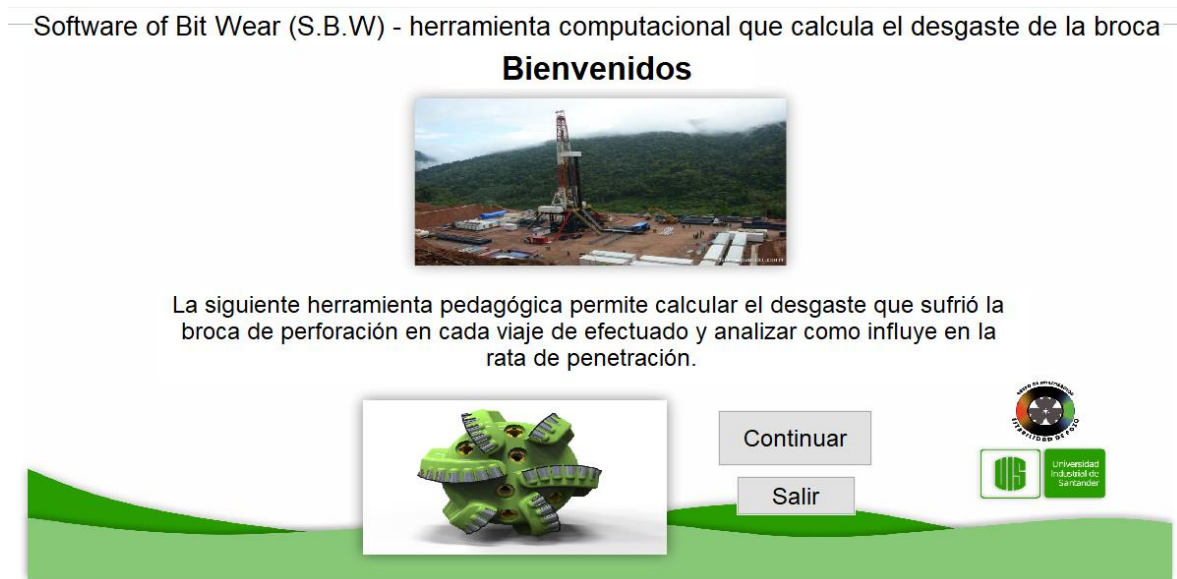


Ilustración 24 Pantalla de inicio

La pantalla de inicio es la bienvenida al software, se da una breve introducción del uso de la herramienta computacional. Dos opciones se observan, la primera es para cerrar la herramienta “salir” al costado izquierdo de la broca y la opción de continuar donde aparecerá el menú principal del software.

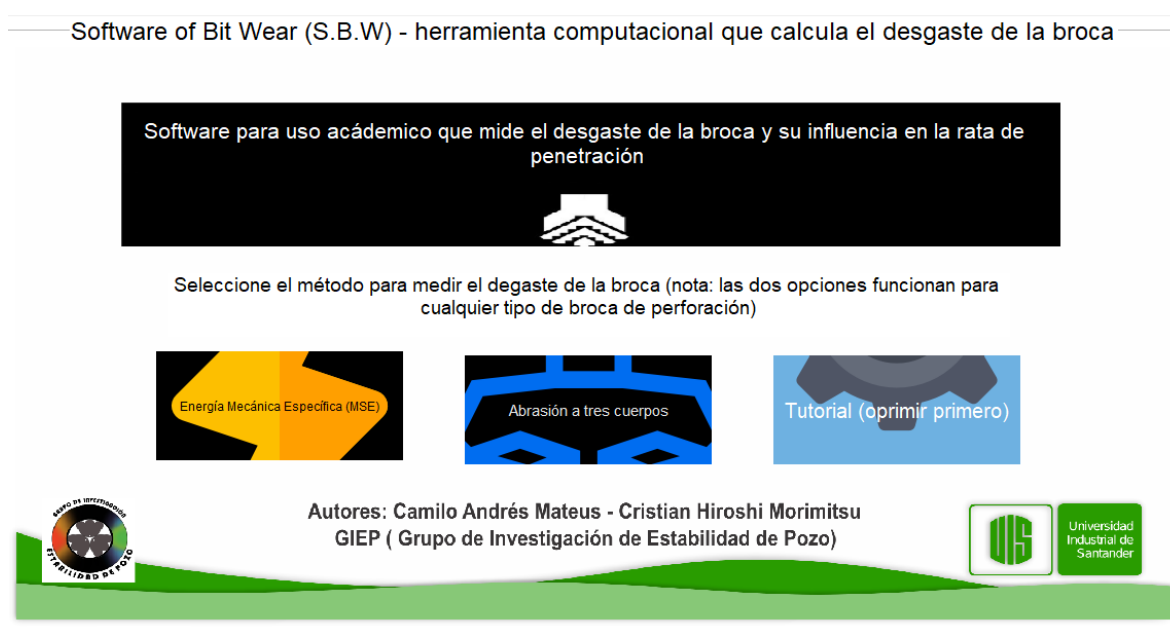


Ilustración 25 Menú principal

Tres opciones se evidencian, la primera que se recomienda acceder es la de “tutorial” donde se da una introducción sencilla de la herramienta computacional y se enlaza con este manual ampliando la información teórica y funcionamiento interno de cada modelo. Se iniciará con el modelo de energía mecánica específica el cual presenta la siguiente interfaz.

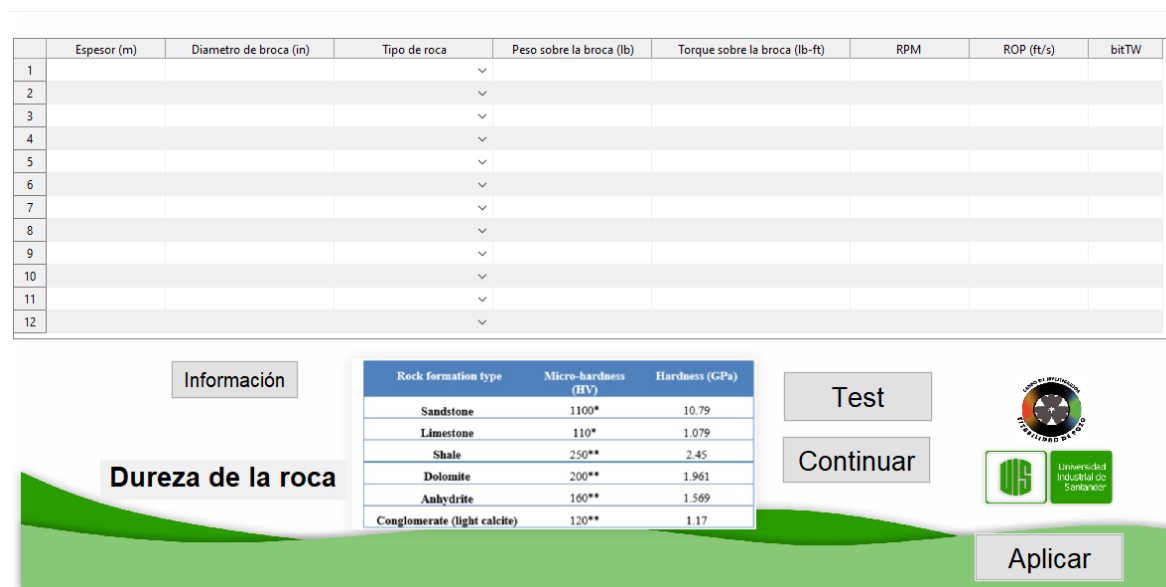


Ilustración 26 Panel MSE

Para fines educativos se proporcionó un botón denominado “test” el cual llena con datos extraídos de la literatura la tabla principal del módulo y poder probar la herramienta; en la interfaz se agrega la tabla de dureza de roca y un botón de información que brinda los detalles de cada variable. Al hacer clic en continuar se observa la siguiente pantalla

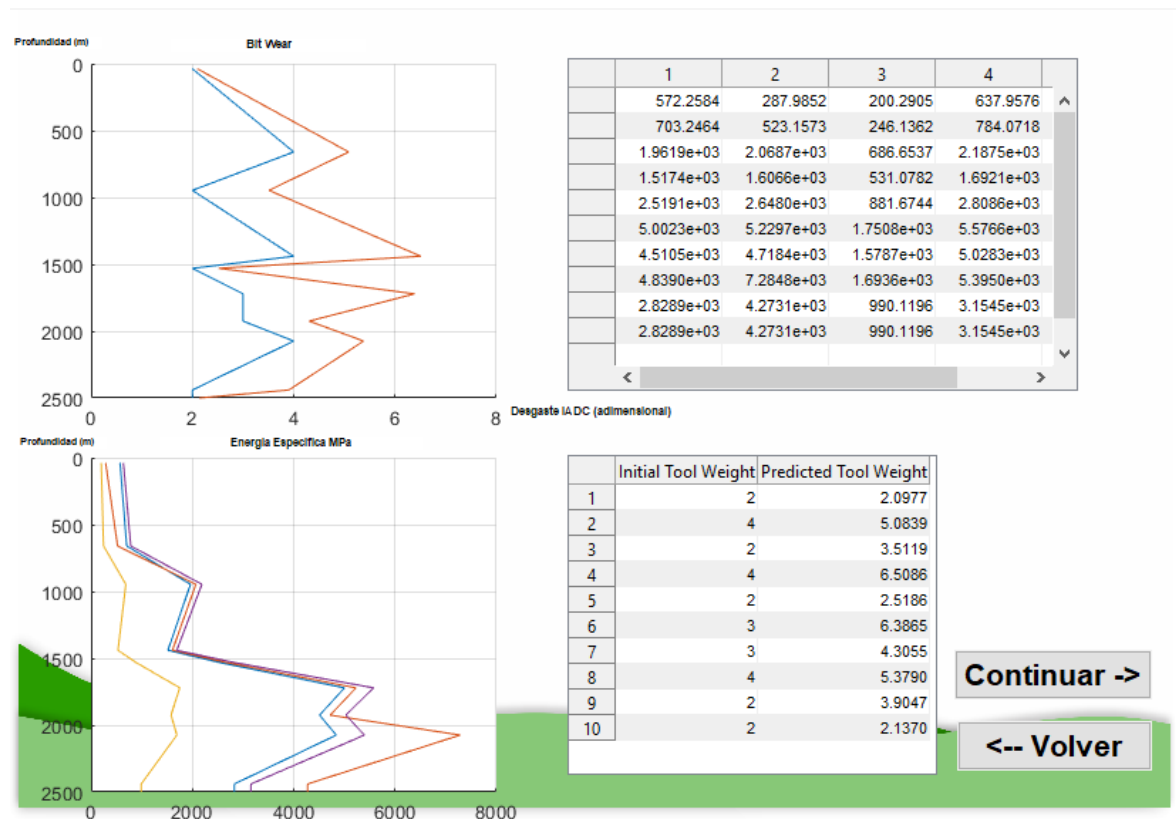


Ilustración 27 Resultados MSE

Aquí se observan los resultados de la simulación del desgaste de la broca, y los modelos que se usaron para el cálculo de la energía mecánica específica; adicional existe la opción de agregar el desgaste IADC manualmente y agregarlo a la gráfica con la opción de “redibujar”. También se puede volver a la tabla anterior y modificar los datos de entrada. Por último, pulsando en continuar encontramos el módulo de análisis de la rata de penetración.

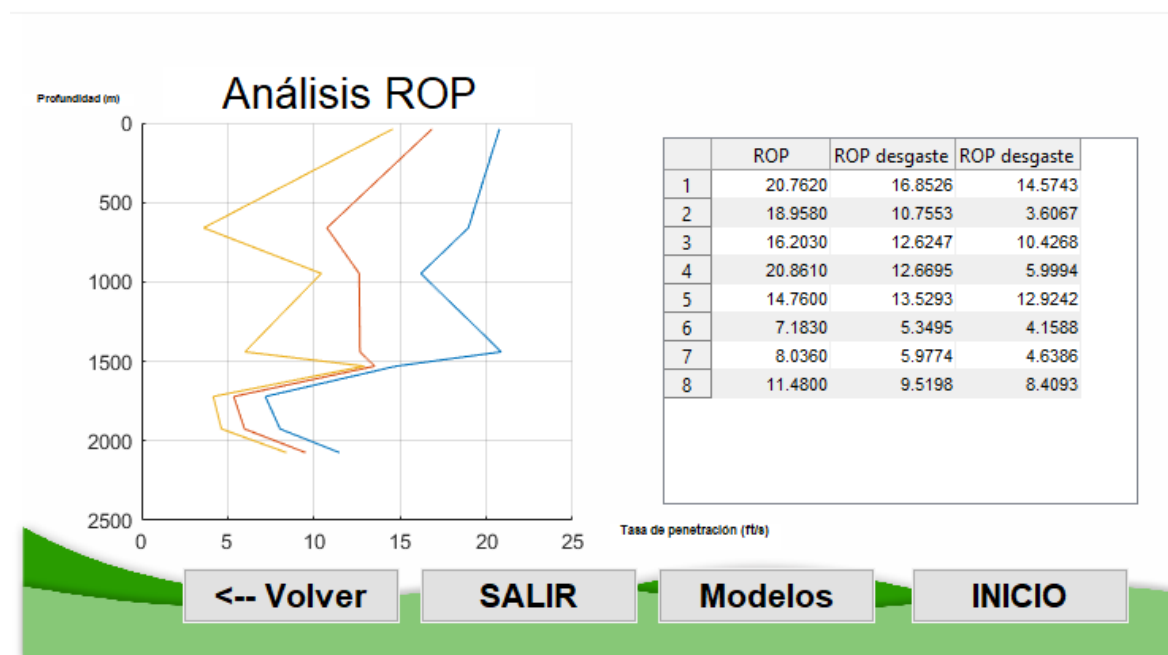


Ilustración 28 Análisis ROP

En esta última pestaña de análisis se muestra la influencia de la tasa de penetración sobre el desgaste de la broca, concluyendo que la optimización, control y seguimiento de los parámetros sobre la broca proporciona un avance gigante en la velocidad y el tiempo de perforación de un pozo petrolero.

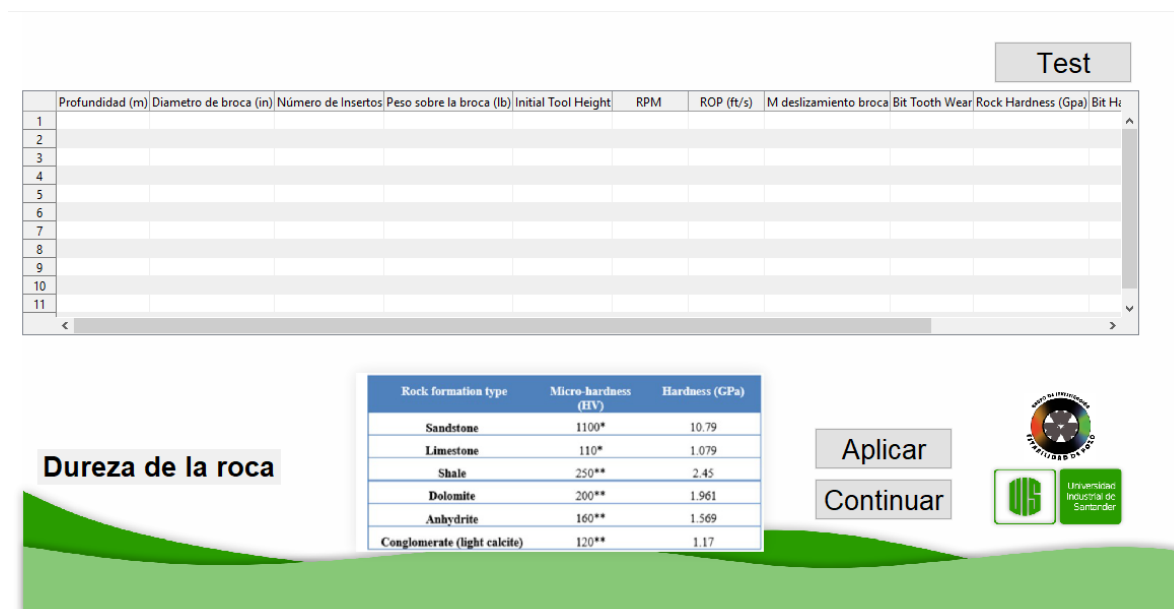
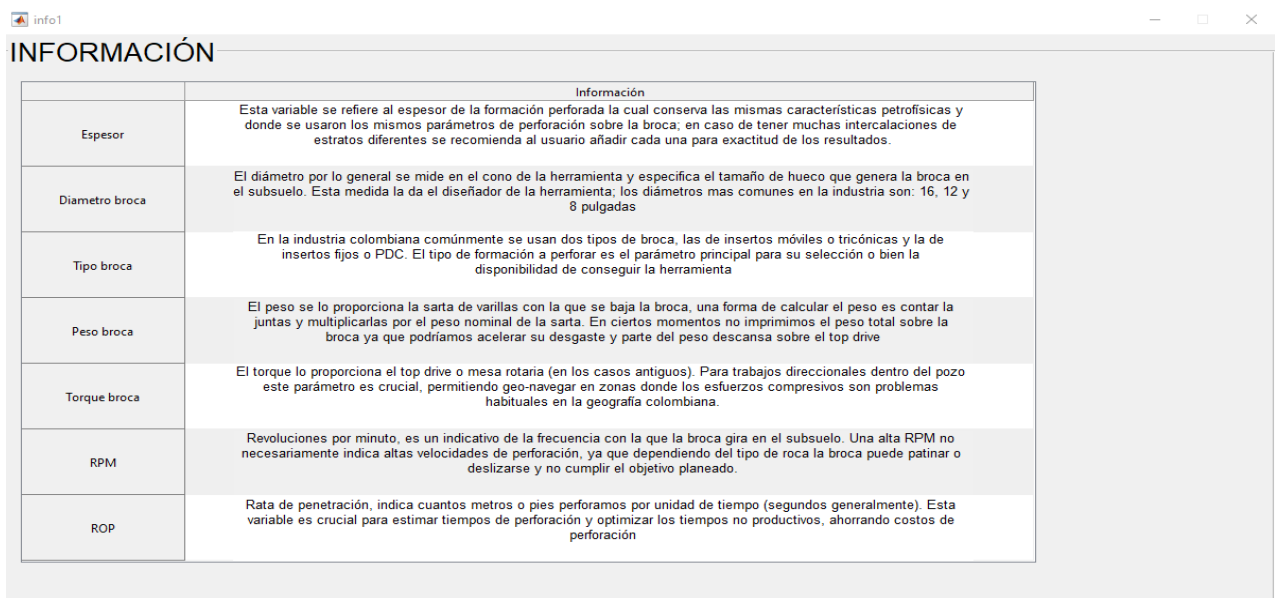


Ilustración 29 Panel abrasión a tres cuerpos

El módulo de abrasión a tres cuerpos posee la misma estructura que MSE, la única variable nueva es la dureza de la broca. Posteriormente salen las gráficas de los resultados y luego se direcciona al módulo de análisis repitiendo el mismo proceso. Adicionalmente se agrega una ventana de información, donde se especifica cada variable que representa y la debida forma de llenar la tabla.



	Información
Espesor	Esta variable se refiere al espesor de la formación perforada la cual conserva las mismas características petrofísicas y donde se usaron los mismos parámetros de perforación sobre la broca; en caso de tener muchas intercalaciones de estratos diferentes se recomienda al usuario añadir cada una para exactitud de los resultados.
Diámetro broca	El diámetro por lo general se mide en el cono de la herramienta y especifica el tamaño de hueco que genera la broca en el subsuelo. Esta medida la da el diseñador de la herramienta; los diámetros mas comunes en la industria son: 16, 12 y 8 pulgadas
Tipo broca	En la industria colombiana comúnmente se usan dos tipos de broca, las de insertos móviles o tricónicas y la de insertos fijos o PDC. El tipo de formación a perforar es el parámetro principal para su selección o bien la disponibilidad de conseguir la herramienta
Peso broca	El peso se lo proporciona la sarta de varillas con la que se baja la broca, una forma de calcular el peso es contar la juntas y multiplicarlas por el peso nominal de la sarta. En ciertos momentos no imprimimos el peso total sobre la broca ya que podríamos acelerar su desgaste y parte del peso descansa sobre el top drive
Torque broca	El torque lo proporciona el top drive o mesa rotaria (en los casos antiguos). Para trabajos direccionales dentro del pozo este parámetro es crucial, permitiendo geo-navegar en zonas donde los esfuerzos compresivos son problemas habituales en la geografía colombiana.
RPM	Revoluciones por minuto, es un indicativo de la frecuencia con la que la broca gira en el subsuelo. Una alta RPM no necesariamente indica altas velocidades de perforación, ya que dependiendo del tipo de roca la broca puede patinar o deslizarse y no cumplir el objetivo planeado.
ROP	Rata de penetración, indica cuantos metros o pies perforamos por unidad de tiempo (segundos generalmente). Esta variable es crucial para estimar tiempos de perforación y optimizar los tiempos no productivos, ahorrando costos de perforación

Ilustración 30 Información Variables