

**METODOLOGÍA PARA OPTIMIZACIÓN DE OPERACIONES DE
PERFORACIÓN MEDIANTE EL ANÁLISIS DE PARÁMETROS**

**MANUEL ANTONIO GONZALEZ PERALTA
GABRIEL REYNALDO NOGUERA LASTRA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2018

**METODOLOGÍA PARA OPTIMIZACIÓN DE OPERACIONES DE
PERFORACIÓN MEDIANTE EL ANÁLISIS DE PARÁMETROS**

**MANUEL ANTONIO GONZALEZ PERALTA
GABRIEL REYNALDO NOGUERA LASTRA**

Trabajo de grado para optar al título de Ingenieros de Petróleos

Director

Ing de Petróleo, Master en Diseño, Gestión y Dirección de Proyectos

Wilson Raúl Carreño Velasco

Codirector

Ing de Petróleo Ferney Marcelo Bohórquez Bacca

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2018

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a ese selecto grupo de personas que siempre han seguido en mi vida pase lo que pase, a mi madre y mi hermano porque nunca me han dado la espalda, a mis tíos Jose Luis y Rebeca por ser un ejemplo a seguir, a los roleros por forjar mi carácter y aguantarme, y en especial a 3 personajes a los que la palabra amigo les queda corta: Jose, Fab y Fercho.

Manuel

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a toda la gente que me apoyó en cada instante de mi carrera, mi familia y en especial mis padres que nunca dejaron de creer en mí. Nunca dejes de creer.

Gabriel

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecerle en primera instancia a la Universidad Industrial de Santander por permitirnos ser parte de ella y forjar nuestro camino como profesionales. Al Ingeniero Wilson Raúl Carreño Velasco por creer en nosotros y permitirnos llevar a cabo este proyecto bajo su supervisión y recomendaciones. Y en especial al Ingeniero Ferney Marcelo Bohórquez Bacca, quien no solo nos brindó sus conocimientos y su tiempo, sino también consejos, paciencia y experiencia, fue más allá de su papel de orientador y se convirtió en una mano amiga con la que podíamos contar incondicionalmente para cualquier adversidad y a cualquier momento, por todo esto y mucho más... Gracias Totales!!!

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	22
1. FORMACIÓN LEÓN	24
2. REQUERIMIENTOS PARA EL DESARROLLO DE LA PERFORACIÓN	28
2.1 PROCESO DE CONSULTA PREVIA	28
2.1.1 Obtención de licencia ambiental.	29
2.1.2 Explicación clara del proyecto a la comunidad más próxima del área de influencia.....	29
2.1.3 Permiso de servidumbre.	30
2.2 PROCESO DE PERFORACIÓN EXPLORATORIA	30
2.2.1 Adecuación del terreno.	30
2.2.2 Perforación.....	30
2.2.3 Tratamiento de lodo.	30
2.2.4 Tratamiento del agua.	30
2.2.5 Abandono del pozo.	31
2.2.6 Abandono de la zona de campaña.	31

3. PARAMETROS OPERACIONALES	32
3.1 TORQUE (TQ)	32
3.1.1 Torque irregular.	33
3.1.2 Decrecimiento en el torque.	33
3.1.3 Equipo de medición del torque.....	33
3.2 VELOCIDAD DE ROTACIÓN (RPM)	35
3.2.1 Equipo para medir y controlar la rotación.....	37
3.3 PESO SOBRE LA BROCA (WOB)	38
3.3.1 Equipo para medir el peso sobre la broca.....	39
3.4 TASA DE PENETRACIÓN.....	41
3.4.1 Equipo para medir la tasa de penetración.....	41
3.5 PARÁMETROS MECÁNICOS DE LA ROCA RELACIONADOS CON LA PERFORACIÓN DE POZOS	42
3.5.1. Esfuerzos.	42
3.5.1.1 Esfuerzos de Tensión.	43
3.5.1.1.1 Esfuerzos de Compresión.....	44
3.5.1.1.2 Esfuerzos de Tracción.	44
3.5.1.2 Esfuerzos de corte.	44
3.5.2 Propiedades mecánicas de las rocas.	45
3.5.2.1 Elásticas.....	45
3.5.2.2 Resistencias.....	46
3.5.2.2.1 Resistencia Compresiva no Confinada de la roca (UCS).....	46
3.5.2.2.2 Resistencia Compresiva Confinada de la roca (CCS).....	56

4. ENERGÍA MECÁNICA ESPECÍFICA (MSE).....	59
4.1 TEORÍA DE LA ENERGÍA MECÁNICA ESPECÍFICA (MSE)	60
4.1.1 Ecuación de Teale.	60
4.1.1.1 Análisis dimensional.....	62
4.1.1.2 Sistema de unidades.....	63
4.1.2 Ecuación de Koederitz.	63
4.1.3 Diferencia entre curvas de MSE.	64
4.2 EFICIENCIA MECÁNICA (EFFM).....	65
4.3 CORRELACIÓN DE LA RESISTENCIA COMPRESIVA NO CONFINADA DE LA ROCA (UCS) Y LA RESISTENCIA COMPRESIVA CONFINADA DE LA ROCA (CCS)	69
4.4. PRUEBAS DE PERFORABILIDAD (DRILL-OFF-TESTS)	72
4.4.1. Procedimiento para la prueba de perforabilidad.	72
5. METODOLOGÍA DE DESARROLLO DE LA APLICACIÓN SOFTWARE	77
5.1 LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN UTILIZADO.....	78
5.2 DISEÑO DE LA APLICACIÓN.....	79

5.3 PRESENTACIÓN DE LA APLICACIÓN	79
5.3.1 Interfaz principal.....	80
5.3.2 Segunda interfaz.....	82
5.3.3 Tercera interfaz.....	83
5.3.4 Interfaz principal-Tercera fase.	84
5.3.5 Cuarta interfaz.	86
5.3.6 Opciones adicionales.....	87
6. METODOLOGÍA APLICADA A LA OPTIMIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE PERFORACIÓN A PARTIR DEL CONCEPTO DE LA ENERGÍA MECÁNICA ESPECÍFICA (MSE)	88
6.1 CALIDAD DE DATOS DE LOS SISTEMAS DE ADQUISICIÓN DE LOS TALADROS.....	89
6.1.1 Torque.....	89
6.1.1.1 Eléctricos.	89
6.1.1.2 Hidráulicos.	90
6.1.2 RPM.....	91
6.1.3 WOB.	91
6.1.4 ROP.....	92
6.2 CÁLCULO DE LA ENERGÍA MECÁNICA ESPECÍFICA (MSE)	93
6.2.1 Ejemplo de cálculo de la energía mecánica específica (MSE).	94
6.3 CÁLCULO DE LA EFICIENCIA MECÁNICA (<i>EFFm</i>).....	102
6.3.1 Ejemplo de cálculo de la eficiencia mecánica (<i>EFFm</i>).....	102

6.4 ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS RECOMENDADOS.....	106
6.4.1 Ejemplo de cálculo del nuevo rpm.	107
6.5 ESTIMACIÓN DE LA OPTIMIZACION ALCANZADA.....	111
6.5.1 Ejemplo de cálculo de la optimización alcanzada.....	111
6.6 MONITOREO EN LA OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DE PERFORACIÓN MEDIANTE EL MSE	113
6.6.1 Aplicación de las Drill Off Tests.	118
7. CONCLUSIONES.....	121
8. RECOMENDACIONES.....	124
BIBLIOGRAFÍA.....	126

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Cuenca de los llanos orientales.	24
Figura 2. Núcleos de la formación León.	27
Figura 3. Pinza de Torque	34
Figura 4. Torque vs Amperaje.....	35
Figura 5. Rata de penetración vs velocidad de rotación.	36
Figura 6. Rata de penetración vs peso sobre la broca.....	38
Figura 7. Celda de carga o Celda panqueque.	40
Figura 8. Esfuerzo.....	42
Figura 9. Esfuerzo y las medidas de deformación.	43
Figura 10. Principales tensiones en la pared del pozo.....	44

Figura 11. Resistencia Compresiva no confinada de la roca (UCS).	47
Figura 12. Discontinuidades de la roca y prueba de compresión.	48
Figura 13. Anisotropía intrínseca o litológica (a) y producida por esfuerzos (b). ...	50
Figura 14. Resistencia Compresiva Confinada de la roca (CCS).	56
Figura 15. Ángulo de Fricción Interna.	57
Figura 16. Envoltentes típicas de ruptura.....	58
Figura 17. Diferencia entre curvas de MSE.	64
Figura 18. Componentes de la ecuación de energía mecánica específica.	65
Figura 19. Comparación entre la medida de fondo y superficie para MSE.	66
Figura 20. Relación entre la profundidad de corte (DOC) y la eficiencia mecánica.	68
Figura 21. Tasa de penetración (ROP) vs. Peso sobre la broca (WOB).....	74
Figura 22. Ciclo de desarrollo de la plantilla.....	77

Figura 23. Ciclo de retroalimentación.	78
Figura 24. Interfaz principal de MSE_Optimizer.....	80
Figura 25. Interfaz principal de MSE_Optimizer, segunda fase.	82
Figura 26. Segunda interfaz de MSE_Optimizer.....	83
Figura 27. Tercera interfaz de MSE_Optimizer.....	84
Figura 28. Interfaz principal de MSE_Optimizer, tercera fase.....	85
Figura 29. Cuarta interfaz de MSE_Optimizer.....	86
Figura 30. Diagrama de la metodología.	88
Figura 31. MSE y Parámetros - POZO (O1).	96
Figura 32. MSE y Parámetros - POZO (O2).	97
Figura 33. MSE y Parámetros - POZO (O3).	98
Figura 34. MSE y Parámetros - POZO (O4).	99
Figura 35. MSE y Parámetros - POZO (O5)	100

Figura 36. MSE y Parámetros - POZO (O6).	101
Figura 37. <i>EFFm</i> POZO (O1, O2, O3).	104
Figura 38. <i>EFFm</i> POZO (O4, O5, O6).	105
Figura 39. RPM POZO (O1, O2, O3).	109
Figura 40. RPM POZO (O4, O5, O6).	110
Figura 41. Prueba de Drill-Off-Test	114
Figura 42. Drill off Tests (3 Regiones)	115
Figura 43 Algunos causantes del Founder Point	117
Figura 44. Histograma Campo Académico pozo O1	119

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Valores de la relación de tiempo de tránsito de cizallamiento y tiempo de tránsito de la onda compresional, para diferentes tipos de rocas.	51
Tabla 2. Parámetros de perforación y MSE reales.	95
Tabla 3. Porcentaje de Optimización. Campo Académico, Pozo (O1, O2, O3, O4, O5, O6).	112

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Data real del campo académico.....	129

RESUMEN

TÍTULO: METODOLOGÍA PARA OPTIMIZACIÓN DE OPERACIONES DE PERFORACIÓN MEDIANTE EL ANÁLISIS DE PARÁMETROS.*

AUTORES: MANUEL ANTONIO GONZALEZ PERALTA, GABRIEL REYNALDO NOGUERA LASTRA.**

PALABRAS CLAVE: PERFORACION, PARAMETROS OPERACIONALES, EQUIPOS DE PERFORACIÓN, COMPRESIBILIDAD DE LA ROCA CONFINADA, ENERGIA MECANICA ESPECIFICA, EFICIENCIA MECANICA, PRUEBAS DE PERFORABILIDAD, OPTIMIZACION.

DESCRIPCIÓN:

Los gastos asociados a la perforación, en comparación al ingreso que se recibe (nulo) son bastantes elevados, se puede encontrar en la literatura que es el 30% del gasto total de un pozo, razón por la cual es de suma importancia optimizar la perforación con parámetros que permitan un mejor desempeño de la operación.

Después de la crisis vivida durante los últimos años, la industria petrolera evidenció la necesidad de comenzar a desarrollar proyectos que permitan optimizar y simplificar procesos ya estandarizados, esto con el fin de buscar el mayor ahorro posible, y de esta forma conseguir que sus operaciones sigan siendo económicamente rentables incluso durante las próximas crisis.

Para el presente proyecto, mediante programación en Visual Basic, se analizaron y escogieron los parámetros de perforación que el ingeniero puede variar, permitiendo obtener un mayor logro en cuanto a eficiencia se refiere, atrayendo así más expectativas a futuro para los inversionistas.

Dichos parámetros a variar son: peso sobre la broca y velocidad de rotación de la broca, los cuales, de manera comprobada y medida, están relacionados con la velocidad de penetración. Con dicha información y la obtenida de las perforaciones en el Campo Académico, se alteran de manera controlada y congruente en pro de garantizar el buen funcionamiento y practicidad de toda la operación de perforación

* Trabajo de grado.

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Ing-Msc Wilson Raúl Carreño Velasco. Codirector Ing. Ferney Marcelo Bohórquez Bacca

ABSTRACT

TITLE: METHODOLOGY FOR OPTIMIZING PERFORATION OPERATIONS THROUGH THE PARAMETER ANALYSIS *

AUTHORS: MANUEL ANTONIO GONZALEZ PERALTA, GABRIEL REYNALDO NOGUERA LASTRA.**

KEY WORDS. PERFORATION, OPERATIONAL PARAMETERS, DRILLING EQUIPMENT, COMPRESSIBILITY OF THE CONFINED ROCK, MECHANICAL SPECIFIC ENERGY, MECHANICAL EFFICIENCY, DRILL OFF TESTS, OPTIMIZATION.

DESCRIPTION:

The expenses related to drilling, in comparison to the revenues that it may receive (null), are very high. According to the literature it could be up to 30% of the total expense in an oil well, this is why it's really important to improve the drilling by using parameters that may enhance the performance in the operation.

After the crisis experienced in recent years, the oil industry showed the need to start developing projects to optimize and simplify processes already standardized, this in order to find the greatest possible savings, and in this way get their operations continue being economically profitable even during the next crises.

For the present project, through programming in Visual Basic, the parameters of drilling that the engineer could vary were analyzed and chosen, allowing for greater achievement in terms of efficiency, thus attracting more expectations for the future for investors.

Such modifiable parameters are: weight on the bit and speed of rotation of the bit, which, in a tested and measured way, are related with the speed of penetration. With such information and the ones obtained from the drilling in the Academic Field, are altered in a controlled and congruent way, which objective is to guarantee the good performance and practicality of the entire drilling operation.

* Bachelor Degree Project.

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Ing-Msc. Wilson Raúl Carreño Velasco. Codirector Ing. Ferney Marcelo Bohórquez Bacca

INTRODUCCIÓN

La optimización de una perforación singular o grupal en un campo debe entenderse como la disminución de tiempo y por ende de dinero en el proyecto, lo que es un cambio significativo, ya que, aproximadamente el 30% de inversión en un campo (exploración, desarrollo y extracción) corresponde a la misma¹, lo cual infiere el hecho de la gran importancia del presente proyecto.

Disminuir el tiempo de perforación es menester para disminuir los gastos asociados a la operación, lo que conlleva a revisar los parámetros que se involucran, los cuales, con referentes bibliográficos e información de ingenieros trabajando en campo, son peso sobre la broca, velocidad de rotación de la broca, torque y velocidad de penetración la cual es la encargada de medir que tan rápido avanza la operación.

Se revisó en la literatura todos los equipos asociados a la perforación, realizando énfasis en el funcionamiento y uso de aquellos asociados a los parámetros ya mencionados, cómo la variación afecta dichas máquinas y la limitante de cada una en su acción.

Se determinó que la mejor manera de disminuir los tiempos de perforación es implementar la mayor cantidad de recursos posibles en la creación del hueco, y para

¹La inversión en energías renovables, María Recalde, 2011.

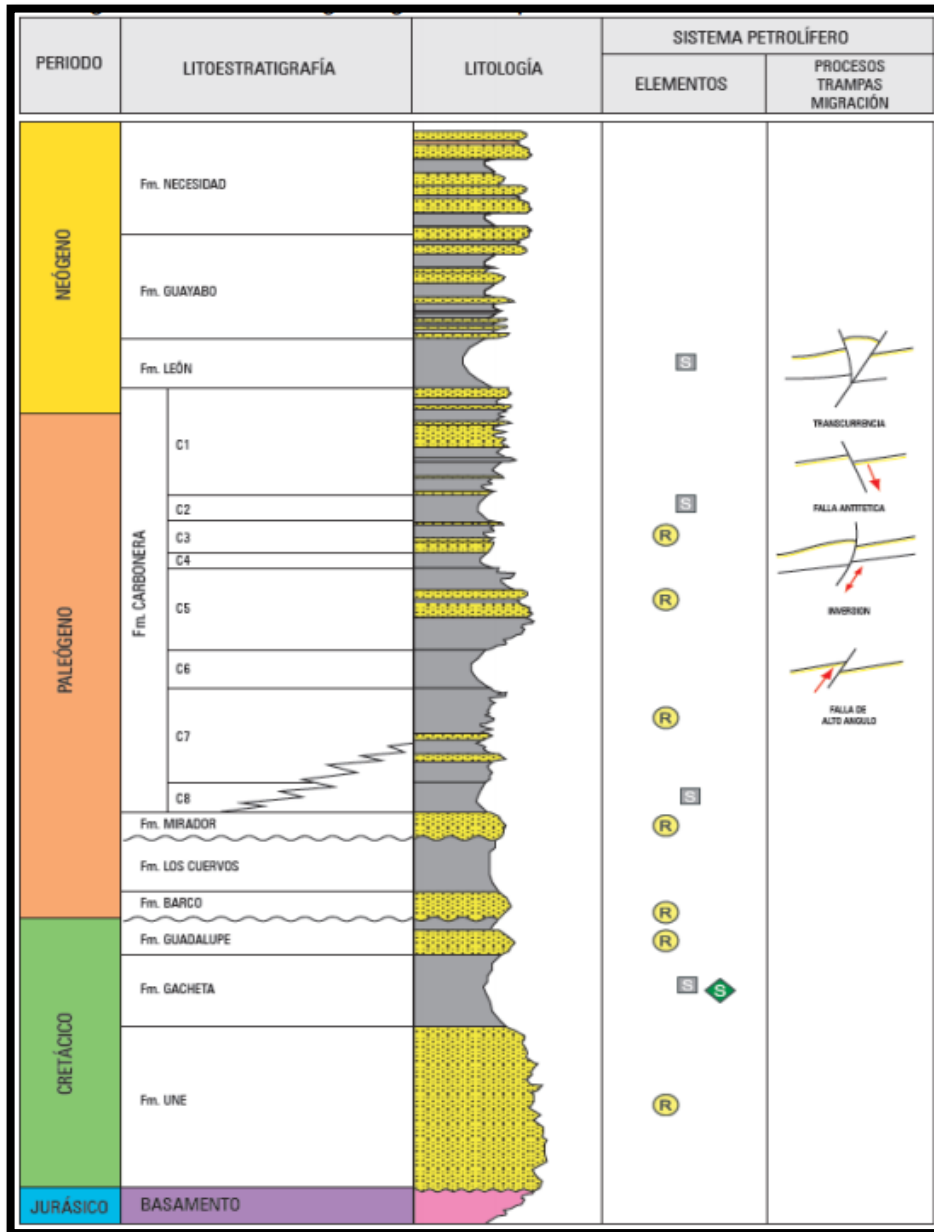
la medición de estos recursos se utilizó el concepto de Energía Mecánica Específica (MSE).

Mediante el lenguaje de programación Visual Basic, se creó una herramienta Software llamada "MSE_Optimizer", la cual es capaz de medir la energía mecánica específica utilizada en cada pie de la perforación, y a su vez es capaz de evaluar que tan eficiente fueron aprovechados los recursos energéticos en la creación directa del hueco, también nos permite hacer un análisis visual para determinar las zonas donde se utilizaron parámetros poco óptimos, lo que conllevó a un menor aprovechamiento de los recursos.

Por último, con la información previa de perforaciones ya realizadas en la zona, la herramienta nos permite recalcular los parámetros que debieron utilizarse para maximizar el aprovechamiento energético, y con esta información poder diseñar futuras operaciones de perforación más eficientes.

1. FORMACIÓN LEÓN

Figura 1. Cuenca de los llanos orientales.



Fuente: Pacific. capítulo 5. caracterización del área de influencia 5.1 medio abiótico – geología estudio de impacto ambiental área de perforación exploratoria llanos-83. 2016. p. 4.

Debido a que lo que buscamos con la realización de esta tesis es la creación de una metodología, decidimos exponer los ejemplos aplicados a la formación León, ya que de todos los datos reales de operaciones con los que contábamos, esta formación nos pareció la más homogénea y consistente, y por consecuencia los resultados arrojados serán de más fácil entendimiento para el lector, todo esto hace imperativo conocer un poco sobre la geología estructural de dicha formación.

El Mioceno, en la base del Neógeno, está representado por rocas ígneas extrusivas, de composición de riolita, riodacita, andesita y basalto, con geoformas de mesetas, conos, sierras aisladas y longitudinales. Estas rocas presentan una fase de deformación frágil con estructuras de fallas normales de orientación este-oeste².

En el Mioceno medio, el aumento global del nivel del mar coincidió con la primera deformación significativa y levantamiento en la Cordillera Oriental, y por lo tanto con un significativo evento de carga, que tectónicamente mejoró el relativo aumento del nivel del mar y el tracto de sistema de mar alto, resultando arcillolitas y lutitas de la Formación León.

Evidencia del surgimiento parcial de la Cordillera Oriental es que la Formación León se hace más arenosa en la parte occidental del piedemonte, lo que sugiere que había un suministro de clásticos gruesos derivados de la parte oeste. El episodio final de deposición en la cuenca Llanos Orientales son unos 3.000 m de clásticos continentales gruesos que conforman la Formación Guayabo de 10 a 2 millones de años (Ma). Esta última fase de deposición marca el levantamiento de la Cordillera Oriental inmediatamente al oeste del piedemonte y la migración del eje de cuenca de antepaís a la ubicación actual del piedemonte de la Cordillera Oriental. La deposición de esta unidad molásica causó etapa de enterramiento tardío de la

²Duque, Ana. Mantilla, Carlos. López, Jannethe. Rodríguez, Johana. Gómez, Napoleón. Cock, Víctor. Bolívar, Lorena. Buenas prácticas en consulta previa. 2013, p 16.

sección estratigráfica del Cretáceo Superior - Terciario inferior en el piedemonte y en la cuenca Llanos Orientales.

La formación León está compuesta casi en su totalidad de arcillas pizarrosas de color gris a gris verdoso que presentan horizontes limolíticos hacia la parte baja y alta de la misma. El contacto inferior de la Formación es normal y se marca donde ocurre el cambio de las arcillas pizarrosas puras de esta Formación a los sedimentos más arenosos de la Formación Carbonera. El espesor tiene un promedio de 545 m habiéndose observado espesores mayores más al norte en donde la Formación se vuelve más arenosa. Es el sello regional de la cuenca³.

Esta formación no se dividió en segmentos debido a la homogeneidad de sus litofacies, aunque es posible distinguir algunos cambios en los patrones de la laminación que permitirían subdividir esta unidad. Su contacto inferior es transicional Figura 2. (a) Esta unidad es una secuencia homogénea de lodolita.

Laminadas verde claras, ocasionalmente verde oscuras y macizas, hacia la base gris verdosas y hacia el tope verde amarillentas Figura 2. (b). En los intervalos laminados son comunes los rasgos de bioperturbación vertical, horizontal y oblicua, algunos restos de material carbonoso y restos de fósiles, la mayoría de bivalvos. En los intervalos macizos, son comunes los peds y los nódulos de siderita. En la parte superior de la sucesión comienza a ganar gradualmente láminas arenosas e incrementa la bioperturbación.

³Duque, Ana. Mantilla, Carlos. López, Jannethe. Rodríguez, Johana. Gómez, Napoleón. Cock, Víctor. Bolívar, Lorena. Buenas prácticas en consulta previa. 2013, p 16.

Figura 2. Núcleos de la formación León.



Fuente: German Bedoya, Andrés Valencia, Milton Rueda, Johan Ortiz & Omar Montenegro. Estratigrafía y procedencia de las rocas del Mioceno en la parte distal de la cuenca antepais de los Llanos de Colombia. En: Gestiún. Diciembre, 2008, vol. 1. no.2., p. 34.

2. REQUERIMIENTOS PARA EL DESARROLLO DE LA PERFORACIÓN

Para el desarrollo de la perforación, se requiere, entre otras cosas un permiso ambiental (licencia ambiental), descripción clara a la comunidad más próxima del área de influencia, entre otras, las cuales se explican a continuación.

2.1 PROCESO DE CONSULTA PREVIA

El proceso de consulta previa se lleva a cabo en varias fases, entendiéndose por ello las reuniones ejecutadas, en las cuales se tienen en cuentas los siguientes ítems⁴:

- Documentarse sobre la zona geográfica y los municipios donde se desarrollará el proyecto y el proceso de Consulta Previa. Visitar y consultar la Secretaría de Gobierno del Municipio.
- Revisar antecedentes de otros proyectos en la zona y con el grupo étnico.
- Identificar pasivos ambientales existentes.
- Recoger información secundaria sobre el grupo étnico con el que se va a establecer la relación: revisar temas como territorio, organización, costumbres, autoridades, entre otros.
- Conformar un equipo interdisciplinario (social, ambiental, tierras) para atender el proceso de consulta.
- Brindar entrenamiento al equipo sobre grupos étnicos y Consulta Previa.
- Involucrar al contratista desde esta fase.

⁴Duque, Ana. Mantilla, Carlos. López, Jannethe. Rodríguez, Johana. Gómez, Napoleón. Cock, Víctor. Bolívar, Lorena. Buenas prácticas en consulta previa. 2013, p 16.

Es importante aclarar que, en cada etapa realizada, se debe tomar asistencia, nota de la información debatida, fotografías, videos y un acta de constancia de la misma.

2.1.1 Obtención de licencia ambiental. Según el decreto 2041 del 2014, en el título IV (trámite para la obtención de la licencia ambiental), se siguen estas obligaciones:

- Diagnóstico ambiental de alternativa (DAA).
- Formulario único de licencia ambiental.
- Según la resolución 1415 del 2012, plano que soporte el estudio de impacto ambiental (EIA).
- costo presupuestado para la inversión y operación del proyecto.
- Constancia de pago para la prestación del servicio de evaluación de la licencia ambiental.
- Certificado o documento del representante legal o ente jurídico.
- Certificado solicitado al ministerio del interior sobre presencia de grupos étnicos y existencia de grupos colectivos.
- Según la ley 1185 del 2008, Copia de la radicación del documento exigido por el Instituto Colombiano de Antropología e Historia (ICANH).
- Formato aprobado por la autoridad ambiental competente.
- Certificación de la Unidad Administrativa Especial de Gestión de Tierras Despojadas.

2.1.2 Explicación clara del proyecto a la comunidad más próxima del área de influencia. Ya realizados los procesos anteriores, es de suma importancia la explicación del objetivo, alcance y tiempo del proyecto, en las cuales se mencionen todo lo encontrado en el estudio de impacto ambiental, los impactos, tanto positivos como negativos, las zonas que se verán afectadas, la importancia económica en la zona y respuestas a las dudas que la comunidad interpreten.

2.1.3 Permiso de servidumbre. Para la utilización de tierras de terceros, es importante un activo o compensación por el uso de la misma, pero es claro que ello se puede realizar de dos maneras, comprando o alquilando, en lo cual este último se entiende como permiso de servidumbre.

2.2 PROCESO DE PERFORACIÓN EXPLORATORIA⁵

Este es el proceso que antecede a la etapa de producción y es finalizando los requerimientos para el desarrollo de perforación, es más técnico y entran factores ingenieriles, a continuación, se describe las etapas.

2.2.1 Adecuación del terreno. En esta etapa, se construyen las piscinas (para el tratamiento del lodo), campamentos (para el hospedaje de los trabajadores) y la instalación del taladro.

2.2.2 Perforación. Se procede a la perforación del pozo a través del taladro, el cual atraviesa las diferentes CAPAS DE ROCAS que se encuentran debajo de la tierra.

2.2.3 Tratamiento de lodo. El proceso de perforación produce recortes de rocas que son llevados a la superficie mediante un sistema de circulación (lodo de perforación) y son depositados en las piscinas de lodos para su tratamiento.

2.2.4 Tratamiento del agua. El agua (doméstica e industrial) utilizada en esta actividad es sometida a un tratamiento de limpieza, antes de ser dispuesta nuevamente en el terreno.

⁵ Ospina Adriana, Zamora José. Cadena productiva de los hidrocarburos. 2008, p 22-27.

2.2.5 Abandono del pozo. Proceso de abandono del pozo: si luego de realizar la perforación del pozo se comprueba que no existen hidrocarburos (petróleo y gas), la compañía procede al taponamiento del pozo según el Decreto 1895 de 1973, expedido por el Ministerio de Minas y Energía.

2.2.6 Abandono de la zona de campaña. Antes de salir de la zona la compañía debe dejar el área en buenas condiciones ambientales, según lo establecido en la licencia ambiental.

3. PARAMETROS OPERACIONALES

Los parámetros operacionales de perforación más sobresalientes y que involucran directamente nuestro modelo de optimización son:

- Torque (TQ).
- Velocidad de Rotación (RPM).
- Peso sobre la Broca (WOB).
- Tasa de Penetración (ROP).

Los cuales se analizarán con gran detalle a continuación.

3.1 TORQUE (TQ)

Se le conoce como torque a la medida del momento de giro aplicado a un eje, provocando que este rote. En perforación, ello es la medida de la resistencia a la rotación de la sarta de perforación en su acción contra las paredes del pozo y además la resistencia de la formación a ser removida por la broca. Es claro que el torque se puede medir fuera de fondo y en fondo⁶ obteniendo torque fuera de fondo y torque en fondo.

- Torque en fondo: Este es el torque en la sarta.
- Torque fuera de fondo. Toque con el que la sarta y la broca perforan la formación.

⁶Lopez Rmiro. Estudio del desempeño y rendimiento de brocas de perforación en el campo shushufindi para optimizar tiempos de perforación mediante la aplicación de la base de datos Phoenix de Halliburton. 2012. p 79-80.

El torque está íntimamente relacionado con la velocidad de rotación y las condiciones del pozo⁷.

Dada las condiciones del pozo (formación blanda o plástica o formación media blanda a lutitas medias) se puede obtener un bajo torque o torque medio respectivamente.

3.1.1 Torque irregular. Esto es un indicativo serio de un posible problema, entre los cuales se encuentra:

- Una broca de calibre inferior.
- formaciones no continuas (diferentes estratos en intervalos de distancia corto).
- Raspadura de los estabilizadores.
- Resto de ripios o desechos en el pozo.
- sobrepeso en la broca.

3.1.2 Decrecimiento en el torque. Esto puede indicar:

- Poco o ninguna optimización en el peso de la broca.
- Una velocidad de rotación sin optimizar.
- Decrecimiento en la inclinación del pozo.
- Cambio de formación.

3.1.3 Equipo de medición del torque. En los sistemas eléctricos, el torque representa la cantidad de corriente que es requerida para manejar la mesa rotaria. Esto es determinado por una simple pinza de torque (Figura 3) que mide el campo magnético inducido alrededor del cable de poder.

⁷Arroyo Andrea. Evaluación técnica de las configuraciones del sistema rotatorio dirigible (GEO-PILOT) de la compañía Halliburton en la cuenca oriente ecuatoriana. 2013. p 108.

Figura 3. Pinza de Torque.



Fuente: Autor.

En las mesas rotarias manejadas mecánicamente, la tensión producida en las cadenas de la rotaria, son los cambios en el torque. Esta tensión es medida con un transductor de presión (el principio es el mismo que con el de la carga del gancho que mide los cambios en la tensión de la línea de perforación).

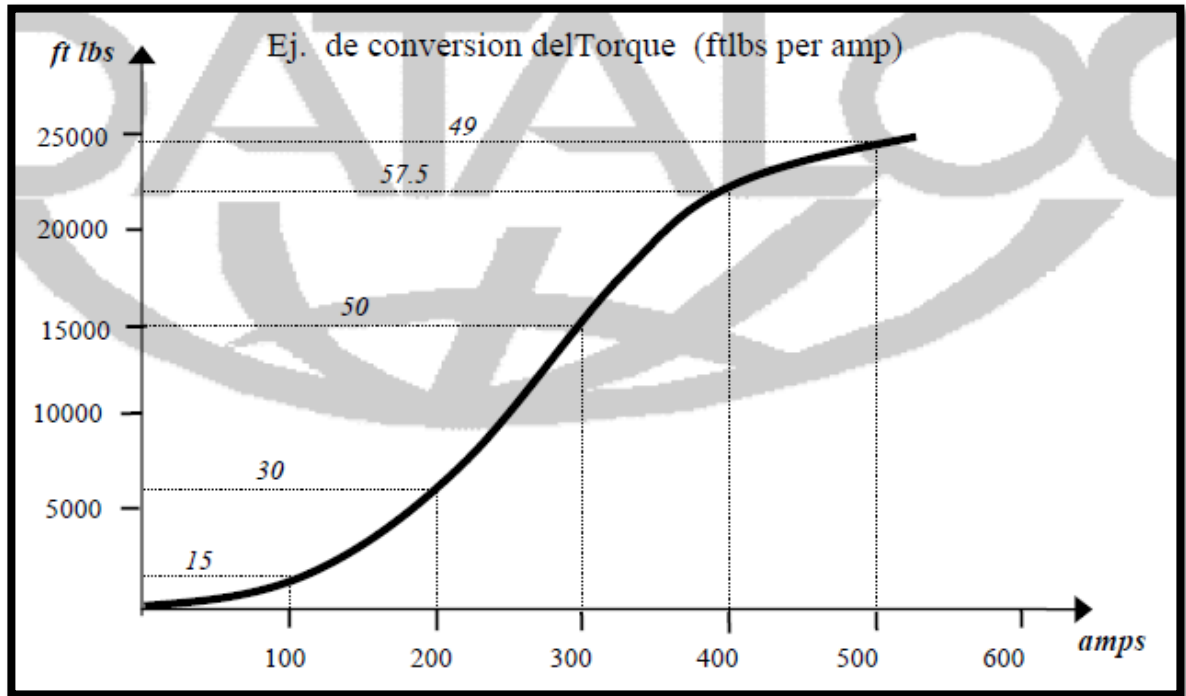
Un traductor de presión normal es todo lo que se requiere para medir el torque en los sistemas que son manejados hidráulicamente.

La unidad de medida del torque de la rotaria es la fuerza que es aplicada contra una distancia movida, por ejemplo, Newton Metro (Nm) o libras por pie (Lbs/ft).

Si una medida eléctrica es la obtenida, el torque puede ser expresado en términos de corriente (Amperios), o puede ser convertida a una unidad de fuerza por distancia. Sin embargo, esta conversión no es lineal, y variara en cada equipo

dependiendo del poder y del equipo de rotación. Una tabla de conversión o gráfico (Figura 4), puede obtenerse del jefe o mecánico del Equipo.

Figura 4. Torque vs Amperaje.



Fuente: Procedimientos y Operaciones en el Pozo. 2001.

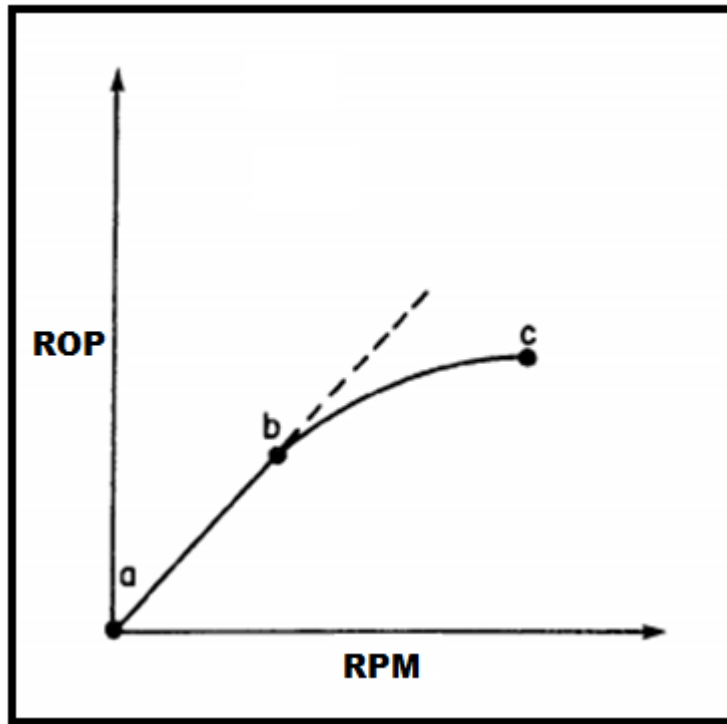
3.2 VELOCIDAD DE ROTACIÓN (RPM)

Es el movimiento rotacional que realiza la broca en un intervalo de tiempo, lo cual involucra que se gire sobre su propio eje. Las vueltas son contadas en un minuto. Es también la velocidad a la cual la mesa rotatoria hace girar la sarta, la cual, a su vez hace girar la broca. Hay una relación entre la rata de penetración y la velocidad de rotación, como se ilustra en la Figura 5.

En la figura se puede apreciar que, a velocidad rotatoria baja, hay un incremento proporcional en la rata de penetración, no obstante, a medida que se llega a

velocidades rotativas altas, la rata de penetración no crece linealmente, sino por debajo de esa proporción, lo que se puede catalogar como un excesivo gasto de energía en comparación a los resultados obtenidos.

Figura 5. Rata de penetración vs velocidad de rotación.



Fuente: Bourgoyne Adam. Chenevert Martin. Millhein Keith. & Young F.S. APPLIED DRILLING ENGINEERING. SPE. VOL.2. 1986. p 226.

Se debe evitar una alta velocidad de rotación en formaciones abrasivas para que no exista un rápido desgaste por abrasión; mientras que velocidades de rotación altas en formaciones duras pueden reducir la tasa de penetración, porque los cortadores no penetran en la formación para seguir cortándola⁸.

⁸Rosero Fernando. & Toscano Jimy. DISEÑO Y OPTIMIZACION DE LA PERFORACION HORIZONTAL EN LAS SECCIONES 8 1/2" Y 6 1/8" CON EL USO DE BROCAS SMITH INTERNATIONAL. 2012. p 55.

3.2.1 Equipo para medir y controlar la rotación. La rotación puede ser aplicada en la broca desde la superficie o desde los motores de turbina en el fondo del hueco. La rotación en superficie puede proporcionarse a través de la mesa rotaria y de la “Kelly”, O a través de piezas de poder o “top drives.

La velocidad de rotación (revoluciones por minuto o RPM) es medida por un sensor de proximidad que detecta un objetivo metálico el cual está atado bien sea a la mesa rotaria, al árbol de leva rotatorio, o en la parte superior del top drive. Un pulso o señal, es producido cuando cada objetivo pasa por el sensor. La rotación aplicada por los motores de fondo o turbinas, depende de la cantidad de flujo que pase a través del motor. Una rata de flujo rápida, producirá más rotación.

Dependiendo del tipo, tamaño y capacidad y tipo de ensamblaje, las brocas tienen rangos específicos de rotación para prolongar la vida de la misma y lograr optima ratas de penetración.

Torque es la mitad de la fuerza necesaria para producir una rotación en la broca y sarta de perforación. Hay una relación directa entre en que el torque aumentara si la velocidad de rotación aumenta. De igual forma una velocidad lenta causara un torque bajo.

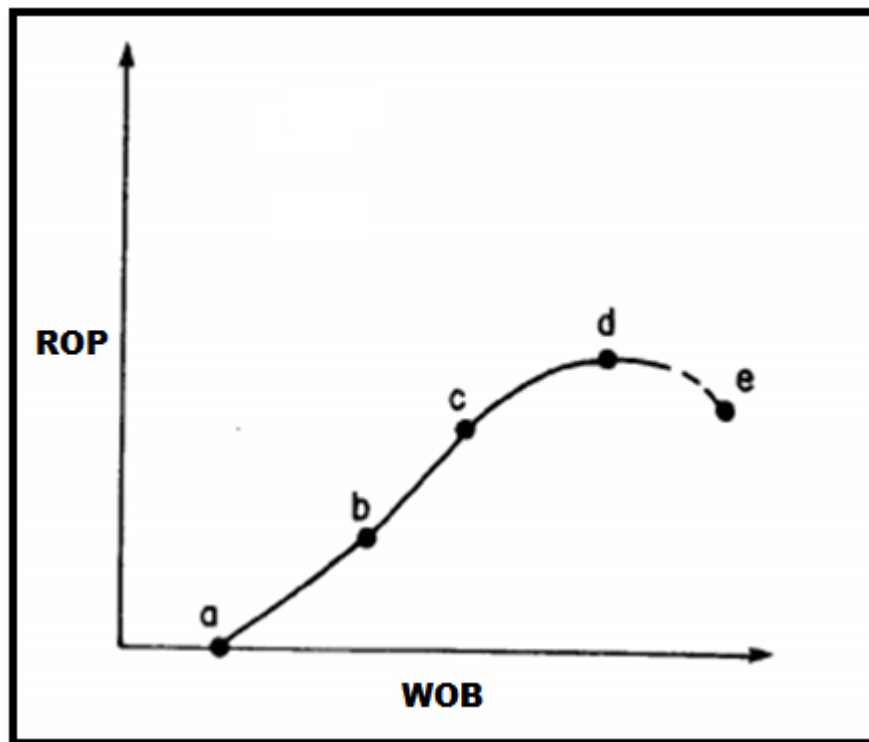
La medida del torque varia, dependiendo del tipo de fuente que maneje el sistema rotatorio. La mesa rotaria puede ser manejada eléctricamente o mecánicamente. Igualmente, los “Top Drive” pueden ser mecánicos o eléctricos como ya lo habíamos mencionado anteriormente.

3.3 PESO SOBRE LA BROCA (WOB)

Se puede definir como la fuerza que se ejerce sobre la broca en fondo debido al peso de la sarta de perforación. Dado la complejidad y resistencia de las formaciones, es obligatorio aplicarle fuerza al extremo (broca), lo que precisamente cumple la sarta.

El efecto del peso sobre la tasa de penetración se ilustra en la Figura 6.

Figura 6. Rata de penetración vs peso sobre la broca.



Fuente: Bourgoyne Adam. Chenevert Martin. Millhein Keith. & Young F.S. APPLIED DRILLING ENGINEERING. SPE. VOL.2. 1986. p 226.

Para pesos insignificantes (antes de a) el peso no tiene relevancia sobre la rata de penetración, para la sección a-b (poco peso) la rata de penetración es directamente proporcional al peso, pero a medida que aumenta el peso sobre la broca (b-d) la

rata de penetración aumenta, pero no linealmente, sino de manera más mesurada, hasta llegar a otro extremo (d-e), en donde el excesivo es contraproducente, disminuyendo la rata de penetración, razón por la cual es indispensable evitar este punto.

3.3.1 Equipo para medir el peso sobre la broca. Conociendo el peso de la sarta de perforación que es soportada por el gancho, el bloque viajero nos permite que determinemos información importante cuando perforamos o corremos tubería. El peso total de la sarta de perforación (BHA y tubería) es conocido como *peso del gancho*.

Esto es fácil de determinar multiplicando la densidad de la tubería con componente Kg/m o lbs/pie, por la longitud de cada sección. Un sensor colocado abrazando el cable de perforación que soporta el bloque viajero y el gancho mide este peso. Esto es conocido como carga del gancho.

Cuando la sarta esta fuera de fondo y sin movimiento, la carga del gancho es igual al peso efectivo de la sarta cuando el bloque soporta todo el peso de la misma. El peso efectivo de la sarta será ligeramente diferente al calculado o teórico pues se debe a un factor de flotación o boyancia en el lodo.

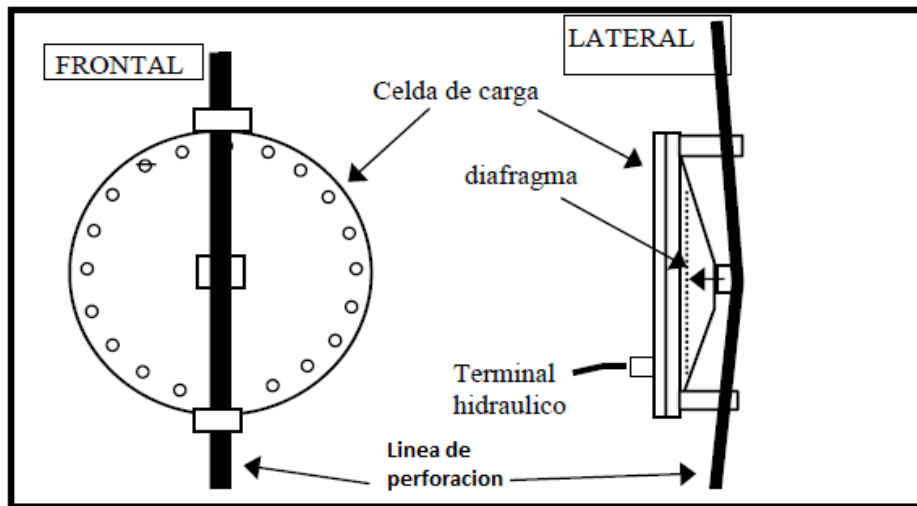
Cuando la broca toca el fondo del hueco, la carga del gancho disminuirá, parte del peso de la sarta se apoyará en el fondo del hueco. Esto es conocido como el peso sobre la broca.

El peso que se transfiere desde el gancho soportado, al fondo del pozo, es controlado por el perforador. Este opera un freno con el cual puede controlar la descarga de la línea del taladro desde el malacate, mientras levanta o baja el bloque y el gancho. Por el descenso del bloque cuando la broca está en fondo, mayor peso

de la sarta será transferida al fondo del hueco, por consiguiente, nosotros veremos un aumento en el peso sobre la broca.

La línea de perforación, o más bien la sección de la línea de perforación entre la corona del taladro y el ancla de la línea muerta es sostenida por la tensión en la celda de carga. Los cambios en la tensión en la línea resultan en una fuerza aplicada en la parte central contra el diafragma, el cual es llenado internamente con un fluido hidráulico. Los cambios en la línea de tensión son transmitidos a un traductor de presión en donde la medida es tomada.

Figura 7. Celda de carga o Celda panqueque.



Fuente: Procedimientos y Operaciones en el Pozo. 2001.

En muchos casos, sin embargo, el equipo tendrá ya una celda de carga (Figura 7) y el sistema hidráulico estará en el lugar para que nosotros podamos conectar nuestro traductor de presión, la manguera hidráulica se conecte directamente al sistema existente.

3.4 TASA DE PENETRACIÓN

Es la medida que mayor relevancia tiene, pues es la que indica la rapidez de la perforación, está relacionada con todos los parámetros mencionados, además de estar muy íntimamente relacionada también con la presión de salida de la broca del fluido de perforación, estructura del pozo (geología), entre otras.

Es la medida de los pies perforados en una hora (ft/hora), este parámetro indica si se debe continuar perforando con la broca o si es necesario cambiarla debido a que su valor no se encuentra dentro del rango adecuado de operación y además dependerá del modo en que se está trabajando (rotando o deslizando).

- ROP neto Es la relación entre el intervalo perforado (ft) y las horas efectivas (hrs) empleadas para perforar dicho intervalo.
- ROP promedio Es la relación entre el intervalo perforado (ft) y las horas promedio (hrs) empleadas para perforar dicho intervalo, las horas promedio incluyen el tiempo de conexión y cualquier otra actividad que tenga un tiempo menor de duración 30 min.

3.4.1 Equipo para medir la tasa de penetración. El sensor en el malacate es de nuevo independiente del sistema del taladro y monitorea el movimiento de los bloques en todo momento. Por lo que tiene todas las ventajas del sensor de profundidad de corona. Así como el sensor de corona monitorea el movimiento de los bloques por la rotación inducida alrededor de la rueda de la polea por la cual pasa el cable de perforación, el sensor del malacate monitorea el movimiento donde termina el cable de perforación en el malacate.

Aquí, el cable de perforación es enrollado alrededor de un tambor que rota controlado por el perforador; para que los bloques sean bajados, el cable tiene que ser liberado del tambor; para levantar los bloques, el tambor tiene que recibir el

cable de perforación. Por la medida de la rotación del tambor, el movimiento vertical de los bloques, ya sea hacia arriba o hacia abajo, puede ser determinado muy exactamente.

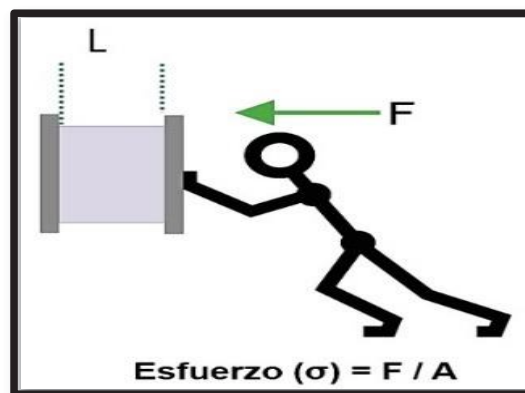
3.5 PARÁMETROS MECÁNICOS DE LA ROCA RELACIONADOS CON LA PERFORACIÓN DE POZOS

3.5.1. Esfuerzos. Esfuerzo es la cantidad de energía que actúa por unidad de superficie en un material sólido, resistiendo la separación, compresión o deslizamiento que tiende a ser producido por fuerzas externas.

La unidad básica del esfuerzo en el sistema internacional es el Pascal (Pa), que es equivalente a un Newton por metro cuadrado (N/m^2). La letra griega “ σ ” se utiliza para designar las componentes del esfuerzo normal.

Para una completa definición sobre esfuerzos es necesario especificar la magnitud, dirección, sentido y superficie en las cuales actúan los esfuerzos; ver Figura 8.

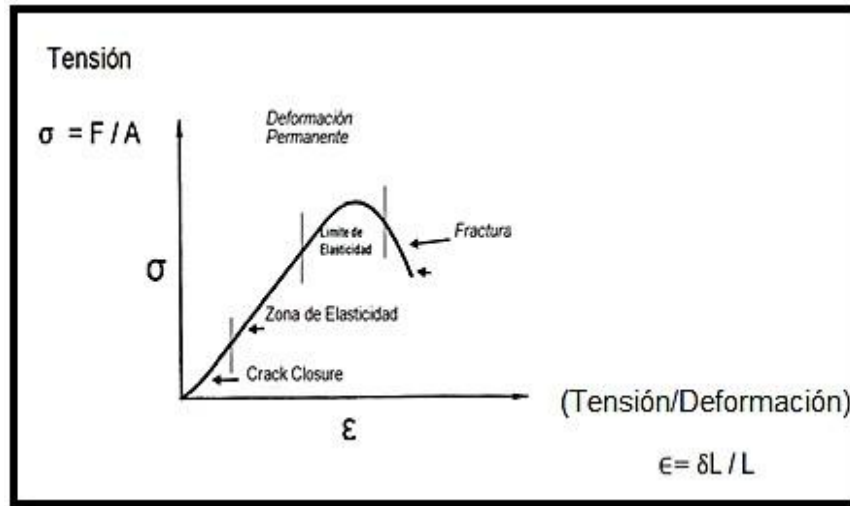
Figura 8. Esfuerzo.



Fuente: Halliburton, Mecánica de Rocas.

Dado que la fuerza es un vector, también lo es el esfuerzo. En mecánica de las rocas se considera que el signo de la fuerza se toma negativo por convenio cuando es compresiva, y positivo cuando es tensional, el esfuerzo compresor es negativo y el tensor es positivo; ver Figura 9.

Figura 9. Esfuerzo y las medidas de deformación.



Fuente: Halliburton, Mecánica de Rocas.

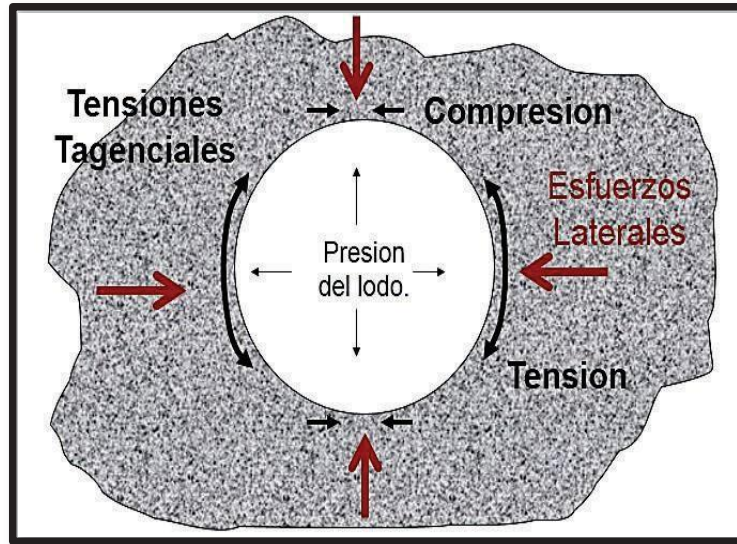
3.5.1.1 Esfuerzos de Tensión. Los esfuerzos de tensión se describen como la fuerza por unidad de área que actúa transversalmente en una superficie de un material sólido, resistiendo la separación (tracción) o la compresión que tienden a ser producidas por fuerzas externas.

La tensión es el esfuerzo principal que causa una falla normal o tiende a crear fracturas en el material.

A su vez este tipo de esfuerzo puede descomponerse en dos tipos; ver Figura 10.

- Esfuerzos de compresión
- Esfuerzos de tracción.

Figura 10. Principales tensiones en la pared del pozo.



Fuente: Halliburton, Mecánica de Rocas.

3.5.1.1.1 Esfuerzos de Compresión. Es la resultante de las tensiones o presiones que existen dentro de un sólido deformable o medio continuo, se caracteriza porque tienden a una reducción de volumen del material. En otra definición, el esfuerzo de compresión cuantifica la energía necesaria para quebrar o fallar la roca.

3.5.1.1.2 Esfuerzos de Tracción. Se relaciona a un esfuerzo de tracción con el esfuerzo de tensión cuando dicho esfuerzo actúa de tal forma que hale el cuerpo, es decir, las fuerzas resultantes tendrán sentido saliente del cuerpo. Su unidad de medida se expresa en Mega pascal (Mpa) en el sistema internacional y por convención se toma como un esfuerzo de tensión negativo.

3.5.1.2 Esfuerzos de corte. Un esfuerzo de corte (τ) es la fuerza requerida para mantener la velocidad de corte, tiende a provocar un efecto de cizallamiento; también se comporta como un esfuerzo tangencial que tiende a deformar el elemento fluyente.

El esfuerzo de corte se encuentra expresado en las unidades estándar del campo petrolífero, es decir las libras de fuerza por cien pies cuadrados (lbs/100 ft²) requeridas para mantener la velocidad de corte.

El esfuerzo de corte debe ser medido a distintas velocidades de corte para caracterizar las propiedades de flujo de un fluido.

Se puede calcular el esfuerzo de corte a cualquier otra velocidad de corte, empleando la expresión:

$$\tau = \mu \times \gamma \quad (3.0)$$

Esta definición general es independiente de las unidades. Las indicaciones del viscosímetro de lodo pueden ser convertidas en términos de un esfuerzo de corte y velocidad de corte al multiplicar la indicación por 1,0678.

3.5.2 Propiedades mecánicas de las rocas.

3.5.2.1 Elásticas. Algunos materiales tienen la propiedad para resistir y recuperarse de las deformaciones producidas por fuerzas externas. Esta propiedad se la denomina elasticidad y es el fundamento inicial bajo el cual se estudia las propiedades mecánicas de las rocas.

Los principales índices que caracterizan el proceso de deformación de las rocas que poseen características elásticas son: el coeficiente que relaciona las tensiones normales (σ) con su correspondiente deformación (ϵ), el coeficiente de proporcionalidad entre las tensiones tangenciales (τ) y la deformación de desplazamiento (δ) y el denominado coeficiente de deformación transversal [E, G, μ].

Para un estado de deformaciones elásticas, por debajo del límite de elasticidad de

la roca, E corresponde con el modelo de Elasticidad:

$$E = \sigma/\delta \quad (3.1)$$

Existen varios enfoques en el campo de la mecánica de roca para determinar las constantes elásticas; aquí se mencionan dos métodos:

- El primer método consiste en colocar una muestra de roca bajo una carga en una máquina de prueba mediante la cual se determinarán las constantes elásticas a partir de la relación de deformaciones, las constantes obtenidas del resultado de este método toman el nombre de constantes elásticas estáticas.
- El segundo método se refiere a las velocidades de las ondas acústicas y determina los valores a partir de la relación de la propagación de las ondas. Estas toman el nombre de constantes elásticas dinámicas.

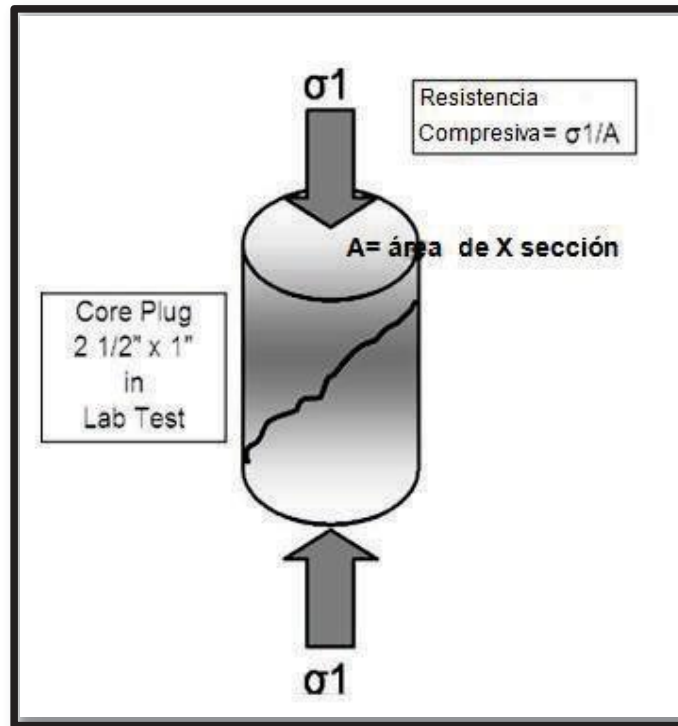
Las constantes elásticas dinámicas son más altas que las estáticas, su diferencia es mayor a bajas presiones de confinamiento.

Una observación es que a bajas presiones de confinamiento las rocas tienden a una relación no lineal de esfuerzos de formación. A altas presiones de confinamiento el comportamiento es más lineal y existe más conexión entre el confinamiento de las rocas y el esfuerzo de estas.

3.5.2.2 Resistencias.

3.5.2.2.1 Resistencia Compresiva no Confinada de la roca (UCS). Está definida como la resistencia que una muestra no confinada de roca tiene bajo esfuerzos compresivos, como lo muestra la Figura 11.

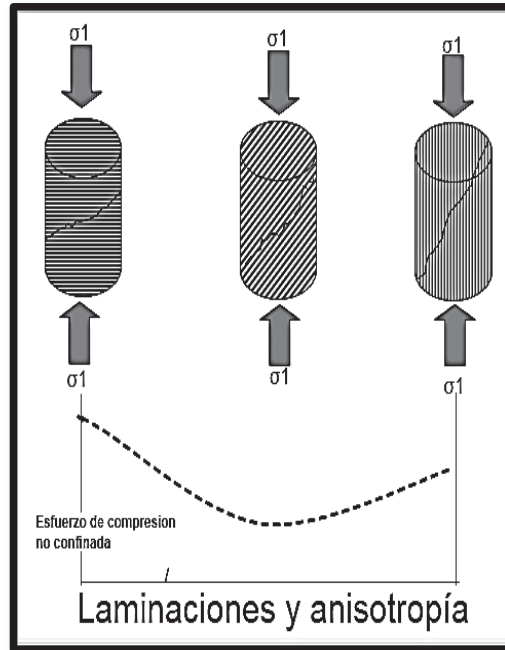
Figura 11. Resistencia Compresiva no confinada de la roca (UCS).



Fuente: Halliburton, Mecánica de Rocas.

La Resistencia Compresiva no Confinada de la roca (UCS), también toma el nombre de resistencia a la compresión uniaxial. Es el valor del esfuerzo en el momento en que ocurre la falla en una roca; es decir, el máximo esfuerzo que soporta la roca sometida a compresión uniaxial; ver Figura 12.

Figura 12. Discontinuidades de la roca y prueba de compresión.



Fuente: Halliburton, Mecánica de Rocas.

Uno de los métodos de determinación de esta propiedad es el ensayo de compresión uniaxial que consiste en someter a carga un cilindro recto de muestra de roca con una presión de confinamiento igual a cero hasta que esta falle. El valor del esfuerzo en el momento de la falla es definido como la resistencia compresiva no confinada de la roca (UCS).

Los valores calculados de resistencia compresiva no confinada de la roca (UCS) se comparan con los rangos de aplicación de las brocas PDC proporcionados por el fabricante para seleccionar la broca con la dureza suficiente para vencer la resistencia de la roca. Esfuerzo de confinamiento casi = 0, Esfuerzo Roca = UCS

- Presión de Confinamiento (P_c)

Es la suma de la presión litostática (o de carga de todos los materiales que se encuentran situados en todos los lados de la roca) más la presión de los fluidos

(en poros y rocas), se hacen presentes en rocas permeables que permiten el flujo de fluidos a través de sus poros, grietas o fisuras. En el caso práctico de los ensayos de laboratorio, la cantidad de presión de confinamiento corresponde al valor de carga radial aplicada hidráulica o neumáticamente sobre la roca.

- Anisotropía de la Roca

Cuando una propiedad varía de acuerdo a la dirección en la que es medida se considera anisotrópica, de otra manera se puede decir que la propiedad es isotrópica o isótropa. La anisotropía se usa típicamente para describir propiedades físicas, las cuales, para propósitos de geociencias, pueden tratarse como parámetros intrínsecos a la roca bajo ciertas condiciones.

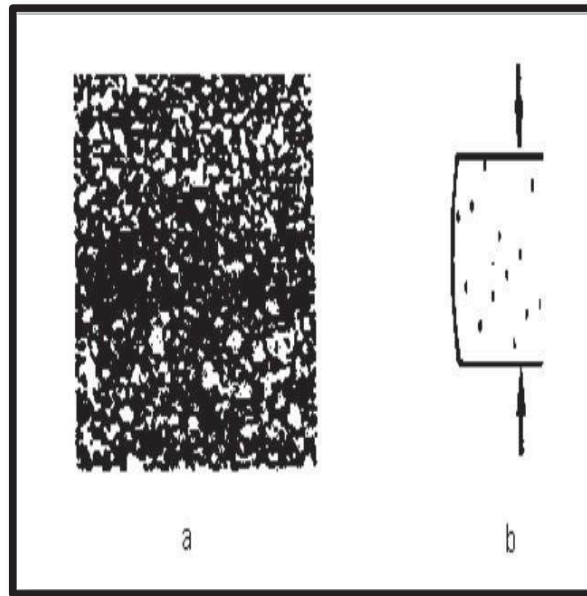
La anisotropía ha sido clasificada por algunos autores dependiendo la causa que la origina en: anisotropía litológica o intrínseca y una inducida por esfuerzos.

Variaciones estacionales en la tasa de flujo pueden inducir alternativamente micro-estratos de distribución de tamaño de granos entre finos y gruesos. Debido a este origen, este tipo de anisotropía es conocida como litológica o intrínseca.

La anisotropía inducida por esfuerzos, se refiere a que la variación de la permeabilidad es causada por micro-grietas, generadas por esfuerzos desviatorios, y predominantemente orientada al esfuerzo principal menor.

La Figura 13 muestra la anisotropía intrínseca o litológica (a) y producida por esfuerzos (b).

Figura 13. Anisotropía intrínseca o litológica (a) y producida por esfuerzos (b).



Fuente: Introducción a la Geomecánica Petrolera, Vásquez A. Sánchez M.

La sedimentología influye sustancialmente en la anisotropía megascópica (el yacimiento como un todo) de la formación, ya que la orientación de sedimentos es asociada generalmente a el eje de transporte de sedimentos (dirección de flujo) y al plano horizontal.

- Cálculo del USC a partir de registros geofísicos

Para obtener la resistencia compresiva sin confinamiento (presión atmosférica), basta con obtener las lecturas del registro de densidad y de porosidad para establecer la relación.

Si no cuenta con la información del registro sísmico que proporcione directamente los datos de los tiempos de tránsito de la onda compresional (Δt_c) y de cizallamiento (Δt_s), se calculará de la siguiente manera:

Tiempos de Tránsito de la Onda Compresional (Δt_c)

$$\Delta t_c = [\Delta t_{ma} (1 - \emptyset)] + [\Delta t_f(\emptyset)] \quad (3.2)$$

Tiempos de Tránsito de Cizallamiento (Δt_s)

$$\Delta t_s = \Delta t_c \left(\frac{\Delta t_s}{\Delta t_c} \right)^\alpha \quad (3.3)$$

Donde

Δt_{ma} =Tiempo de Tránsito a través de la Matriz de la Roca, (μ Seg/ft).

\emptyset = Porosidad.

Δt_f =Tiempo de Tránsito a través del fluido en el poro, (207μ Seg/ft) valor correspondiente al agua.

α = Factor de corrección por tamaño de grano. Debido a que su valor es cercano a la unidad, $\alpha = 1$.

Los valores aproximados de la relación $\left(\frac{\Delta t_s}{\Delta t_c} \right)$ de tiempo de tránsito de cizallamiento y tiempo de tránsito de la onda compresional, para diferentes tipos de rocas se obtienen de la Tabla 1.

Tabla 1. Valores de la relación de tiempo de tránsito de cizallamiento y tiempo de tránsito de la onda compresional, para diferentes tipos de rocas.

Litología de la formación	$\Delta t_s/\Delta t_c$	Velocidad en la matriz rocosa (pies/seg)
Arcillita	1.9	19000
Arcilla	3.2	6000
Anhidrita	2.45	20000
Arenisca limpia	1.6	19500

Arenisca limosa	1.7	19500
Arenisca arcillosa	1.85	19500
Basalto	1.55	20150
Caliza limpia	1.90	21000
Caliza limosa	2.1	21000
Caliza arcillosa	2.3	21000
Carbonato ferroso	2.45	8500
Cuarcita	1.5	21500
Cuarzo	1.55	20000
Diabasa	1.7	22700
Diorita	1.75	22000
Dolomía	1.8	25000
Epidosita	1.7	23000
Gabro	1.6	23500
Gneis	1.8	25000
Granito	1.7	21350
Hornsteno	1.85	25000
Limonita	1.8	23000
Lodolita	1.85	19000
Lutita	1.7 a 1.75	19500
Mármol	1.8	24000
Pedernal	1.6	22300
Pirita	1.7	28000
Sal	2.15	15000
Yeso	2.45	19050

Fuente: Guía de Selección de Barrenas de Perforación.

Velocidad de la Onda Compresional

$$V_p = \frac{1}{\Delta t_c} \times 304.8 \quad (3.4)$$

Donde:

V_p = Velocidad de la Onda Compresional, (km/s).

Δt_c = Tiempo de Tránsito de la Onda Compresional, (μ seg/ft).

304.8 = Factor de Conversión.

Velocidad de Cizallamiento, (Km/s)

$$V_s = \frac{1}{\Delta t_s} \times 304.8 \quad (3.5)$$

Donde:

V_s = Velocidad de Cizallamiento, (km/s).

Δt_s = Tiempo de Tránsito Cizallamiento, (μ seg/ft).

304.8 = Factor de Conversión.

Relación de Poisson

$$v = \frac{2 - \frac{\Delta t_s}{\Delta t_c}}{2 \times [1 - \frac{\Delta t_s}{\Delta t_c}]} \quad (3.6)$$

Donde:

v = Relación de Poisson, (adimensional).

Δt_c = Tiempo de Tránsito de la Onda Compresional, (μ seg/ft).

Δt_s = Tiempo de Tránsito Cizallamiento, (μ seg/ft).

Módulo de Corte

$$G = 1.34 \times 10^{10} \times \frac{\rho}{\Delta t_s^2} \quad (3.7)$$

Donde:

G = Módulo de Corte ó Módulo de Rigidez, (psi).

ρ = Densidad de Formación (Registro de Densidad para cada intervalo), (gr/cc).

Δt_s = Tiempo de Tránsito Cizallamiento, (μ seg/ft).

1.34×10^{10} = Factor de Conversión.

Módulo de Young Dinámico

$$E = 2G \times (1 + \nu) \quad (3.8)$$

Donde:

E = Módulo de Young Dinámico, (psi).

G = Módulo de Corte o Módulo de Rigidez, (psi).

ν = Relación de Poisson, (adimensional).

Módulo Volumétrico

$$K = \rho \left[\frac{1}{\Delta t_c^2} - \left(\frac{4}{3\Delta t_s^2} \right) \right] 1.34 \times 10^{10} \quad (3.9)$$

$$C_b = \frac{1}{K} \quad (3.9.1)$$

Donde:

K = Módulo Volumétrico, (psi).

Δt_c = Tiempo de Tránsito de la Onda Compresional, (μ seg/ft).

Δt_s = Tiempo de Tránsito Cizallamiento, ($\mu\text{seg}/\text{ft}$).

ρ = Densidad de Formación, (gr/cc).

1.34×10^{10} = Factor de Conversión.

Cálculo de la resistencia compresiva no confinada de la roca (UCS)

Para formaciones arcillosas.

$$UCS = 145.077 \times 0.72 \times V_p^{3.2} \quad (3.10)$$

Areniscas limpias, medianamente sucias y limolitas.

$$UCS = 145.077 \times 1.19E - 20 \times \rho^2 \times V_p^4 \times \left[\frac{1+V}{1-V} \right]^2 \times (1 - 2V)(1 + 0.78V_{SHALE}) \quad (3.11)$$

Expresión simplificada suponiendo el caso de una roca poco consolidada con un ángulo de fricción interna de 30° .

$$UCS = \frac{9 \times 10^{-8} E}{C_b} \times [0.008V_{SHALE} + 0.045(1 - V_{SHALE})] \quad (3.12)$$

Donde:

UCS = Resistencia Compresiva no Confinada de la Roca, (psi).

V = Relación de Poisson, (adimensional).

ρ = Densidad de Formación, (gr/cc).

K = Módulo volumétrico, (psi).

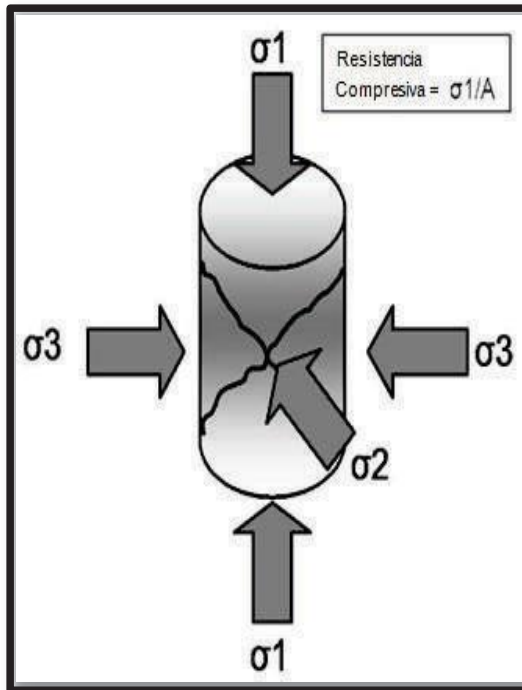
ρ = Densidad de Formación, (gr/cc).

E = Módulo de Young Dinámico, (psi)

V_{SHALE} = Contenido de Arcilla 145.077 = Factor de Conversión.

3.5.2.2.2 Resistencia Compresiva Confinada de la roca (CCS). Es la presión o fuerza (σ) aplicada sobre un área (A) requerida para cizallar la roca a presión atmosférica, como se muestra en la Figura 14.

Figura 14. Resistencia Compresiva Confinada de la roca (CCS).



Fuente: Halliburton, Mecánica de Rocas.

También conocida como la resistencia a la compresión triaxial, es el máximo esfuerzo que soporta la roca sometida a compresión con confinamiento.

Entre los métodos de determinación de esta propiedad se tiene la prueba triaxial. Se la realiza en el laboratorio incrementando la carga axial y de confinamiento simultáneamente hasta alcanzar el esfuerzo hidrostático recomendado, luego se mantiene la presión de confinamiento constante mientras la carga axial se va incrementando hasta que la falla ocurra.

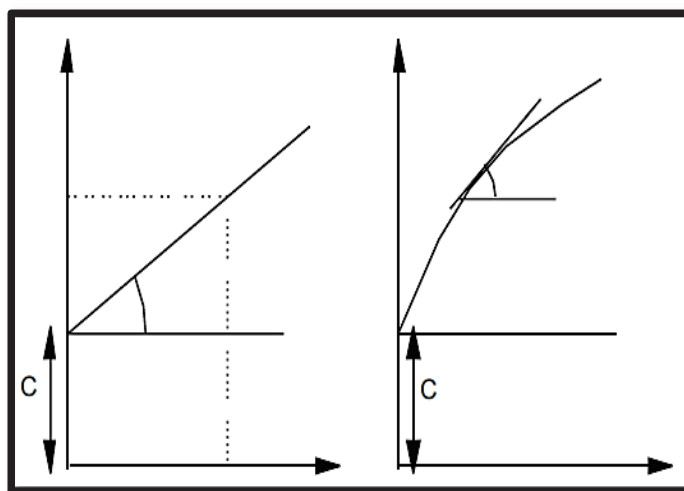
Cuando ocurre la falla en una prueba triaxial resulta de una fractura de cizalladura simple o falla de corte, plana áspera, inclinada en un ángulo cercano a la dirección del esfuerzo máximo principal; la prueba debe ser realizada utilizando varias pruebas de confinamiento.

- Ángulo de fricción interna (AFI)

El ángulo de fricción interna es un parámetro que mide la resistencia de la roca con el incremento de la presión de confinamiento. Es mayor para las areniscas y menor para las arcillas; se incrementa rápidamente al aumentar la presión de confinamiento en las areniscas y poco en las arcillas.

La tangente de este ángulo es el coeficiente de fricción μ y se relaciona con los planos de falla por: $\Phi = 90 - 2\theta$. El ángulo de fricción interna (Φ) tiene un rango entre 25° y 45° ; ver Figura 15. Se considera que rocas con alto ángulo de fricción es característica de bajos esfuerzos y pobremente consolidadas (60°), las areniscas presentan un ángulo de fricción por el orden de los 30° y las lutitas del orden de los 20° .

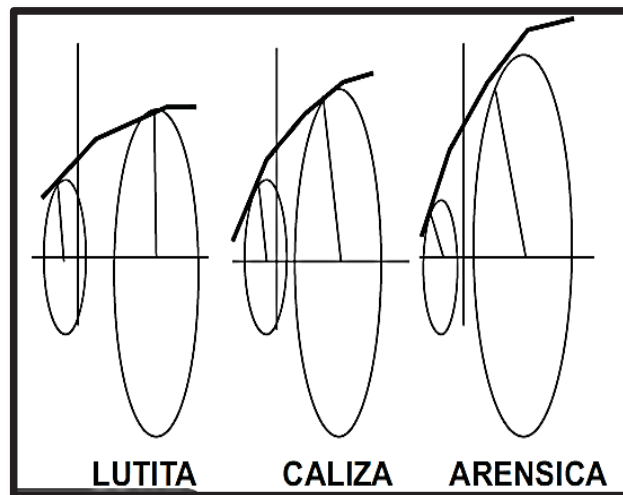
Figura 15. Ángulo de Fricción Interna.



Fuente: Barrenas e Hidráulica de perforación.

Entre mayor sea el ángulo de fricción interna se necesitará más esfuerzo de cizallamiento para incrementar la ruptura al incrementarse la presión de confinamiento. Es por ello que, para diversos materiales existirá una curva y un diferente ángulo de fricción interna como se observa en la Figura 16.

Figura 16. Envoltentes típicas de ruptura.



Fuente: Barrenas e Hidráulica de perforación.

Entre más pendiente tenga la curva mayor es la diferencia en la resistencia de cizallamiento. Así la resistencia a la tensión es más pequeña que la resistencia a la compresión.

Cuando la diferencia entre la resistencia a la compresión y a la tensión es grande el material de la roca es quebradizo y cuando es pequeña es suave. Al incrementar la presión de confinamiento la curva del ángulo de fricción interna tiende a achatarse, y el ángulo pleno de cizallamiento se incrementa y la diferencia entre el quebradizo y el suave desaparece.

4. ENERGÍA MECÁNICA ESPECÍFICA (MSE).

José Fernández⁹ enuncia que la Energía Mecánica Específica se usa para mejorar el rendimiento de perforación con resultados mixtos y se define como la energía necesaria para excavar un volumen unitario de roca. Es un parámetro muy útil, que puede considerarse como indicativo de la eficiencia en un trabajo de perforación. La Energía Mecánica Específica combina cada uno de los parámetros registrados en la perforación, y puede expresarse en la (5.0).

$$MSE = \frac{F}{A} + \frac{2\pi * RPM * TQ}{A * ROP} = et + er \quad (4.0)$$

Dónde:

MSE = energía mecánica específica (psi).

F = presión sobre la broca (kN).

A = área de perforación (m²).

RPM = velocidad de rotación (rps).

TQ = torque (kN*m).

ROP = velocidad de penetración (m/s).

et = componente de presión (psi).

er = componente de rotación (psi).

La primera variable de la ecuación corresponde al componente de presión y la segunda variable al componente de rotación. La Energía Mecánica Específica tiene las mismas dimensiones que la presión.

⁹ GALERA FERNÁNDEZ, José. Correlación Entre Los Parámetros De Perforación Y Las Propiedades Geomecánicas Del Terreno (en línea). Citado 17 de abril de 2012. Disponible en internet: <http://subterra-ing.com/pdf/P-G-2006_Correlacion-parametros-perforacion.pdf>.

El mínimo valor adquirido por la energía es una medida de la eficiencia mecánica máxima de una herramienta concreta y en unas condiciones específicas. Sin embargo, la Energía Mecánica Específica no disminuye de forma indefinida; existe un momento en que un aumento de la presión sobre la broca provoca una sobrecarga y atascamiento de esta, reduciéndose la eficiencia y causando un nuevo aumento de la Energía Mecánica Específica.

4.1 TEORÍA DE LA ENERGÍA MECÁNICA ESPECÍFICA (MSE)

La mejor manera de evaluar el desempeño de una broca y en general todo el proceso en el desarrollo de la perforación, es comparando el desempeño real con resultados de un historial de pozos vecinos. El concepto de Energía Mecánica Específica (MSE) se ha utilizado de manera limitada para investigar ineficiencias específicas en operaciones de campo, como una herramienta en tiempo real para maximizar la tasa de penetración. Los resultados han superado las expectativas.

Existen diferentes modelos para la obtención de la Energía Mecánica Específica, se diferencian principalmente por la información que requieren para poder aplicarlas, pero la tendencia de respuesta de estas es muy similar.

4.1.1 Ecuación de Teale. En 1964, Teale propone un modelo para cuantificar la relación existente entre la cantidad de energía de entrada y la tasa de penetración (ROP), basado en tres elementos claves: la Energía Mecánica Específica (MSE) de la perforación, la eficiencia de la perforación y la energía mínima específica.

El concepto de Energía Mecánica Específica (MSE) se deriva del principio fundamental que relaciona la cantidad de energía que se requiere para destruir una unidad de volumen de roca y la eficiencia con la que la broca realiza esta operación.

La teoría está fundamentada con pruebas de laboratorio en condiciones atmosféricas. Teale postula el concepto de Energía Mecánica Específica (MSE) en función de parámetros de perforación, como se puede observar en la fórmula:

$$MSE = \left(\frac{480 * T * RPM}{D^2 * ROP} \right) + \left(\frac{4 * WOB}{\pi * D^2} \right) \quad (4.1)$$

Donde:

MSE = Energía Mecánica Específica, (psi).

RPM = Revoluciones por Minuto de la Broca, (rev/min).

WOB = Peso sobre la Broca, (Lbf).

ROP = Tasa de Penetración, (ft/hr).

T = Torque, (lbf.ft).

D = Diámetro de la Broca, (pulg).

Un coeficiente específico de fricción deslizante fue introducido por Teale para expresar el torque (T) en función del peso de la broca (WOB).

Este coeficiente será utilizado para el cálculo de Energía Mecánica Específica (MSE) en ausencia de mediciones confiables de torque, tal como se muestra en la expresión:

$$\mu = \frac{36 * T}{D * WOB} \quad (4.1.1)$$

$\mu = 0.5-1.0$, (PDC).

$\mu = 0.2$, (Tricónica).

Donde:

WOB = Peso en la Broca, (Lbf).

T = Torque Medido desde Superficie, (Lbf-ft).

D = Diámetro de la Broca, (pulg).

La energía requerida para destruir un volumen dado de roca es determinada por la resistencia compresiva de la roca. Teale quedó sorprendido cuando los resultados de laboratorio indicaron que los valores de Energía Mecánica Específica (MSE) eran numéricamente iguales a la resistencia compresiva no confinada de la roca en libras por pulgada cuadrada (lpc) o (psi). Este hecho es un factor importante desde el punto de vista operacional ya que sirve de referencia para estimar la eficiencia en la perforación.

Vistas algunas interrogantes sobre la unidad de medida de la Energía Mecánica Específica (MSE) en (lpc) o (psi), se presenta una breve explicación mediante un análisis dimensional con sus respectivas ecuaciones y unidades:

- Se parte de la ecuación (5.1) de la Energía Mecánica Específica (MSE):

4.1.1.1 Análisis dimensional.

$$|MSE| = \left| \frac{F * L * \frac{1}{T}}{L^2 * \frac{L}{T}} \right| + \left| \frac{F}{L^2} \right|$$

$$|MSE| = \left| \frac{F}{L^2} \right| + \left| \frac{F}{L^2} \right|$$

$$|MSE| = 2 \left| \frac{F}{L^2} \right| = \frac{Lb}{Pulg^2} \text{ o } (psi)$$

Donde:

MSE = Energía Mecánica Especifica, (F / L²).

RPM = Revoluciones por Minuto de la Broca, (1/T).

WOB = Peso sobre la Broca, (F).

ROP = Tasa de Penetración, (L / T).

D = Diámetro de la Broca, (L).

T = Torque, (F.L).

4.1.1.2 Sistema de unidades.

$$MSE = \frac{480 * T * RPM}{D^2 * ROP} + \frac{4 * WOB}{\pi * D^2}$$

$$MSE = \frac{480 * [lb * ft] * \left[\frac{1}{min}\right]}{[pulg^2] * \left[\frac{ft}{hr}\right]} + \frac{4 * [lb]}{\pi * [pulg^2]}$$

$$MSE = \frac{480 * \left[\frac{lb}{min}\right]}{\left[\frac{1}{60}\right] * \left[\frac{pulg^2}{min}\right]} + \frac{4 * [lb]}{\pi * [pulg^2]}$$

$$MSE = 480 * 60 * \left[\frac{lb}{pulg^2}\right] + \frac{4}{\pi} * \left[\frac{lb}{pulg^2}\right]$$

$$MSE = \left[480 * 60 + \frac{4}{\pi}\right] \left[\frac{lb}{pulg^2}\right] \text{ o (psi)}$$

4.1.2 Ecuación de Koederitz. Tiene el mismo funcionamiento que la ecuación de Teale, su diferencia es que muestra la respuesta del comportamiento de la energía en zonas en donde se está deslizando tubería, brindando una mejor lectura de la eficiencia de perforación, su única restricción es que para empearla se necesita una información adicional de motor como se ve en la 4.2.

$$MSE = \left(\frac{4 * WOB}{\pi * D^2} + \frac{480 * (RPM + KN * Q) * \left(\frac{TQMAX}{\Delta P MAX}\right) * \Delta P / 1000 \pi}{D^2 * ROP} \right) \quad (4.2)$$

Dónde:

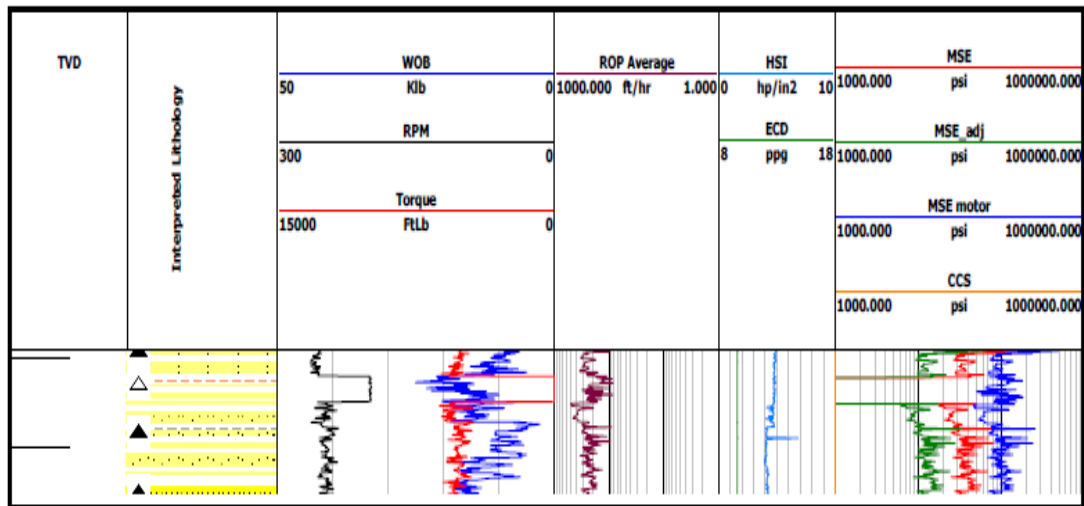
MSE = Energía Mecánica Específica. (psi).

WOB = Peso sobre la broca. (klbf).

- RPM =Revoluciones por minuto. (rpm).
- D = Diámetro de la broca. (Pulg).
- ROP = Caudal de penetración. (ft/hr).
- KN = Razón volumétrica de velocidad de motor. (rev/gal).
- Q = Tasa total de flujo. (gal/min).
- TQMAX = Torque máximo – motor. (ft-lb).
- ΔP_{MAX} = Presión diferencial máxima – motor. (psi).
- ΔP = Presión diferencial. (psi).

4.1.3 Diferencia entre curvas de MSE. Mediante la comparación grafica de las fórmulas para el cálculo de la Energía Mecánica Específica, como puede observarse en la Figura 17, en la cual la línea de color rojo corresponde a la ecuación de Teale y la línea de color azul corresponde a la ecuación Koederitz, con lo cual podemos detallar que la ecuación de Koederitz continua mostrando el comportamiento de la operación de perforación en momento cuando las otras fórmulas dejaban de hacerlo, esto es debido a que en esa zona en específico se encontraban deslizando tubería.

Figura 17. Diferencia entre curvas de MSE.



Fuente: PESSIER, R. WALLACE S., OUESLATI H., Drilling Performance Is a Function of Power at the Bit and Drilling Efficiency, JPT, año 2012 Modificado por los autores.

Si analizamos el modelo de la ecuación del MSE para ambos casos, podemos apreciar que este se divide en dos componentes (Figura 18) que se suman; la primera parte de la ecuación corresponde al componente de rotación o componente rotacional y representa todos los efectos generados por el movimiento de rotación de la sarta, mientras que la segunda parte es la componente de presión o componente axial y representa todos los efectos generados por el peso sobre la broca. Si separamos estas componentes y comparamos sus valores numéricos al momento de calcular la energía mecánica específica, podemos apreciar que casi un 90% del valor total del MSE es aportado por la componente rotacional y el otro 10% por la componente axial, lo que nos indica la relevancia de cada una de estas componentes durante la ejecución de una perforación.

Figura 18. Componentes de la ecuación de energía mecánica específica.

$$MSE = \left(\frac{480 * T * RPM}{D^2 * ROP} \right) + \left(\frac{4 * WOB}{\pi * D^2} \right)$$

The diagram shows the equation for Specific Mechanical Energy (MSE) with two terms circled in red. The first term, $\left(\frac{480 * T * RPM}{D^2 * ROP} \right)$, is labeled 'Componente Rotacional' with a red arrow pointing to it. The second term, $\left(\frac{4 * WOB}{\pi * D^2} \right)$, is labeled 'Componente Axial' with a red arrow pointing to it.

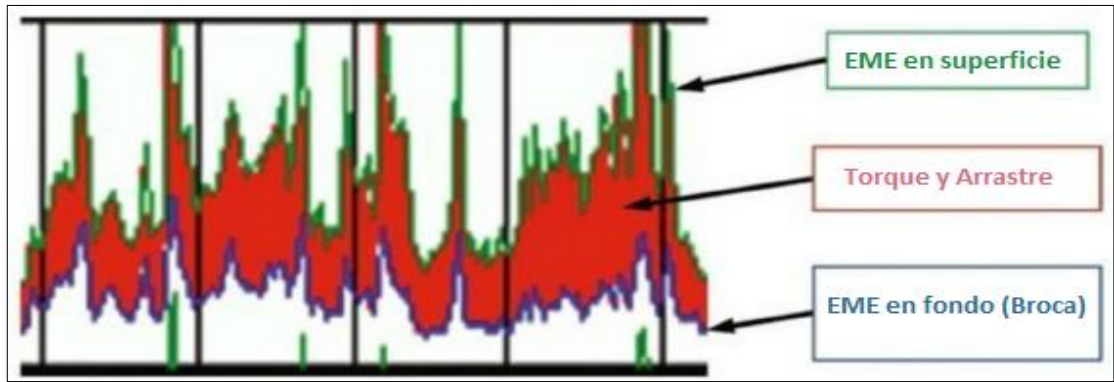
Fuente: Autor.

4.2 EFICIENCIA MECÁNICA (EFFM)

El primero en plantear el cálculo de la MSE y observar la relación entre la misma, con la resistencia a la compresión fue Teale; en muchos casos un alto valor de

Energía Mecánica Específica no es necesariamente una señal de bajo desempeño de la broca, pero si es un indicativo de un alto torque y arrastre en el pozo; así como de menor cantidad de energía que llega a la broca como se ve en la Figura 19.

Figura 19. Comparación entre la medida de fondo y superficie para MSE.



Fuente. PESSIER, R. WALLACE S., OUESLATI H., Drilling Performance Is a Function of Power at the Bit and Drilling Efficiency, JPT, año 2012 Modificado por los autores.

Teale también introdujo los conceptos de Energía Específica Mínima (ES_{MIN}) y Máxima Eficiencia Mecánica (EFF_M). La Energía Específica Mínima se alcanza cuando la Energía Mecánica Específica (MSE) se aproxima a la resistencia compresiva no confinada de la roca (UCS) que está siendo perforada. La eficiencia mecánica se calcula con la expresión:

$$EFF_m = \frac{ES_{MIN}}{MSE} * 100 \quad (4.3)$$

Donde:

ES_{MIN} = Energía Específica Mínima, (psi) = UCS.

EFF_M = Máxima Eficiencia Mecánica, (porcentaje).

Pessier (1998) validó la ecuación derivada por Teale (1964) para la perforación en presencia de una columna hidrostática, donde la resistencia a la roca está bajo

confinamiento (CCS), modificando la ecuación de Eficiencia Mecánica de la siguiente manera:

$$EFF_m = \frac{CCS}{MSE} * 100 \quad (4.4)$$

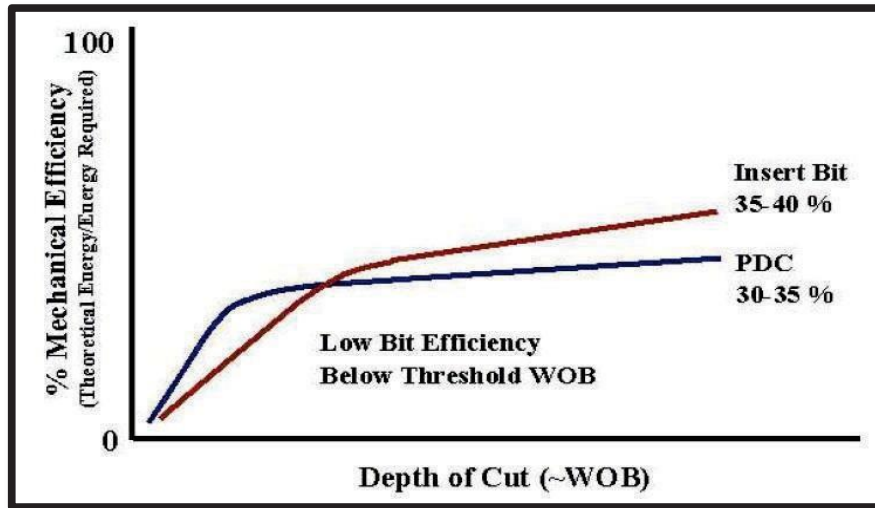
A partir de pruebas y datos de laboratorio se logra establecer que el máximo rendimiento oscila entre el 30 y 40 % (Figura 20), de esto surge el factor de eficiencia como un valor intermedio del 35% que se usa de forma uniforme¹⁰.

A pesar de que este valor puede no ser preciso, debido a que el cambio se realiza de forma uniforme, aún puede ser utilizado eficazmente como una herramienta para observar gráficamente las tendencias de la Energía Mecánica Específica.

De acuerdo a esto, en las operaciones de campo muchos operadores han establecido un valor constante de 35%, independientemente del tipo de broca o WOB.

¹⁰ DUPRIEST, F. KOEDRITZ, L. maximizing drill rates with real-time surveillance of mechanical specific energy, SPE 92194, año 2005.

Figura 20. Relación entre la profundidad de corte (DOC) y la eficiencia mecánica.



Fuente: Fred E. DuPriest, ExxonMobil and William L. Koederitz, 2005.

El torque asociado para un tipo particular de broca, que perfora a la resistencia compresiva confinada (CCS) con una tasa de penetración dada, es calculado a partir de la ecuación:

$$T = \left(\frac{CCS}{EFF_M} - \frac{4*WOB}{\pi*D^2} \right) * \left(\frac{D^2*ROP}{480*RPM} \right) \quad (4.5)$$

Sustituyendo el MSE de la ecuación (5.4) por la ecuación (5.1) en términos de eficiencia mecánica y el torque en función del peso en la broca, se resuelve la siguiente ecuación para la tasa de penetración (ROP):

$$ROP = \frac{13.33*\mu*RPM}{D * \left[\frac{CCS}{EFF_m*WOB} - \frac{1}{Ab} \right]} \quad (4.6)$$

Donde:

ROP = Tasa de Penetración (ft/hr).

Ab = Área de la Broca, (pulg²).

4.3 CORRELACIÓN DE LA RESISTENCIA COMPRESIVA NO CONFINADA DE LA ROCA (UCS) Y LA RESISTENCIA COMPRESIVA CONFINADA DE LA ROCA (CCS)

En los experimentos iniciales no hubo presión de confinamiento que actuara sobre la roca, ya que se llevó a cabo a presión atmosférica. Sin embargo, como en el campo la roca está sujeta a la presión de confinamiento, la resistencia a la perforación no puede ser expresada por el valor de UCS; por lo tanto, sería necesario comparar los valores de Energía Mecánica Específica (MSE) con un rango de la resistencia compresiva confinada de la roca (CCS).

Con relación a la resistencia compresiva confinada de la roca (CCS), esta se calcula por el siguiente método:

$$CCS = UCS + DP + 2DP * \frac{\text{sen}(AFI)}{(1-\text{sen}(AFI))} \quad (4.7)$$

Donde:

(UCS) = Resistencia Compresiva no Confinada de la roca, (psi).

(CCS) = Resistencia Compresiva Confinada de la roca, (psi).

AFI = Ángulo de Fricción Interna de la Roca.

Para adaptar la ecuación anterior a condiciones de campo, es necesario reemplazar la presión diferencial (DP) por la expresión:

$$DP = ECD - P_{PORO} \quad (4.7.1)$$

$$P_{PORO} = \text{líquido } \rho * \rho * g \quad (4.7.1.1)$$

Donde

La densidad del agua de los poros = Líquido $\rho = 1.01$ sg ó 8.42 ppg (lb/gal).

PPORO = Presión de Poro, (lb/plg²) o (psi)

ρ = Densidad del lodo, (lb/gal).

g = Aceleración de la Gravedad.

$$ECD = \rho * \frac{P_{aT} = \sum P_a}{(0.052 * TVD)} \quad (4.7.1.2)$$

$$P_a = \frac{f_a * V_a^2 * \rho}{92.916(D_2 - D_1)} * L_m \quad (4.7.1.2.1)$$

Si el número de Reynolds es inferior o igual a 2100:

$$f_a = \frac{24}{N_{Rea}} \quad (4.7.1.2.1.1)$$

Si el número de Reynolds es mayor o igual a 2100:

$$f_a = \frac{\left(\frac{\log n_a + 3.93}{50}\right)}{N_{Rea} \left[\frac{1.75 - \log n_a}{7}\right]} \quad (4.7.1.2.1.2)$$

$$n_a = \frac{\log\left(\frac{\theta_2}{\theta_1}\right)}{\log\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)} \quad (4.7.1.2.1.2.1)$$

$$N_{Rea} = \frac{15.467 * v_A * (D_2 - D_1)}{\mu_{ea}} \quad (4.7.1.2.1.3)$$

$$V_a = \frac{24.84 * Q}{(D_2^2 - D_1^2)} \quad (4.7.1.2.1.3.1)$$

$$\mu_{ea} = 100 * K_a \left(\frac{2.4 * V_a}{D_2^2 - D_1^2} \right)^{(n_a - 1)} * \left(\frac{2n_a + 1}{3n_a} \right)^{n_a} \quad (4.7.1.2.1.3.2)$$

$$K_a = \frac{(\theta_1)}{\omega_1^{n_a}} \quad (4.7.1.2.1.3.2.1)$$

Donde:

DP = Presión Diferencial = Esfuerzo de confinamiento.

ECD = Densidad Equivalente de Circulación, (lpg).

TVD = Profundidad Vertical Verdadera, (ft).

Pa = Pérdida de Presión del Intervalo Anular, (psi).

L_m = Longitud de la Sección Transversal, (ft).

D₂ = DI del Pozo o Tubería de Revestimiento, (pulg).

D₁ = DE (Diámetro Exterior) de la Tubería de Perforación o los Portabrocas, (pulg).

ρ = Densidad del Fluido de Perforación, (lb/gal).

NRe_a = Número de Reynolds en el Espacio Anular, (adimensional).

F_a = Factor de Fricción del Espacio Anular, (adimensional).

V_a = Velocidad Media de Propagación en el Espacio Anular, (ft/min).

Q = Caudal o Flujo, (gpm).

μ_{ea} = Viscosidad Anular Efectiva, (cp).

n_a = Índice de Comportamiento del Flujo, (adimensional).

θ₁ = Indicación de Viscosímetro de Lodo a una Velocidad de Corte más Baja, (3RPM).

θ₂ = Indicación de Viscosímetro de Lodo a una Velocidad de Corte más Alta, (300RPM).

ω₁ = Viscosímetro de Lodo (RPM) a una Velocidad de Corte más baja.

ω_2 = Viscosímetro de Lodo (RPM) a una Velocidad de Corte más alta.

K_a = Factor de Consistencia, ($\text{dina seg}^2/\text{cm}^2$).

Basados en la revisión de la teoría de Energía Mecánica Específica (MSE) y el trabajo desarrollado por Pessier, es posible caracterizar o definir el coeficiente de fricción deslizante, eficiencia, peso sobre la broca (WOB) y las revoluciones por minuto de la broca (RPM) para cada tipo de broca, en función de resistencia confinada de la roca.

4.4. PRUEBAS DE PERFORABILIDAD (DRILL-OFF-TESTS)

El primer objetivo de la metodología para maximizar la ROP, es obtener los parámetros óptimos, especialmente los de WOB y RPM, siendo de gran ayuda realizar pruebas de perforabilidad con la finalidad de determinar la combinación óptima de WOB y de las RPM que producen la ROP más elevado, aplicada en diferentes formaciones del pozo.

Las pruebas de perforabilidad pueden ser definidas por:

- Cambio de formación.
- Cambio de ROP.
- Cambio de Torque.
- Cambio de Personal.
- Cambio en otros patrones operacionales (hidráulica (CCS), propiedades del lodo, vibraciones, etc.).

4.4.1. Procedimiento para la prueba de perforabilidad. La prueba de perforabilidad es un proceso donde se alteran los parámetros para maximizar la tasa de penetración (ROP) hasta encontrar el punto óptimo que se encuentra

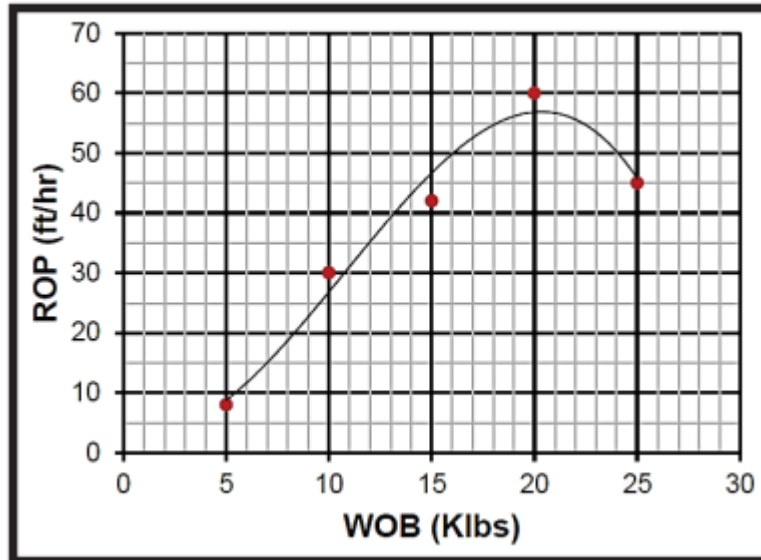
cuando la relación de ROP con WOB y RPM se deja de comportar de una forma lineal.

Existen variaciones en las pruebas de perforabilidad, pero se puede llegar al mismo objetivo de acuerdo al siguiente procedimiento:

1. Seleccionar la velocidad de rotación (RPM) deseada o recomendada y mantenerla constante, así como la tasa de flujo para evaluar los parámetros operacionales.
2. Retornar al fondo y aumentar el peso sobre la broca (WOB) al máximo posible.
3. Registrar el tiempo necesario para perforar (“drill-off”) en un incremento de peso predeterminado (normalmente entre 2000-5000 lbf). A cada tanto, cerciorarse de que el indicador del peso sobre la broca (WOB) no está trabado.
4. Continuar hasta que todo el peso sobre la broca (WOB) haya sido perforado (drilled off) o hasta que el tiempo de incremento empiece a tener un aumento significativo. El tiempo más corto indicará el peso óptimo para esa velocidad de rotación (RPM).
5. Aumentar la velocidad de rotación (RPM) y repetir el procedimiento anterior. En formaciones duras, o en condiciones de ROP lento, aumentar la velocidad de rotación (RPM) de 5 a 20 incrementos. En formaciones blandas o con condiciones de ROP elevados, aumentar la velocidad de rotación (RPM) de 10 a 40 incrementos.

6. Representar gráficamente los datos en un gráfico de la ROP vs. WOB/RPM; ver en la figura 21.

Figura 21. Tasa de penetración (ROP) vs. Peso sobre la broca (WOB)



Fuente: Halliburton, Drilling Guidelines.

7. Seleccionar el WOB más bajo que generó el ROP más rápido. Mantenga esta WOB constante y repita el procedimiento para variar los valores de RPM, continuar con las pruebas hasta alcanzar la optimización. Si el incremento de tiempo más corto ocurre con varios pesos sobre la broca (WOB) o velocidades de rotación (RPM) diferentes, utilizar la combinación WOB-RPM (WR/D) más baja.

Se mencionarán algunas observaciones referentes a las pruebas de perforabilidad:

- La optimización del peso sobre la broca (WOB) y de la velocidad de rotación (RPM) puede tener que esperar hasta que el BHA o una parte de éste haya pasado por la zapata del revestimiento o de la ratonera (rat

hole.) Evaluar otros factores que aseguren la optimización o cuando estos pueden ser realizados.

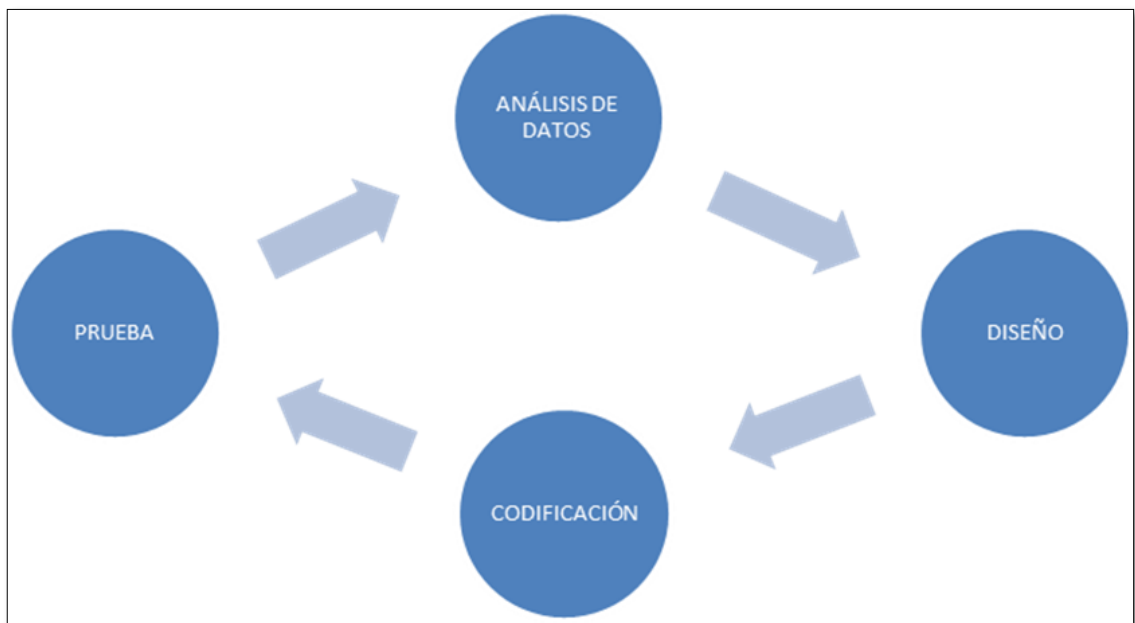
- El peso sobre la broca (WOB) y la velocidad de rotación (RPM) óptimos son para una aplicación específica y solamente podrán ser empleados continuamente en una formación homogénea. Consecuentemente, en intervalos de diversas formaciones, las pruebas de optimización sobre la tasa de penetración (ROP) no producirán combinaciones favorables de peso y de rotación. Las pruebas de perforabilidad serán necesarias cada vez que haya cambio en la formación. Las variaciones típicas de combinaciones del peso sobre la broca (WOB) y la velocidad de rotación (RPM) son derivadas a partir de los intervalos; un ejemplo de estas son las formaciones intercaladas.
- Valores iniciales de la velocidad de rotación (RPM) son, normalmente, de informaciones de correlación o del rango inferior de los parámetros operacionales que aparecen en la hoja de especificaciones técnicas del producto.
- El máximo WOB práctico es generalmente del rango máximo de parámetros operacionales que aparecen en la hoja de especificaciones técnicas, una porción realista de peso disponible de los collares, u otro criterio de aplicación como el peso máximo permitido por debajo del martillo, etc. Durante la perforación, el máximo peso sobre la broca (WOB) práctico depende de la aplicación; es decir, se determina por actividades de desviación y de control de vibración, entre otras.

- En los ensamblajes con motor, la presión de bomba deberá ser vigilada para detectar el frenado del motor con el peso sobre la broca (WOB) máximo.
- Los incrementos de peso característicos que deben ser empleados en las pruebas de perforabilidad a 2000 libras para formaciones más duras / ROP más lento y 5000 libras para formaciones más blandas / ROP más rápido.
- Si los mayores valores de la tasa de penetración (ROP) ocurren con varios WOB-RPM diferentes, siempre emplear la combinación de WOB-RPM menor para optimizar la vida útil de la broca, con tal que no genere efectos vibratorios perjudiciales.
- El peso sobre la broca (WOB) y la velocidad de rotación (RPM) están optimizados cuando el peso sobre la broca (WOB) o la velocidad de rotación (RPM) adicional no aumentan la tasa de penetración (ROP) de manera lineal o cuando el límite de torque es alcanzado.

5. METODOLOGÍA DE DESARROLLO DE LA APLICACIÓN SOFTWARE

La aplicación diseñada para esta investigación requirió de un proceso de análisis de datos, diseño, codificación y fase de prueba. El cual es un proceso iterativo en donde las fases están relacionadas entre sí. En la Figura 22 se describe este proceso:

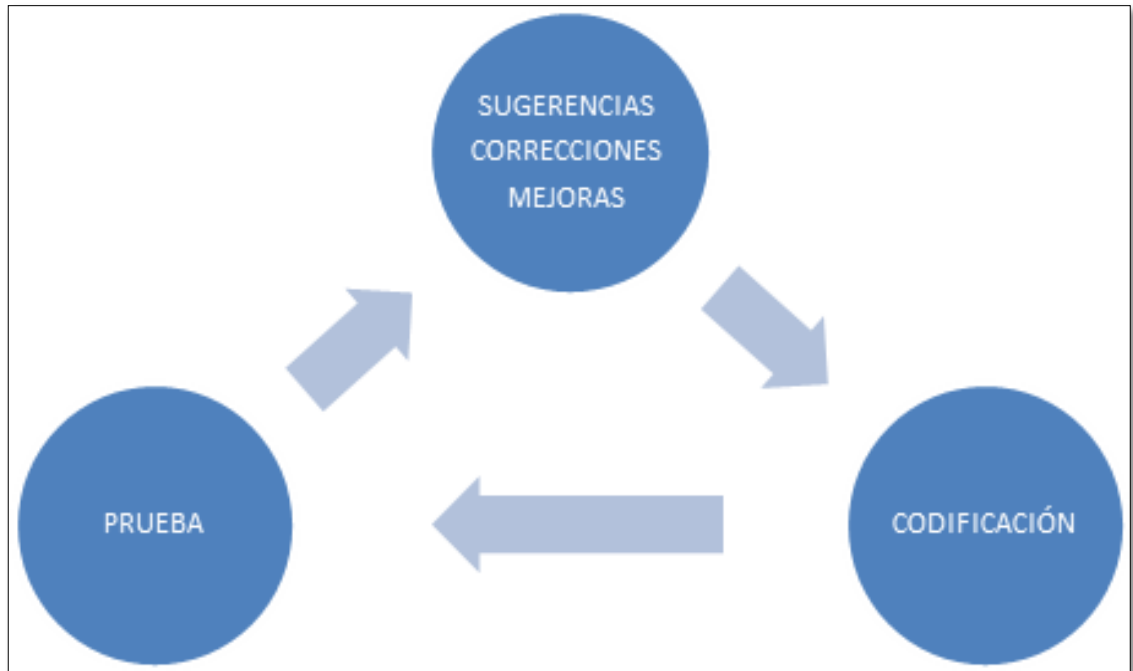
Figura 22. Ciclo de desarrollo de la plantilla.



Fuente: Autor.

Una vez cumplido este proceso durante la investigación, viene un proceso de retroalimentación en el cual se encuentra involucrada la opinión tanto de profesionales de la industria como de docentes conocedores del tema y representantes del usuario final de la investigación, como se muestra en la Figura 23.

Figura 23. Ciclo de retroalimentación.



Fuente: Autor.

5.1 LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN UTILIZADO

El software que se utilizó para el diseño de la aplicación fue Microsoft Excel 2016, realizando una interfaz de usuario en el lenguaje Microsoft Visual Basic para Aplicaciones – Aplicación Cálculos y gráficas.xlsm. Este software es una herramienta que cumple con las necesidades y requisitos básicos para el desarrollo de la metodología. Las principales características que se tuvieron en cuenta para seleccionar este programa son las siguientes:

- Permite la creación de macros por medio del lenguaje de programación Visual Basic que agiliza el cálculo de las variables a estudiar.

- Permite la utilización de una hoja de cálculo de fondo para la realización de las diferentes operaciones matemáticas requeridas.
- Permite la creación de gráficos extrayendo la información de las variables en estudio ayudando a tener un análisis del comportamiento de las mismas.
- Es de fácil uso y su licencia es de fácil adquisición debido a que ya en muchos casos viene incorporada con el sistema operativo de Windows.

5.2 DISEÑO DE LA APLICACIÓN

Se debe adquirir toda información que influye directamente en el comportamiento de la MSE y la CCS durante la perforación, la información necesaria para poder diseñar la plantilla se describe a continuación:

- Peso sobre la broca.
- Revoluciones por minuto.
- Torque.
- Rata de perforación.
- Profundidades.
- Espesores de formación.
- Tamaño de las brocas.

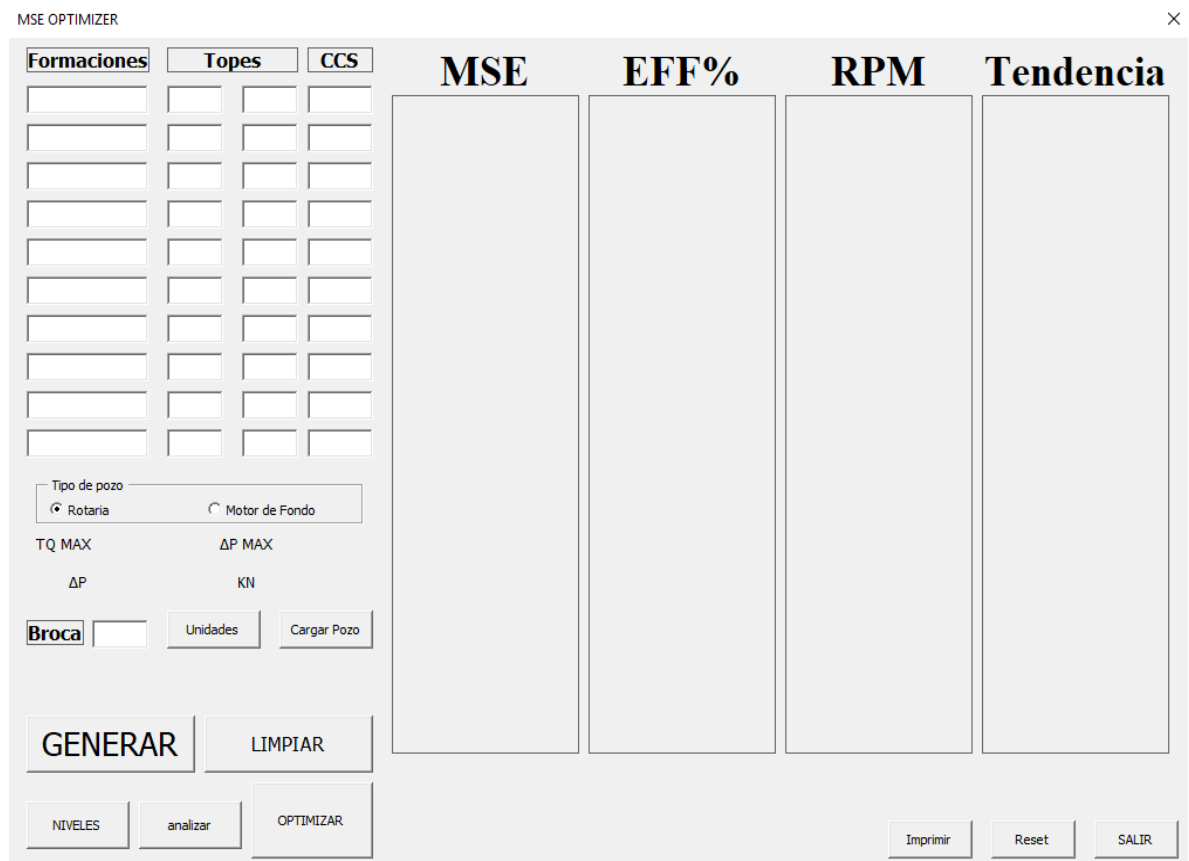
5.3 PRESENTACIÓN DE LA APLICACIÓN

La aplicación diseñada para el desarrollo de esta metodología lleva como nombre MSE_OPTIMIZER y se divide en una interfaz de usuario principal

(Figura 24) y tres secundarias, en la primera se muestran una serie de casillas donde se requiere que se introduzca la información más relevante de la operación a estudiar, la segunda muestra una serie de graficas con el comportamiento de algunos parámetros involucrados, la tercera nos permite hacer un análisis visual sobre el comportamiento de dos variables a optimizar y la cuarta nos muestra un histograma de frecuencias del parámetro RPM ya optimizado.

5.3.1 Interfaz principal.

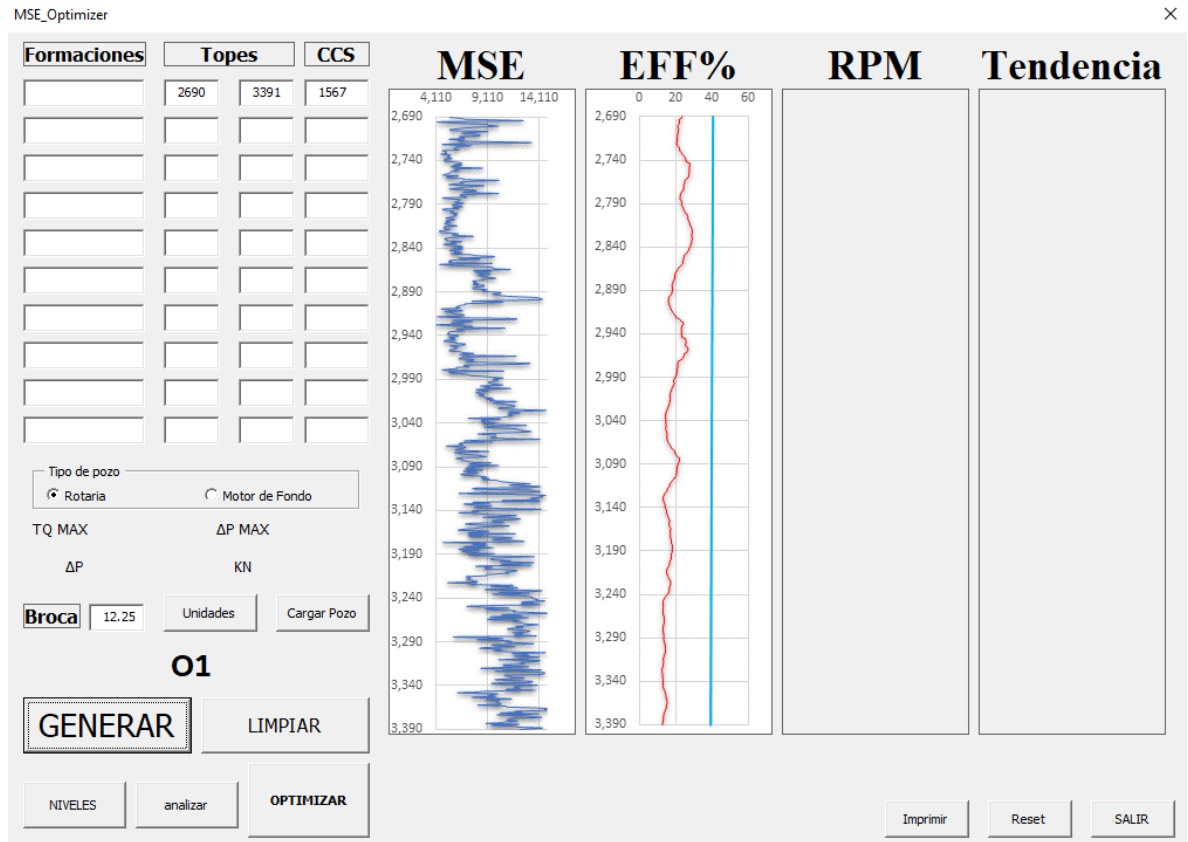
Figura 24. Interfaz principal de MSE_Optimizer.



Fuente: MSE_Optimizer.

En la parte superior izquierda de esta interfaz se introduce el nombre, los topes y el valor del CCS de cada una de las diferentes formaciones que conformen la perforación que vamos a analizar, posteriormente a eso se le especifica a la aplicación si el pozo se realizó con rotación normal o si se utilizó motor de fondo, esto debido a que el modelo para el cálculo del MSE varía de acuerdo a esta condición, en el caso de utilizar motor de fondo se habilitan automáticamente unas casillas para introducir la información extra del motor. Se coloca el tamaño de la broca utilizado y se le da a la opción de “Cargar pozo” para poder introducir el archivo Excel generado directamente del .LAS que sale de las herramientas convencionales de pozo, este archivo debe contener los parámetros pie a pie de WOB, RPM, Torque Y ROP. Una vez cargado los parámetros del pozo, la aplicación nos mostrará el nombre del pozo cargado y listo para analizar, le daremos a la opción de “Generar” y esperaremos a que el aplicativo realice los diversos cálculos con los cuales posteriormente generará las diversas graficas a mostrar (puede tardar unos segundos), cuando este proceso termine la aplicación nos mostrará en la parte derecha dos graficas generadas (Figura 25), la primera de ella corresponde al comportamiento del cálculo del MSE que se generó durante el proceso de perforación y la segunda de ellas corresponde a la gráfica que describe el comportamiento de la eficiencia mecánica durante la operación, y nos muestra que tan lejos o cerca estuvimos de alcanzar los valores ideales.

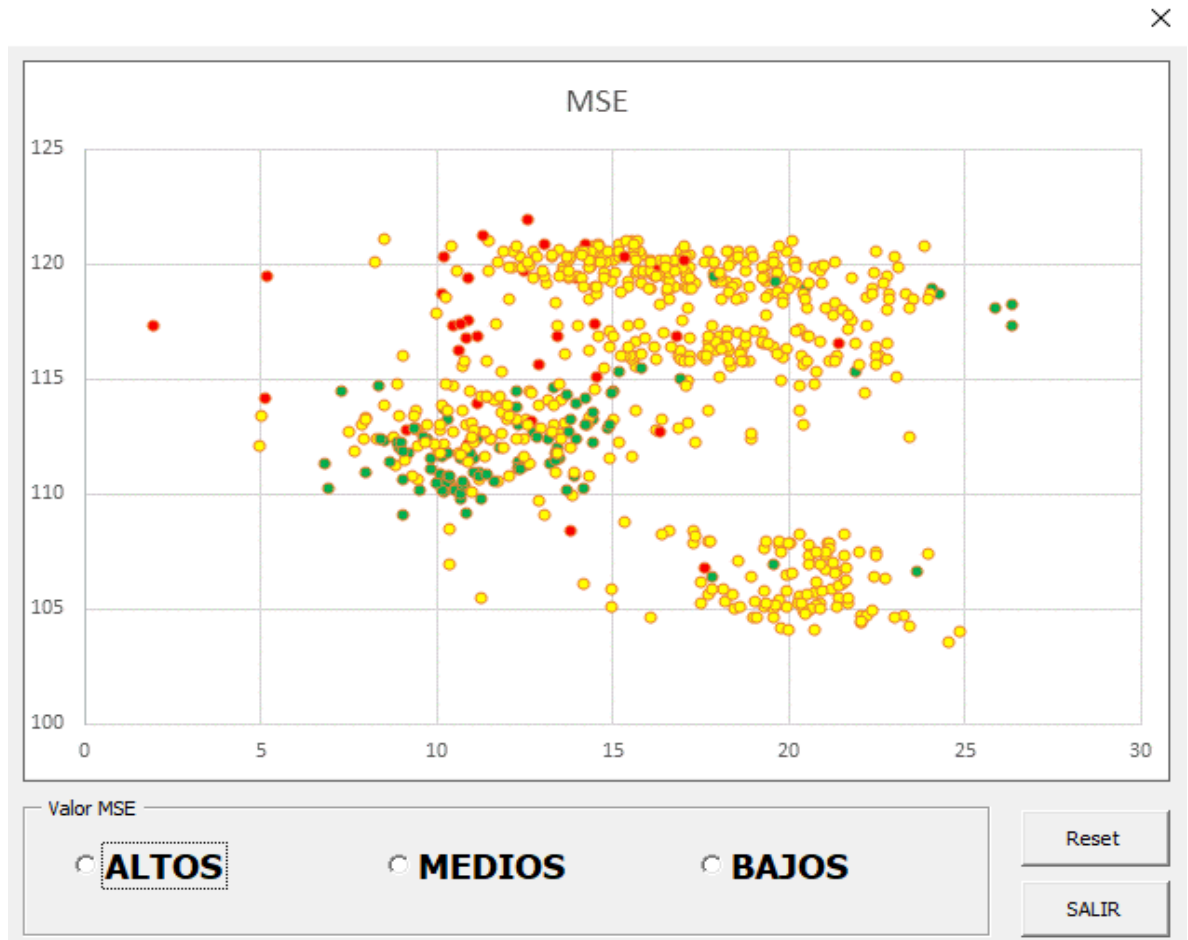
Figura 25. Interfaz principal de MSE_Optimizer, segunda fase.



Fuente: MSE_Optimizer.

5.3.2 Segunda interfaz. Una vez le damos al botón de “Niveles” la aplicación comienza a hacer una serie de cálculos y unos segundos después nos muestra una nueva ventana (Figura 26), en esta aparece una nueva grafica del tipo dispersión, donde se encuentran ubicados por puntos los diferentes valores del MSE por cada par de coordenadas WOB y RPM, en ella podremos analizar de una manera visual los rangos tanto de peso como de RPM que generan los valores más bajos de MSE ya que nos permite filtrar la información en 3 grupos de valore como bajos, medios y altos.

Figura 26. Segunda interfaz de MSE_Optimizer.



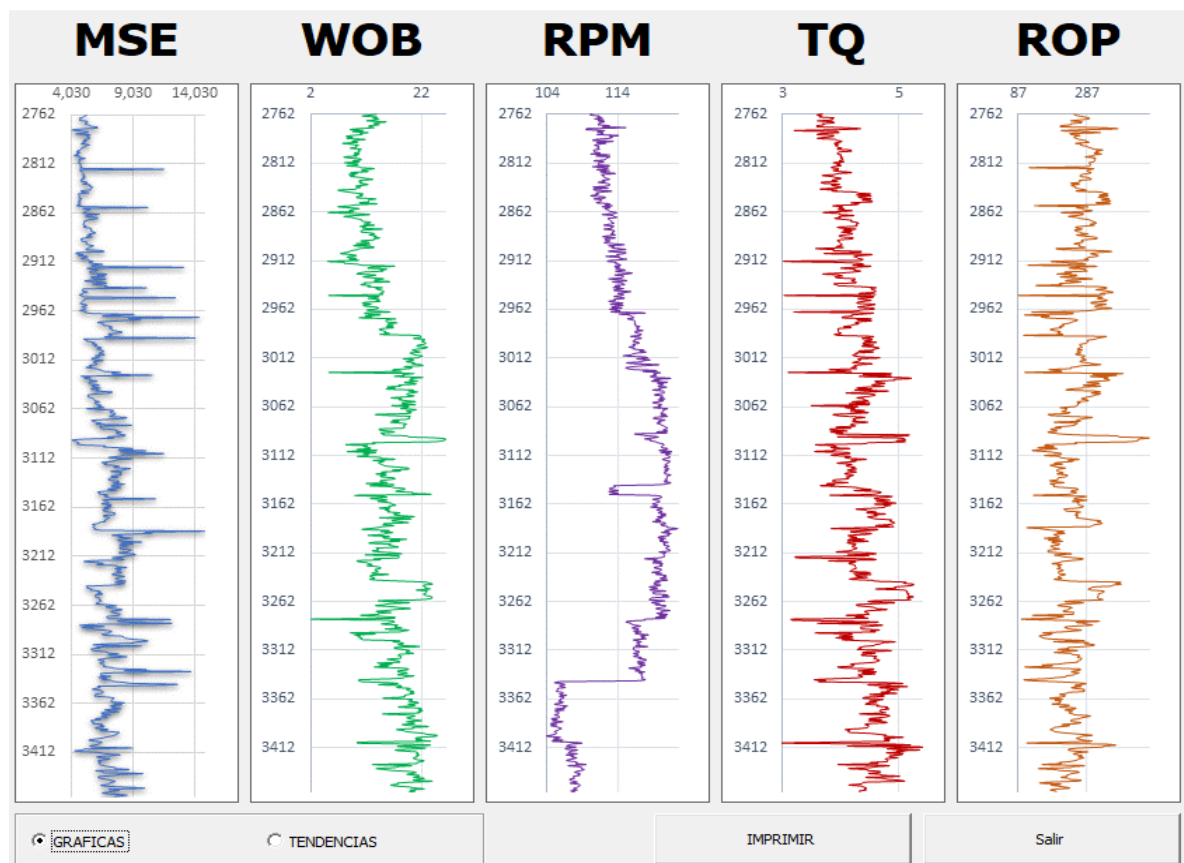
Fuente: MSE_Optimizer.

Al dar el botón de “Aceptar” regresaremos a la primera interfaz.

5.3.3 Tercera interfaz. Una vez regresada a la primera interfaz, presionaremos la casilla de “Analizar” y se desplegaría la tercera interfaz (Figura 27), en ella podremos encontrar graficada el comportamiento de todos los parámetros involucrados en el cálculo del modelo, estos pueden ser visualizados al tiempo mientras se compraran con el comportamiento del MSE para así poder determinar que parámetro tuvo relevancia en la modificación del valor de este, de manera similar a la interfaz anterior, en esta podemos aplicar la opción de que nos muestre las tendencias de cambio del comportamiento de los

parámetros en vez de la gráfica puntual de sus valores, y de esta forma poder analizar lo anteriormente mencionado de una forma más fácil. En esta interfaz también encontramos la opción de “Aceptar” que nos devolverá a la primera interfaz del aplicativo.

Figura 27. Tercera interfaz de MSE_Optimizer.

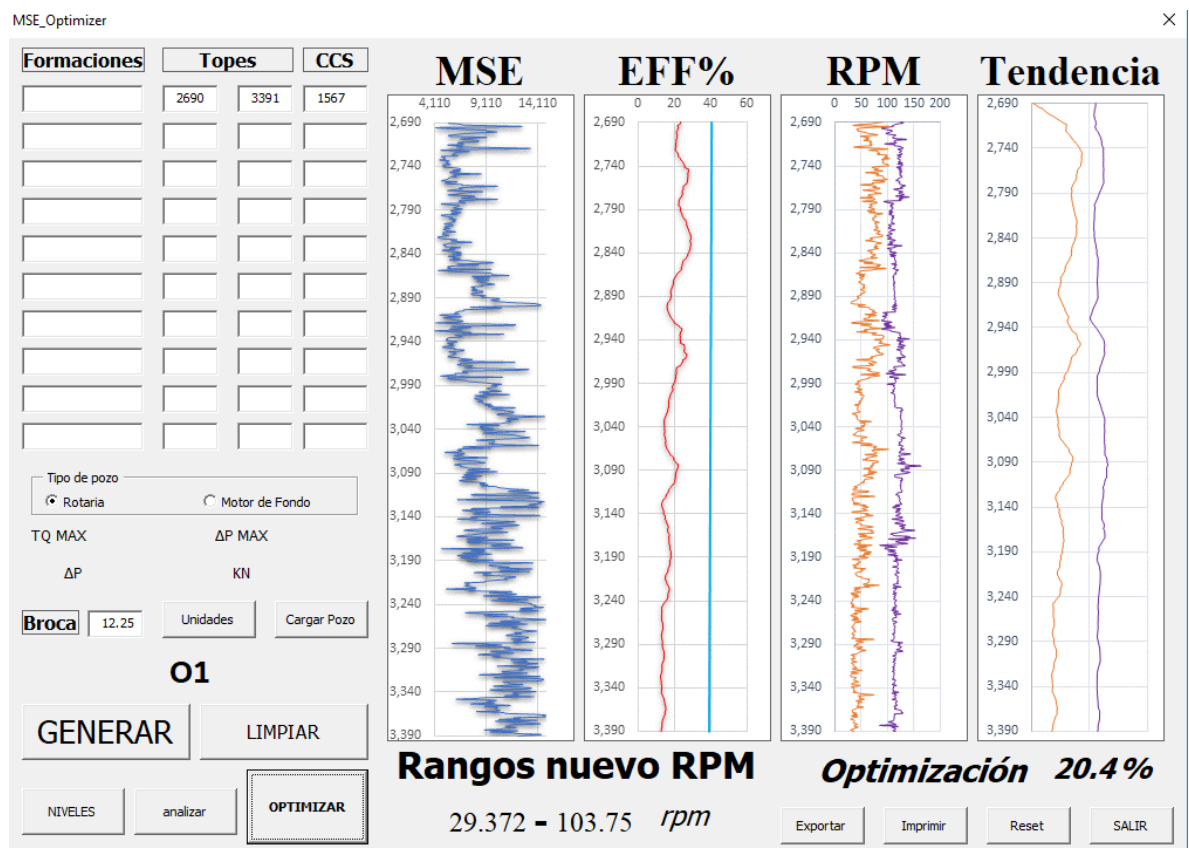


Fuente: MSE_Optimizer.

5.3.4 Interfaz principal-Tercera fase. Una vez realizados los análisis ya mencionados con la ayuda de las segunda y tercera interfaz, procederemos a realizar el reajuste de parámetros con el fin de llegar a la optimización del proceso, para ello pulsaremos la opción “Optimizar” y a lado de las dos graficas ya generadas en la primera parte, aparecerán dos nuevas gráficas (Figura 28), en la primera de ella podremos ver el comportamiento de la nueva RPM

calculada para cada pie de la perforación, enfrentándose directamente a la RPM que se utilizó en el campo al momento de la operación, y en la segunda podremos ver la tendencia de estas dos mismas graficas para poder detallar de manera más fácil y las zonas donde más difieren los valores utilizados y propuestos por el aplicativo.

Figura 28. Interfaz principal de MSE_Optimizer, tercera fase.

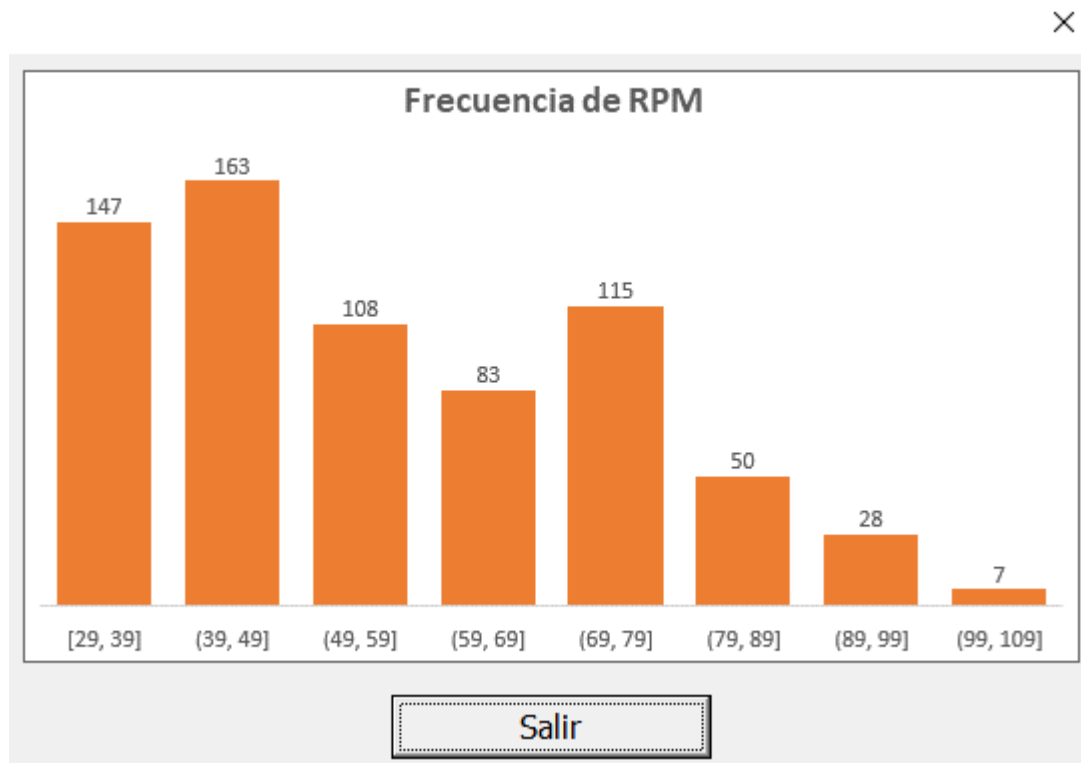


Fuente: MSE_Optimizer.

Adicional a esta información, en la parte inferior de las gráficas aparece la información de la ventana de operación del nuevo RPM, la cual nos ayudará a la hora de planificar las operaciones posteriores y también aparece el porcentaje de optimización que podría lograrse con los nuevos parámetros propuestos por el aplicativo, por último se habilita la opción de “Exportar” la cual al ser

presionada nos permite guardar un archivo .Excel el cual lleva los valores de la nueva RPM para cada pie de la perforación y también se habilita la opción “Histograma”, que al ser presionado nos despliega la cuarta interfaz del aplicativo (Figura 29).

Figura 29. Cuarta interfaz de MSE_Optimizer.



Fuente: MSE_Optimizer.

5.3.5 Cuarta interfaz. En esta interfaz lo que veremos será el histograma de los valores calculados para el nuevo RPM ya optimizado, de esta forma podremos ver en que rangos de RPM se concentran la mayor cantidad de valores óptimos, y de esta forma podemos utilizar esta información para el diseño de futuras pruebas de perforabilidad (Drill off Test) con el fin de poder encontrar también los valores más óptimos para el WOB en la zona analizada. En esta interfaz también encontramos el botón “Salir” que nos regresa a la primera interfaz.

5.3.6 Opciones adicionales. La aplicación cuenta además con una serie de opciones adicionales las cuales tienen como finalidad facilitarnos del uso de esta misma durante el proceso de análisis de los diferentes pozos, estas opciones son:

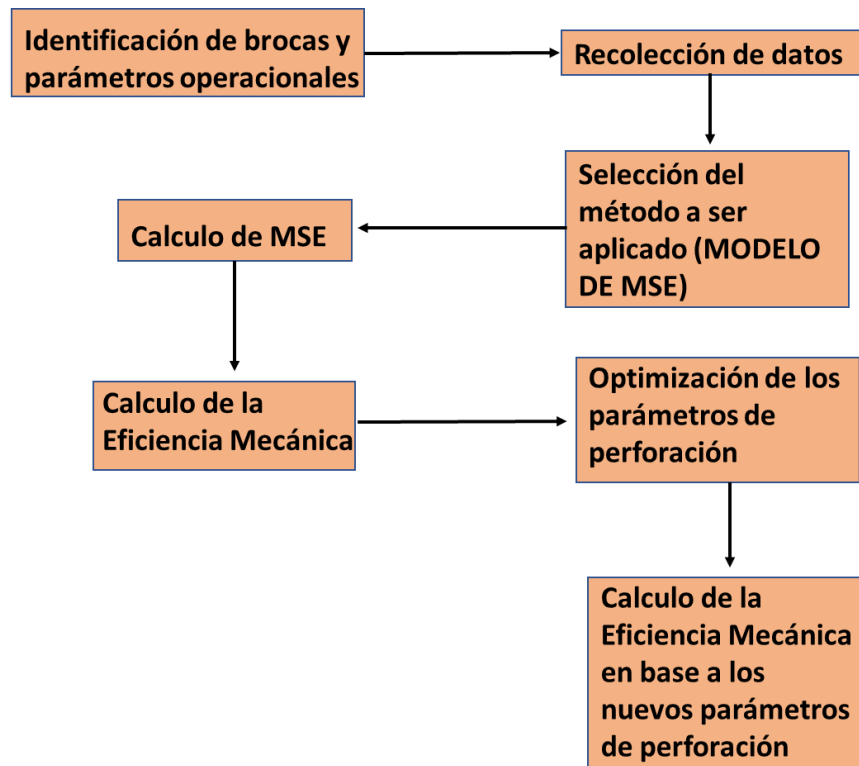
- **Unidades:** Esta opción arroja un cuadro de texto donde están enlistadas todas las magnitudes con las que se trabaja en la aplicación y las diferentes unidades en las cuales deben estar ingresadas, esto con el fin de que al momento de introducir valores los cálculos se realicen de la manera adecuada.
- **Limpiar:** Esta opción nos permite limpiar todos los valores ya introducidos en las diferentes casillas de la aplicación en caso de que se haya cometido un error y se desee empezar nuevamente a introducirlos.
- **Reset:** Esta opción nos permite reiniciar la aplicación desde cero, limpia todas las casillas y borra toda la información que tenga ya cargada, se utiliza para cuando queremos empezar el análisis de otro pozo y no queremos cerrar y abrir el aplicativo.
- **Salir:** Como su nombre lo indica permite cerrar por completo la aplicación, cabe resaltar que esta opción no guarda ningún tipo de información que el aplicativo tenga cargado a la hora de ser ejecutada, por lo que se recomienda estar seguros antes de ser usada.
- **Imprimir:** Esta opción la encontramos en diferentes partes del aplicativo y en sus diferentes interfaces, ella nos permite imprimir las diversas graficas que tengamos generadas al momento de utilizar este comando.

6. METODOLOGÍA APLICADA A LA OPTIMIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE PERFORACIÓN A PARTIR DEL CONCEPTO DE LA ENERGÍA MECÁNICA ESPECÍFICA (MSE)

Se implementa una metodología en base a la selección de entre varios de los modelos de predicción elegidos en función de los parámetros de perforación según la disponibilidad y factibilidad de los requerimientos de cada uno de los métodos; lo que permite la integración del modelo de Energía Mecánica Especifica (MSE) para el cálculo de la eficiencia mecánica del sistema e implementar acciones de optimización en pozos futuros del campo.

El diagrama con la metodología a aplicada se puede apreciar en la Figura 30.

Figura 30. Diagrama de la metodología.



Fuente: Autor.

6.1 CALIDAD DE DATOS DE LOS SISTEMAS DE ADQUISICIÓN DE LOS TALADROS

Uno de los problemas principales al realizar análisis o cálculos basados en la data de los taladros de perforación surge al cuestionar su calidad o cercanía con la realidad de la operación. Siempre se van a presentar imprecisiones y data con magnitudes anormales que surgen por el medio en el que se realizan las mediciones o por las mismas asunciones de los sistemas que recogen y calculan estos parámetros.

6.1.1 Torque. Este parámetro por ser uno de los que mayor peso tiene en las ecuaciones de MSE tiene una relevante importancia a la hora de estudiar su calidad y precisión de medición.

Actualmente en Colombia existen dos tipos de generadores de potencia para los Top Drive, el primero basado en corriente eléctrica tipo AC o DC que normalmente viene para equipos grandes como los taladros de 1000 caballos con Top drive superiores a 750 caballos y los taladros pequeños con top Drive hidráulicos inferiores en su mayoría 1000 caballos y 750 caballos para el top drive. Cada uno de estos tiene sus características particulares, pero abordaremos su explicación en dos grupos, eléctricos e hidráulicos.

6.1.1.1 Eléctricos. En este tipo de Top Drive la medición es más sencilla y se realiza por medio de una pinza que mide el amperaje que pasa por uno de los principales cables de alimentación del Top Drive. Normalmente este tipo de medición es fácil de realizar y regularmente acertada, sin embargo, es muy susceptible a temas de humedad y corrientes parásitas, debido a que esta es una interpretación directa de la potencia eléctrica, cualquier variación por fuentes externas o corto por humedad puede verse reflejado en valores erráticos que se disparan momentáneamente o continuamente dando como resultado

malas interpretaciones de torque errático o picos de torque que no provienen de la operación.

Para este tipo de data es indispensable descartar este tipo de comportamientos por la observación directa en campo de la instalación de los instrumentos, y el estudio de la data y su correlación con el clima presentado o la activación y desactivación de elementos eléctricos que pudieran ingresar ruido eléctrico en las mediciones.

6.1.1.2 Hidráulicos. Este tipo de top drives, funcionan con una unidad hidráulica a la cual se le instala un medidor directo de presión y se logra llegar a la magnitud real del torque por medio de las tablas de potencia del top drive que son únicas para cada modelo.

Este tipo de cálculo presentan un reto continuo en la medición correcta de este parámetro púe estas tablas pocas veces están disponibles y por lo general no se socializan con el personal de Mug Logging, realizando una calibración de cercanías por medio del sistema lo que lleva a mediciones completamente tendenciosas y erróneas de este tipo de equipos.

Para este caso en particular HOCOL le solicitó a Datalog su contratista Mud Logging el desarrollo de un motor de calculo que realice correctamente la interpretación de las diferentes tablas del Top Drive y las interpolaciones necesarias para llevar desde los valores tabulados hasta los más cercanos posibles.

Con este tipo de desarrollo la data suministrada de torque goza de una calidad superior y magnitudes creíbles dentro de la operación, sin embargo, los Top drive funcionan en dos o tres regímenes de potencia y los cambios que se

avisan en la mesa a requerimiento del perforador, algunas veces no son avisados a la unidad de Mud Logging, en estos casos es inevitable el error.

6.1.2 RPM. Actualmente la medición se realiza de forma muy rudimentaria por medio de un sensor de inducción conectado por cable desde el top drive pasando el “Maguerote” o “Servi Lube” dando espacio a múltiples problemas de señal.

Debido a su configuración como medición por sensor de inducción, el buen posicionamiento es indispensable, así como la protección a los factores climáticos en cada una de sus conduletas (Conexiones), así mismo este tipo de configuraciones es sensible a ruido eléctrico y más comúnmente a la destrucción del cable de señal por fricción o atrapamiento con alguno de los elementos en constante movimiento de la torre.

Esta data se debe revisar para eliminar picos momentáneos provenientes de ruido eléctrico o pequeños cortos originados por el atrapamiento del cable y destrucción de su enchaquetado, que se confundan con drilling Brakes que den impresiones erróneas de la operación. También es indispensable encontrar lecturas muy planas que reflejarían la simulación de dicho parámetro lo que es muy común debido a lo habitual del fallo del cableado y la dificultad de cambiarlo con rapidez en medio del rigor de la operación.

6.1.3 WOB. Este parámetro realmente es el resultado del cálculo entre un peso teórico de sarta vs el peso real medido por medio de una interpretación de la tensión en la línea muerta del taladro que realiza el “Hook Load”.

De forma particular este sensor es uno de los que menos problemas presenta en las operaciones sin que sea totalmente inmune al clima, la intemperie y las corrientes parásitas (Uno de sus problemas comunes).

La data generada se debe estudiar con mucho cuidado pues presenta errores muy frecuentes en el reinicio de la perforación, donde las variaciones en las mediciones debido al estado de la sarta con respecto a su peso bajando influencia fuertemente este parámetro. Normalmente la sarta se gira y circula para llevarla a punto neutro antes de regresar a fondo a perforar después de cada una de las conexiones o de cada una de las operaciones que requieran retirar la broca de fondo, si la operación se realizó correctamente el peso medido por el sensor debe ser igual al anteriormente leído antes de levantar la broca de fondo, por lo que en teoría el WOB cuando se ponga peso sobre la broca debe ser igual o tender a valores muy cercanos. Sin embargo, es muy común observar que las mediciones cambiaron drásticamente y esto se debe principalmente a que el perforador realiza constantemente ajustes al “Martin Decker” de forma manual y basados en su observación, situación que no puede ajustar el sistema y de la cual nunca o raramente se advierte a la unidad de Mud Logging. Debido a esto es muy común realizar ajustes al peso desde el sistema luego de reiniciar la perforación y observar el cambio en los valores, lo que deja escritos en la base de datos en tiempo y profundidad valores con magnitudes muy inferiores o muy superiores a las realmente operadas. Por lo tanto, es indispensable la verificación de esta data y la correlación con la posición del bloque tratando de encontrar valores erróneos concordantes a las profundidades y momentos inmediatos luego de las conexiones.

6.1.4 ROP. Este último parámetro es vital para cualquier tipo de interpretación directa o de cálculo sobre la data recogida. Debido a esto es una de las datas que mejor se debe filtrar evitando valores falsos que lleven a asunciones equivocadas del desempeño de la perforación o peor aún de la respuesta de los parámetros a la geología presente.

Este nuevamente es un dato que llega de un cálculo realizado por un “Encoder” (contador de pasos) que va montado directamente al eje del malacate y el cual

utiliza información como diámetro de línea, diámetro de tambor, número de vueltas por capa y cantidad de capas y vueltas iniciales para calcular correctamente el sensor. Como se podrá entender si alguno de estos parámetros está incorrectamente suministrado el cálculo de la profundidad estará erróneo y por ende el del ROP también.

De esta data lo más importante es identificar los falsos “Drilling Brakes” que se generan al reactivar la perforación, es decir justo después de realizar conexión o de levantar la broca de fondo. Este tipo de disparos de ROP se presentan debido a pequeñas imprecisiones en el sensor al realizar un movimiento de subida del Gancho o de regreso a fondo, donde si los valores no son concordantes se asume una falsa posición de la sarta dando como resultante valores muy elevados de ROP o en una menor medida valores de cero, a pesar de ya estar perforando. Para filtrar correctamente esta data es necesario correlacionar la posición del gancho con los eventuales valores anómalos y corregir esa data.

Como siempre este tipo de sensores es muy susceptible a ruido eléctrico y factores como el clima y la intemperie, así como su aseguramiento al giro, por lo que se debe verificar muy bien su correcta instalación y aseguramiento.

6.2 CÁLCULO DE LA ENERGÍA MECÁNICA ESPECÍFICA (MSE)

Debido a la alta factibilidad del modelo de Energía Mecánica Específica (MSE), se implementa, la metodología según los requerimientos mencionados anteriormente con la finalidad de conocer las causas que provocan ineficiencia en el proceso de la perforación.

Los datos para el cálculo de la Energía Mecánica Específica (MSE) son pie a pie y obtenidos de la data suministrada por HOCOL S.A. con parámetros reales de Wellwizard (DataLog) de varios pozos (O1, O2, O3, O4, O5, O6), estos pozos pertenecen a uno de sus campos (Académico) ubicado en la cuenca de los llanos orientales, los cuales fueron perforados durante el año 2017. Cabe resaltar que debido a la confidencialidad de la operadora esta data fue suministrada a manera de ejercicio académico con el fin de apoyar en el desarrollo y evaluación de la metodología, por ende, la operadora se reserva los nombres reales y ubicaciones geográficas exactas de los datos, aunque certifica que estos son reales y fueron tomados durante la ejecución de los procesos de perforación.

Por otro lado es relevante aclarar que de todas las diferentes formaciones que se encuentran en la data suministrada, se tomó la decisión de analizar únicamente la sección perteneciente a la formación León, la cual va entre los 2.600 ft y los 3.300 ft de profundidad aproximadamente, esto debido a que las características estructurales que presenta dicha formación son las más consistentes y homogénea entre todas las que se poseen, y se considera que a manera de estudio pueden arrojar resultados más lineales y fáciles de entender.

El concepto de Energía Mecánica Específica (MSE) está en función de parámetros de perforación como se expresa en la fórmula (4.1).

$$MSE = \left(\frac{480 * T * RPM}{D^2 * ROP} \right) + \left(\frac{4 * WOB}{\pi * D^2} \right)$$

6.2.1 Ejemplo de cálculo de la energía mecánica específica (MSE).

- Se toman los parámetros de perforación (WOB, Torque, RPM y ROP) registrados en las diferentes profundidades durante la perforación de los

pozos y se introducen en el modelo de MSE para obtener un valor de este por cada pie perforado.

$$MSE = \left(\frac{480 * T * RPM}{D^2 * ROP} \right) + \left(\frac{4 * WOB}{\pi * D^2} \right)$$

$$MSE = \left(\frac{480 * (1000 * 8.38) * (116.48)}{(12.25)^2 * (432)} \right) + \left(\frac{4 * (1000 * 28.4)}{\pi * (12.25)^2} \right)$$

$$MSE = 7.468,34 \text{ psi}$$

Tabla 2. Parámetros de perforación y MSE reales.

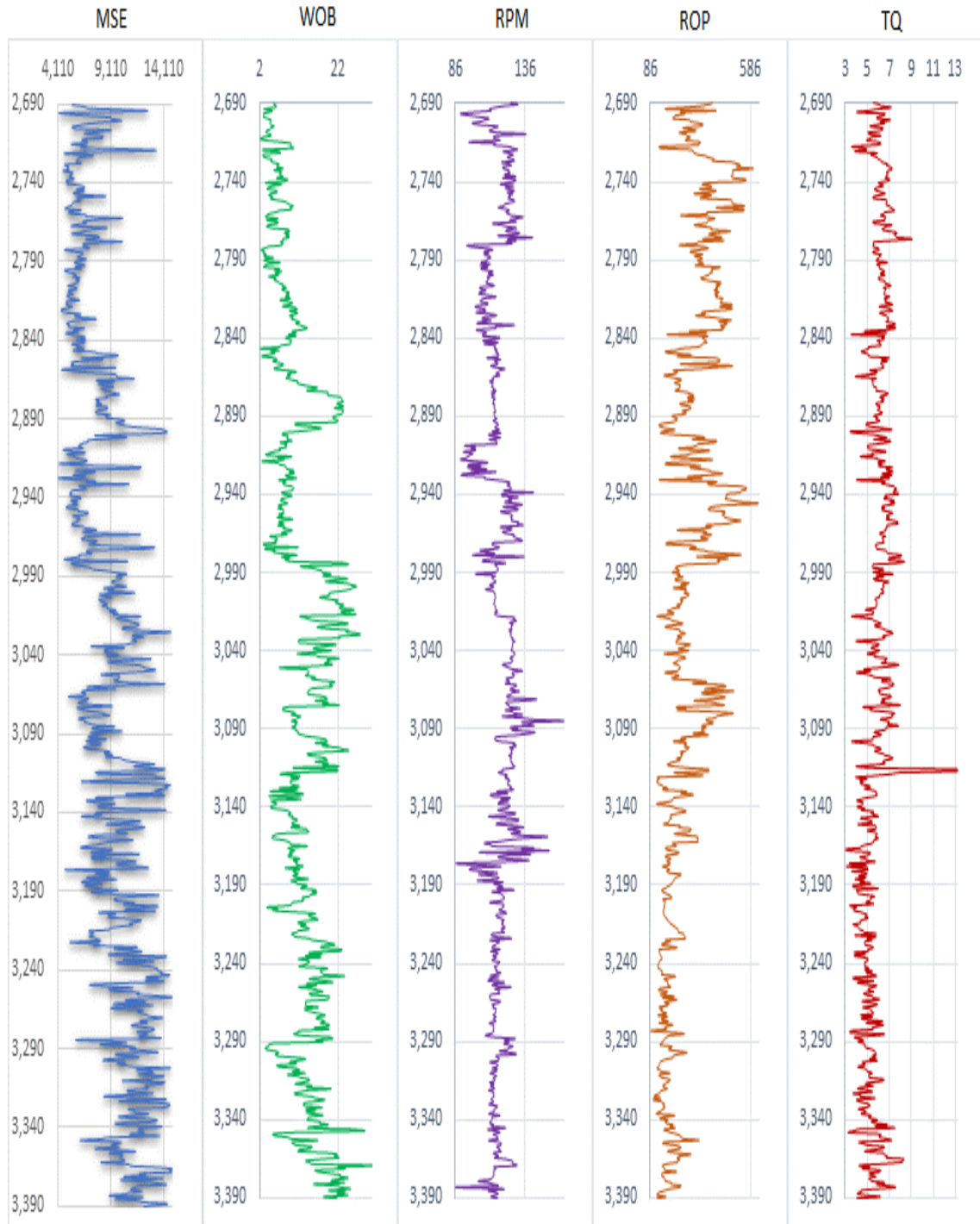
DEPTH (ft)	WOB (KI-Lb)	RPM (rev/min)	ROP (ft/hr)	TQ (K.Lb-ft)	MSE (psi)
2670	28.40	116.48	432.00	8.38	7468.34

Fuente: Autor.

- Se realiza para cada pozo las gráficas de los valores de MSE vs Profundidad, y se enfrentan a las gráficas de los distintos parámetros que generaron el valor del MSE (Figuras 31, 32, 33, 34,35, 36).

PARAMETROS POR POZO (SECCIÓN 12 ¼") DEL CAMPO ACADEMICO

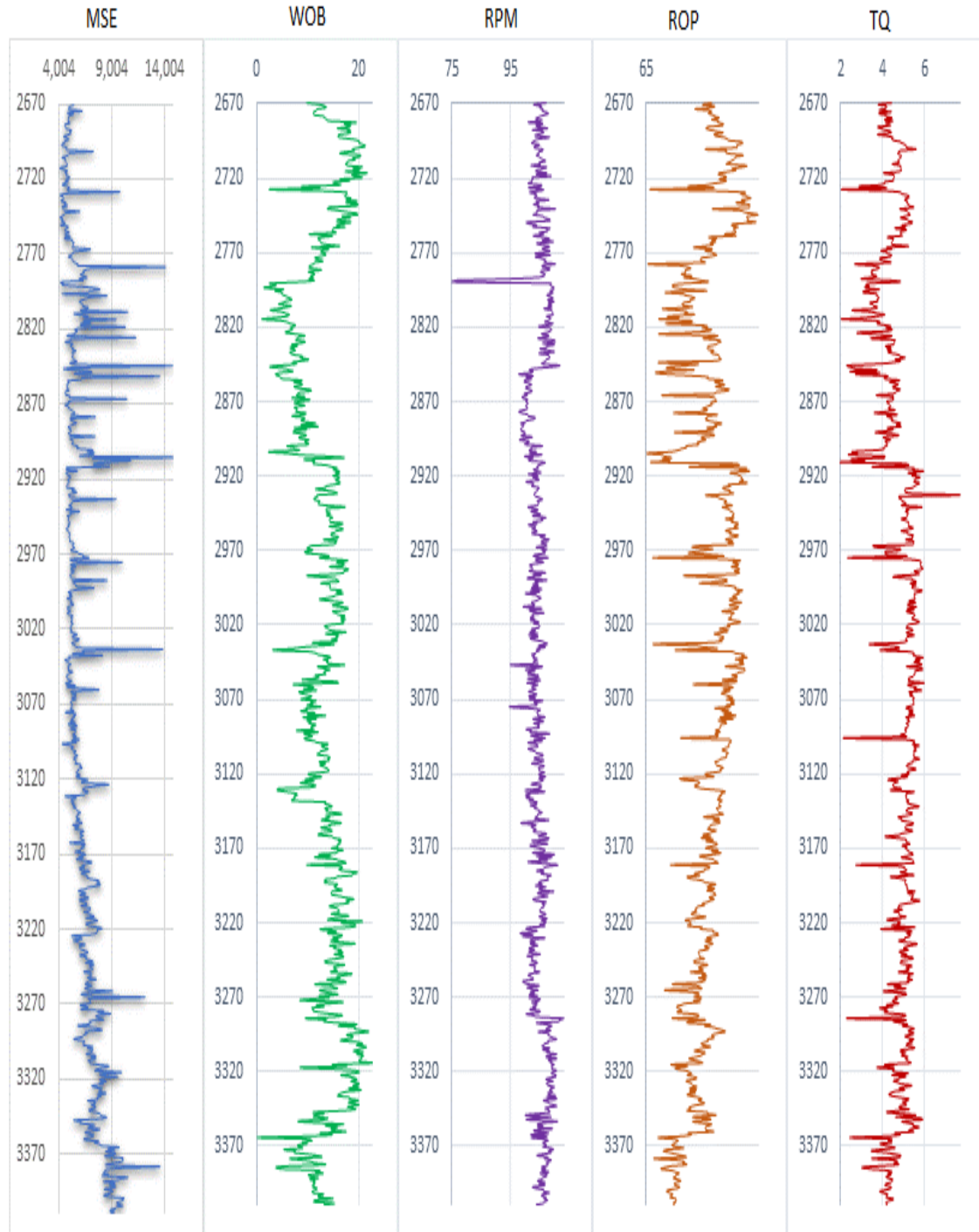
Figura 31. MSE y Parámetros - POZO (O1).



Fuente: MSE_Optimizer.

PARAMETROS POR POZO (SECCIÓN 12 ¼") DEL CAMPO ACADEMICO

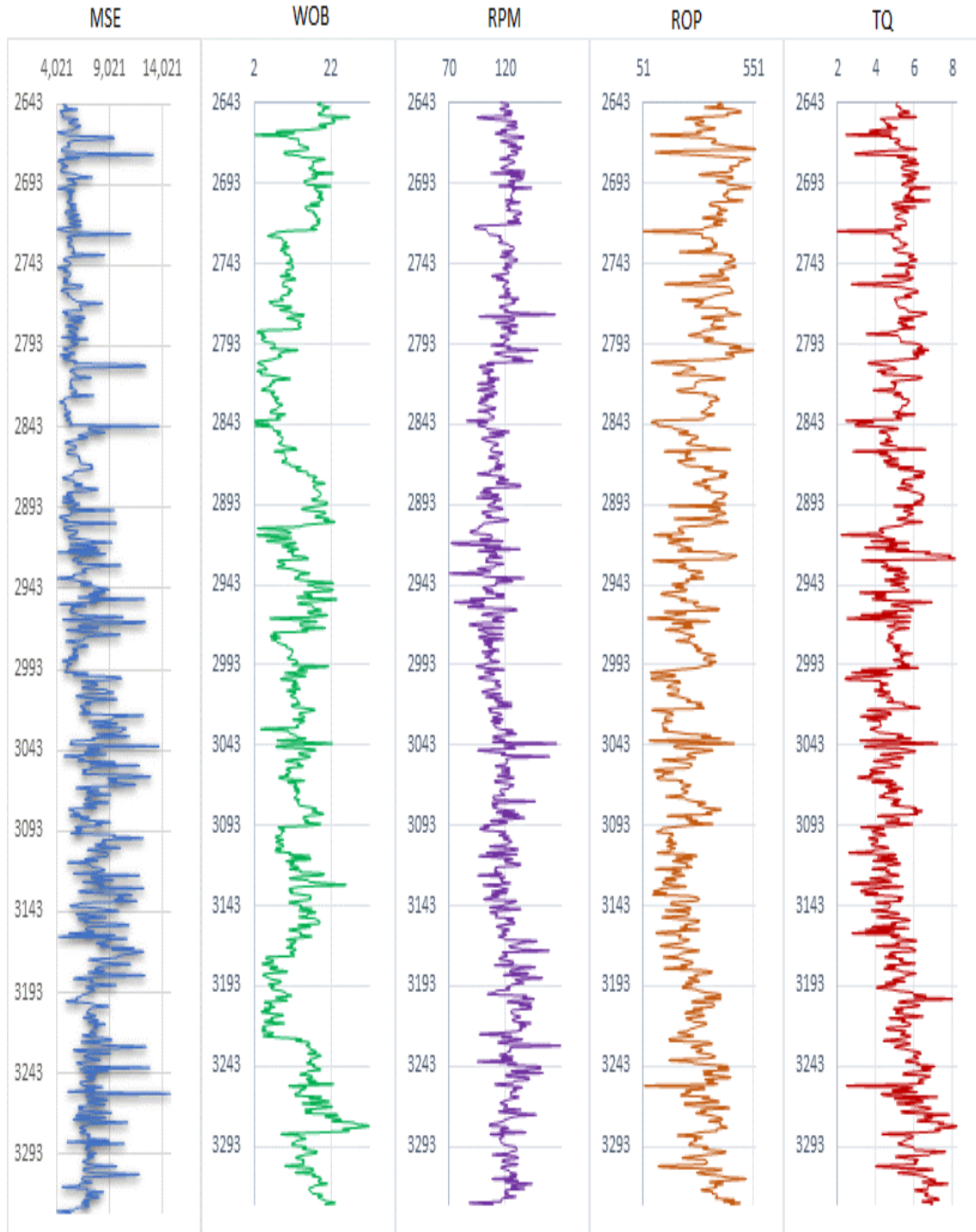
Figura 32. MSE y Parámetros - POZO (O2).



Fuente: MSE_Optimizer.

PARAMETROS POR POZO (SECCIÓN 12 ¼") DEL CAMPO ACADEMICO

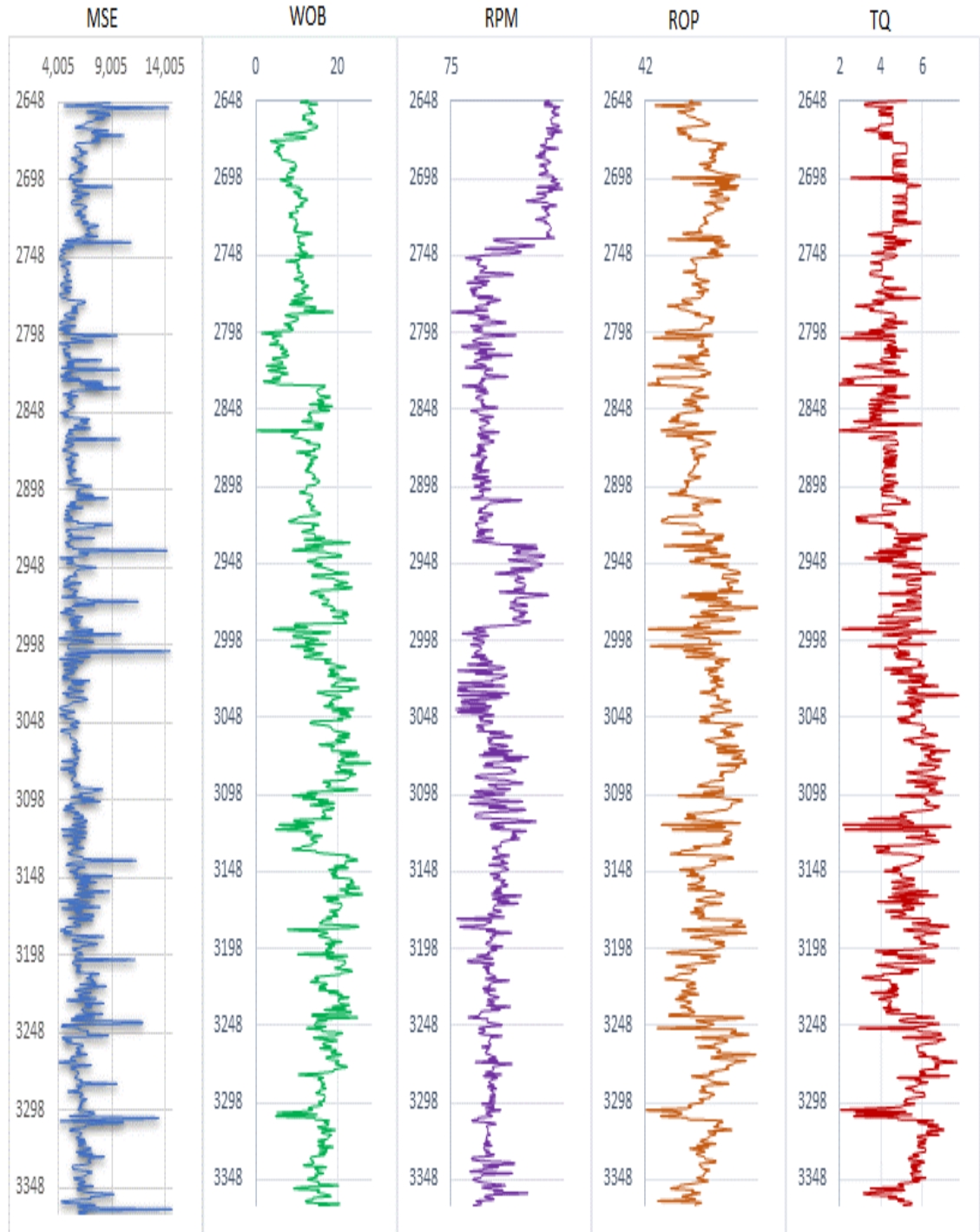
Figura 33. MSE y Parámetros - POZO (O3).



Fuente: MSE_Optimizer.

PARAMETROS POR POZO (SECCIÓN 12 ¼") DEL CAMPO ACADEMICO

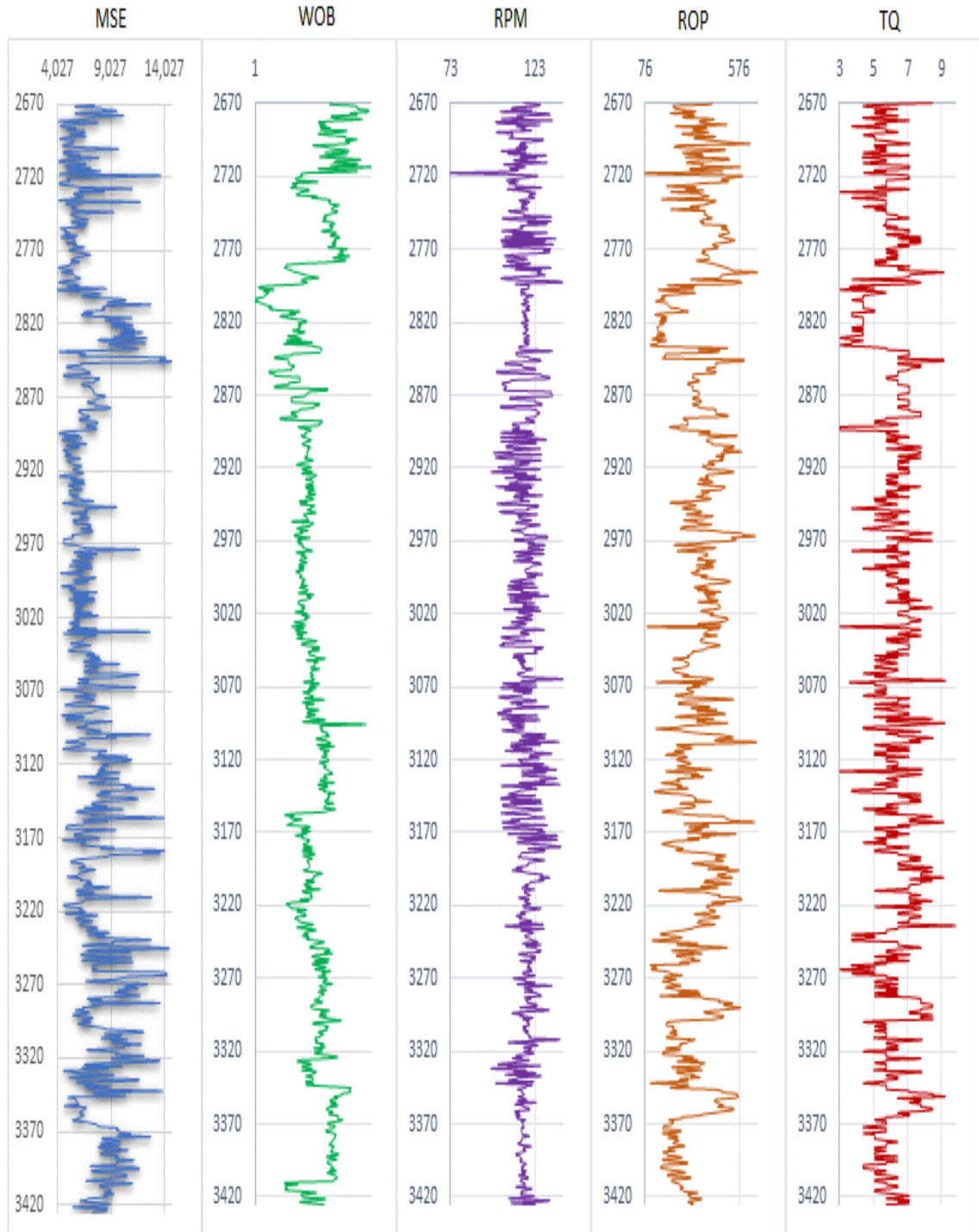
Figura 34. MSE y Parámetros - POZO (O4).



Fuente: MSE_Optimizer.

PARAMETROS POR POZO (SECCIÓN 12 ¼") DEL CAMPO ACADEMICO

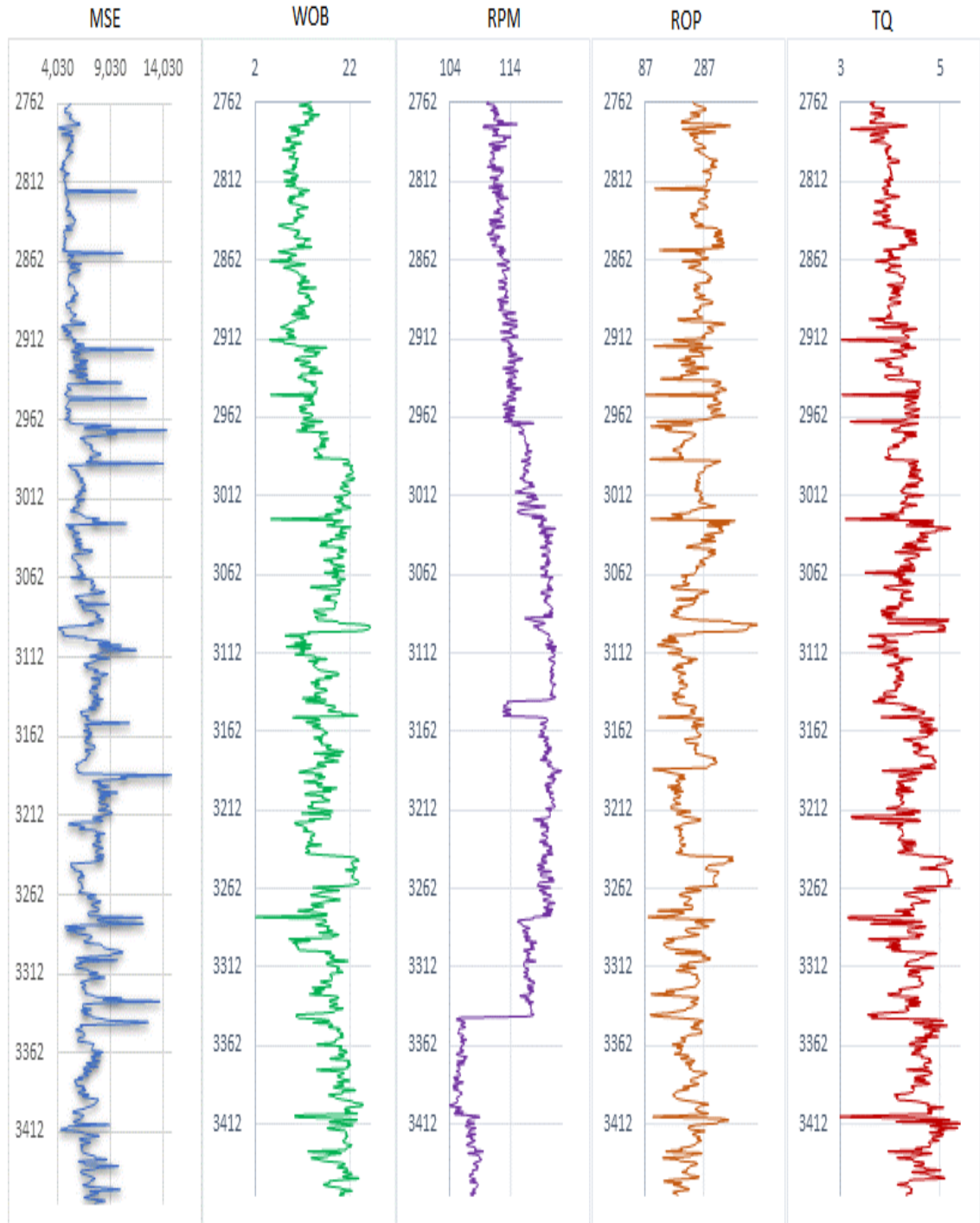
Figura 35. MSE y Parámetros - POZO (O5)



Fuente: MSE_Optimizer.

PARAMETROS POR POZO (SECCIÓN 12 ¼") DEL CAMPO ACADEMICO

Figura 36. MSE y Parámetros - POZO (O6).



Fuente: MSE_Optimizer.

Pudimos observar en todas las imágenes, la tasa de penetración está inversamente relacionada con el MSE, es decir, en las zonas donde el MSE se dispara o es mayor, obtenemos valores de ROP bajos, y en las zonas donde el MSE es bajo, obtenemos muy buenos valores de ROP. Como el ROP nos indica con que velocidad atravesamos cada unidad de roca, entonces lo que vamos a querer son valores altos de ROP o lo que es lo mismo, valores bajos de MSE, y para ello tendremos que recalcular los parámetros en busca de disminuir este valor hasta el valor mínimo posible que vendría siendo el valor del CCS de la roca a destruir.

6.3 CÁLCULO DE LA EFICIENCIA MECÁNICA (EFF_m)

En base al modelo de Energía Mecánica Especifica (MSE), se estima la Eficiencia Mecánica (EFF_m) con la que se perforaron los pozos (O1, O2, O3, O4, O5 Y O6) para evaluar y reajustar los parámetros comúnmente empleados en condiciones reales.

6.3.1 Ejemplo de cálculo de la eficiencia mecánica (EFF_m)

Con la ecuación (4.4) del Capítulo 4.

$$EFF_m = \frac{CCS}{MSE} * 100$$

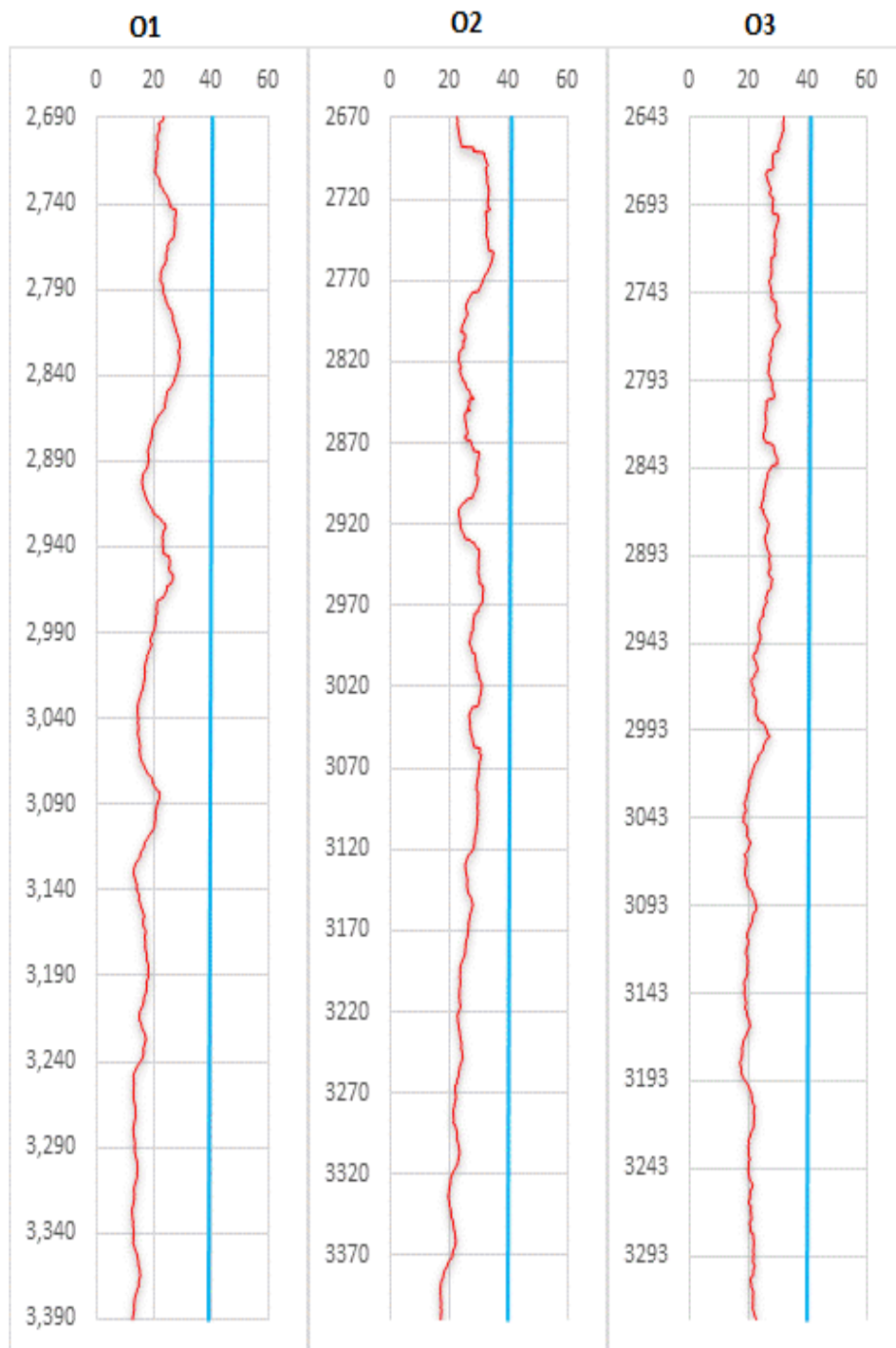
$$EFF_m = \frac{1567}{7468.34} * 100$$

$$EFF_m = 20.08 \%$$

- Se calcula el valor de la EFF_m por cada pie de perforación para los diferentes pozos, se aplica un proceso de suavizado de datos (Media Móvil) para poder visualizar la tendencia de estos y se grafican teniendo como valor de referencia el 40% de EFF_m ya que este es el máximo valor ideal a alcanzar (Figuras 37, 38).

EFF_m POR POZO (SECCIÓN 12 ¼") DEL CAMPO ACADEMICO

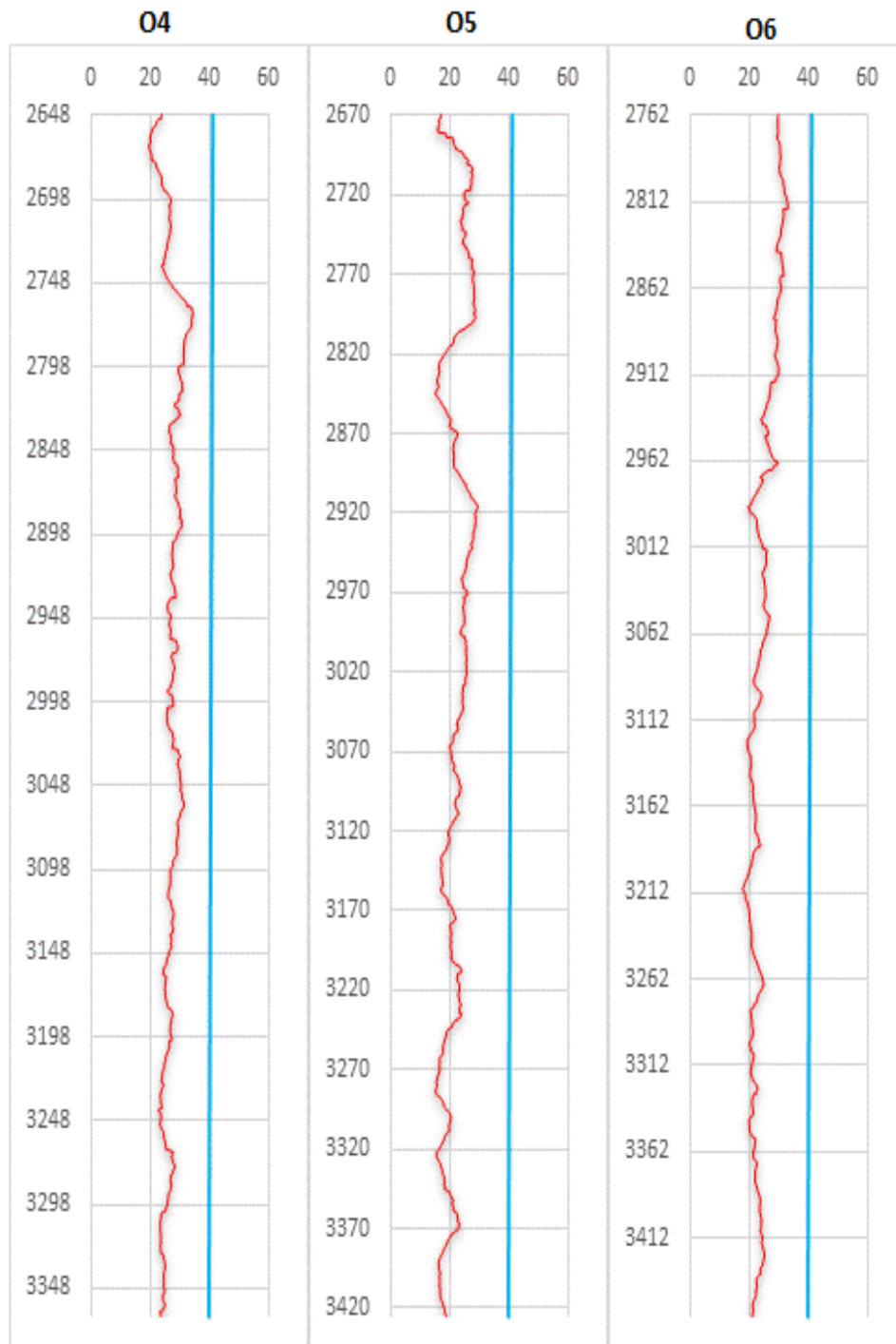
Figura 37. EFF_m POZO (O1, O2, O3).



Fuente: MSE_Optimizer.

EFF_m POR POZO (SECCIÓN 12 ¼") DEL CAMPO ACADEMICO

Figura 38. EFF_m POZO (O4, O5, O6).



Fuente: MSE_Optimizer.

Los resultados de eficiencia calculados en los intervalos analizados de los pozos (O1, O2, O3, O4, O5 Y O6) del campo Académico muestran valores bajos a los esperados, lo que indica una clara oportunidad de optimización. En resumen, los rangos aproximados oscilan entre 19% y 27%.

La teoría de la Energía Mecánica Específica (MSE), descrita en los capítulos anteriores y en función de los estudios realizados en laboratorio y campo para la determinación de los diferentes métodos descritos, concluyen y demuestran que la eficiencia óptima para la perforación de un pozo debería estar en el orden del 35 a 40%. Es decir, que toda la energía del sistema involucrada en la perforación se disipa aproximadamente en un 60% en factores como: fricción, top drive, circulación, remoción, trayectoria, etc., mientras que solo este 35 o 40% pertenece a los propios parámetros de perforación.

El caso real en el campo ACADEMICO, es que se disipa más del 75% de la energía utilizada y únicamente se emplea el resto de la energía a los parámetros de perforación para realizar el agujero.

Por este motivo se deben reajustar los parámetros de perforación para incrementar la eficiencia y alcanzar el valor óptimo ideal del 35 a 40% para un sistema de perforación eficiente.

6.4 ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS RECOMENDADOS

En una perforación, los parámetros directamente modificables lo constituyen el peso sobre la broca (WOB), las revoluciones por minuto (RPM) y el caudal (Q). Otros parámetros como el torque, la tasa de penetración y la presión diferencial, constituyen una consecuencia de la magnitud de cómo se aplican los anteriores parámetros mencionados y de otros factores y condiciones del pozo (fluidos,

trayectoria, litología, etc). Por este motivo, y de acuerdo a nuestros modelos de MSE, los parámetros que se recomendarían modificar serían el peso sobre la broca y la RPM. Ya que son los más influyentes dentro de la perforación y los que mejor se ajustan a la aplicación del concepto de energía mecánica específica. Pero debido a que la RPM modifica directamente la componente rotacional del modelo y esta tiene una relevancia casi del 90% del total del valor calculado, se toma la decisión de modificar este parámetro para así alcanzar valores de eficiencias cercanas a lo ideal.

- En la ecuación (4.4) Eficiencia mecánica, colocamos el MSE de la ecuación (4.1), para luego despejar la variable de RPM y obtener así la ecuación (6.0) la cual sirve para calcular el nuevo valor de la RPM que genere una eficiencia óptima.

$$NEW_{RPM} = \frac{D^2 * ROP * \left[\frac{CCS}{EFF_m} - \frac{4 * WOB}{D^2 * \pi} \right]}{480 * T} \quad (6.0)$$

Donde:

CCS = Resistencia Compresiva Confinada de la roca, (psi).

EFF_m = Eficiencia mecánica, (%).

T = Torque, (Lbf.ft).

RPM = Revoluciones por Minuto de la Broca, (rev/min).

WOB = Peso sobre la Broca, (Lbf).

ROP = Tasa de Penetración, (ft/hr).

D = Diámetro de la Broca, (pulg).

6.4.1 Ejemplo de cálculo del nuevo rpm. En la formula (6.0) se colocan los demás valores correspondientes a la profundidad a la cual se quiere calcular la nueva RPM, el valor del CCS y se escoge una eficiencia mecánica de 0.4 debido a que este es el valor ideal de eficiencia para operaciones de perforación.

$$NEW_{RPM} = \frac{D^2 * ROP * \left[\frac{CCS}{EFF_m} - \frac{4 * WOB}{D^2 * \pi} \right]}{480 * T}$$

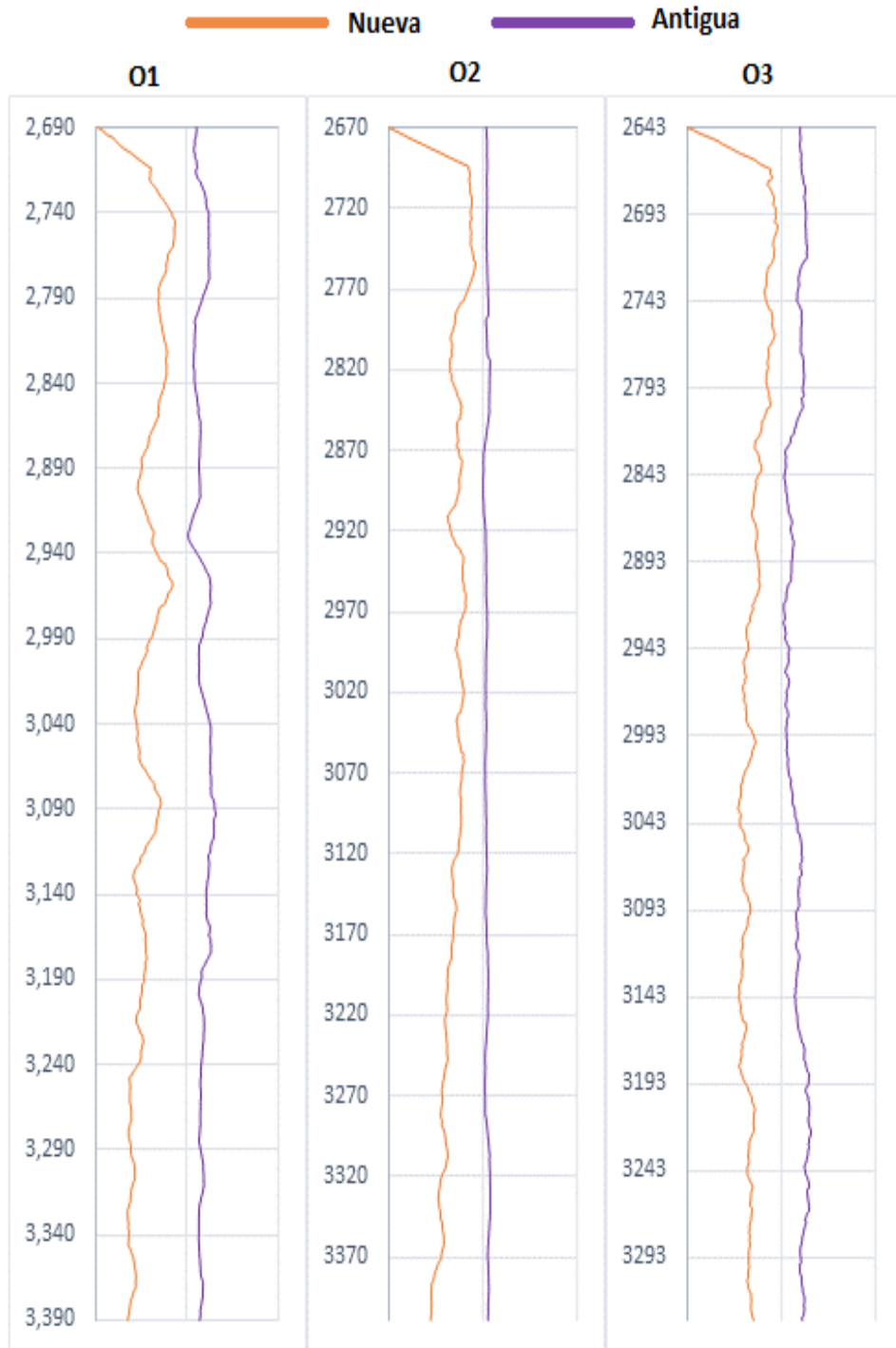
$$NEW_{RPM} = \frac{12.25^2 * 432 * \left[\frac{1567}{0.4} - \frac{4 * (1000 * 28.4)}{12.25^2 * \pi} \right]}{480 * (1000 * 8.38)}$$

$$NEW_{RPM} = 59.25 \text{ rev/min}$$

- Se realiza para cada pozo las gráficas de los valores de la nueva RPM vs la antigua RPM, se les aplican a estas graficas un proceso de suavizado (Media Móvil) para así poder observar como difieren la una de la otra y sus respectivas tendencias (Figura 39, 40).

Nueva RPM vs antigua RPM (SECCIÓN 12 ¼") DEL CAMPO ACADEMICO

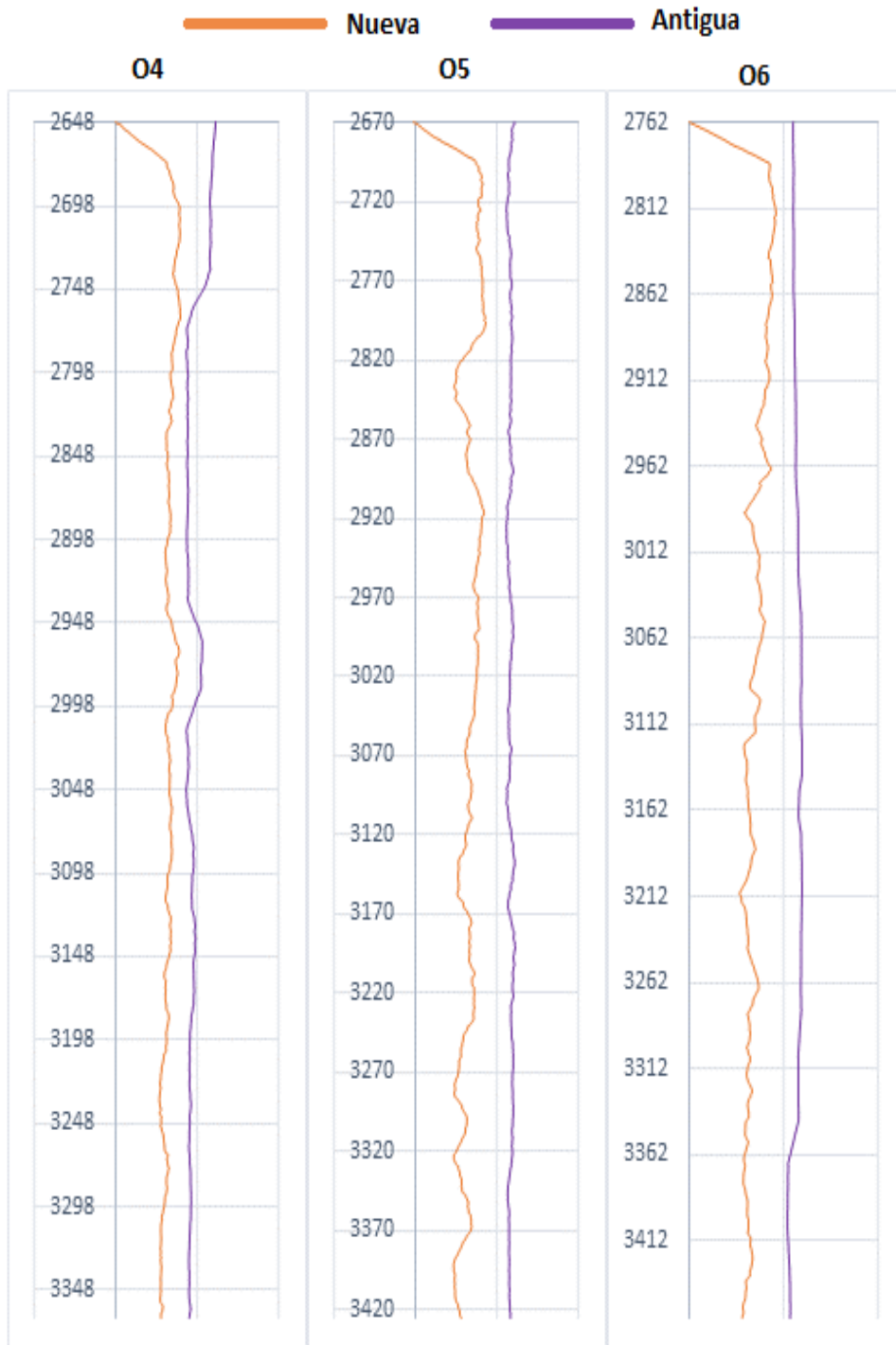
Figura 39. RPM POZO (O1, O2, O3).



Fuente: MSE_Optimizer

Nueva RPM vs antigua RPM (SECCIÓN 12 ¼") DEL CAMPO ACADEMICO

Figura 40. RPM POZO (O4, O5, O6).



Fuente: MSE_Optimizer.

Los pozos O2 y O4 son los que presentan menor distanciamiento entre sus curvas de RPM, lo que indica que los valores utilizados durante sus perforaciones fueron bastante cercanos a lo ideal, por otro lado, el pozo O1 presenta grandes espacios entre sus curvas, lo que nos lleva a inferir visualmente que este pozo se alejó bastante del escenario más óptimo.

6.5 ESTIMACIÓN DE LA OPTIMIZACION ALCANZADA

Para poder cuantificar el valor de la optimización lograda a través de los nuevos valores de RPM, primero debemos averiguar el valor general de la eficiencia de cada uno de los pozos, para esto lo que hacemos es sumar el valor de la eficiencia mecánica en cada pie perforado y dividir dicha cantidad entre el número de pies, una vez obtenido este dato, lo consideraremos como el valor general de la eficiencia de toda la perforación. Como la eficiencia general de toda la perforación utilizando los nuevos valores de RPM es de 40%, lo que haremos a continuación será obtener la diferencia entre 40 y la eficiencia general del pozo ya obtenida en el paso anterior, y este valor calculado representa el porcentaje de optimización generada con los nuevos parámetros de perforación.

6.5.1 Ejemplo de cálculo de la optimización alcanzada.

- Al sumar el valor de las EFF_m calculadas en cada pie de perforación de la formación León del pozo O1, obtenemos un total de 13.689,2.
- El número de pies perforados en la formación León del pozo O1 es 701 ft.

$$EFF_{General} = \frac{13689.2}{701}$$

$$EFF_{General} = 19.53$$

$$Optimizacion = 40 - EFF_{General}$$

$$Optimizacion = 40 - 19.53$$

$$Optimizacion = 20.47 \%$$

- Se realiza esta misma operación para los 6 campos y se organizan sus resultados en una tabla.

Tabla 3. Porcentaje de Optimización. Campo Académico, Pozo (O1, O2, O3, O4, O5, O6).

Pozo O1	Pozo O2	Pozo O3	Pozo O4	Pozo O5	Pozo O6
20.47%	13%	15.30%	12.20%	16.80%	14.90%

Fuente: Autor.

Como se observa, los pozos O2 y O4 presentan los menores valores de optimización, mientras que el pozo O1 presenta el mayor valor, pero a diferencia de lo que el sentido común nos pueda hacer creer, en este caso entre menor sea el valor optimizado mayor el grado de acierto de eficiencia que los parámetros utilizados brindaron a la operación; esto quiere decir que los parámetros utilizados en los pozos O2 Y O4 se acercan más al escenario ideal de perforación, por lo se recomendaría tenerlos en cuenta a la hora de planificar futuras operaciones en la misma zona y al mismo tiempo tratar de despreciar los parámetros utilizados en el pozo O1.

6.6 MONITOREO EN LA OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DE PERFORACIÓN MEDIANTE EL MSE

Es difícil evaluar definitivamente el rendimiento de la tasa de penetración (ROP). Sin embargo, la ROP a menudo está limitada por factores que el perforador no controla concurrendo a una serie de pruebas para optimizar dicho rendimiento. La prueba más común utilizada es la prueba de la perforabilidad (DRILLOFFTEST). En cierto sentido, todos los esquemas de optimización emplean un proceso comparativo similar, desarrollados para predecir el comportamiento de la tasa de penetración (ROP). Estas herramientas han mejorado el rendimiento, pero no proporcionan una evaluación objetiva de la verdadera tasa de penetración (ROP) potencial. Es por ello que se incluyen pruebas implementando el concepto de Energía Mecánica Específica (MSE) al demostrar que en algunos casos el rendimiento máximo real que se podría lograr con un sistema dado era sólo el 10% de lo que era técnicamente posible¹¹.

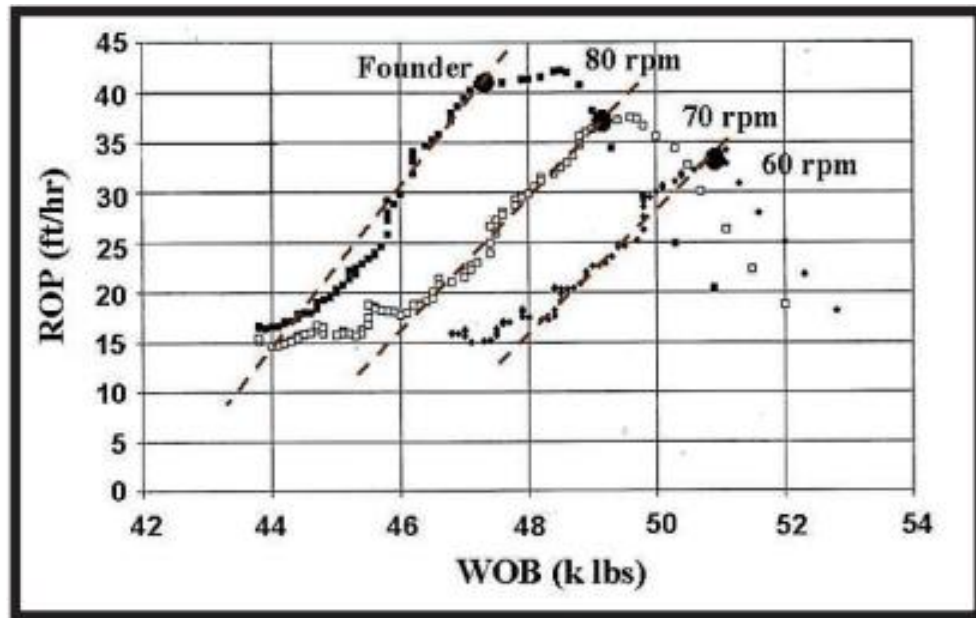
La Figura 41 muestra datos de campo de tres pruebas Drill Off-Test con la broca insertada. El punto en el que la tasa de penetración (ROP) deja de responder linealmente con el aumento de peso sobre la broca (WOB) se conoce como el "Founder Point ". Es lo que se requiere para ser el peso óptimo en la broca¹².

La curva de Drilloff-Test se utilizará para ayudar a explicar la forma en que la energía Mecánica Específica (MSE) se usa operacionalmente.

¹¹ DUPRIEST, F. KOEDRITZ, L. maximizing drill rates with real-time surveillance of mechanical specific energy, año 2005 p.1.

¹² DUPRIEST, F. KOEDRITZ, L. maximizing drill rates with real-time surveillance of mechanical specific energy, año 2005 p.1.

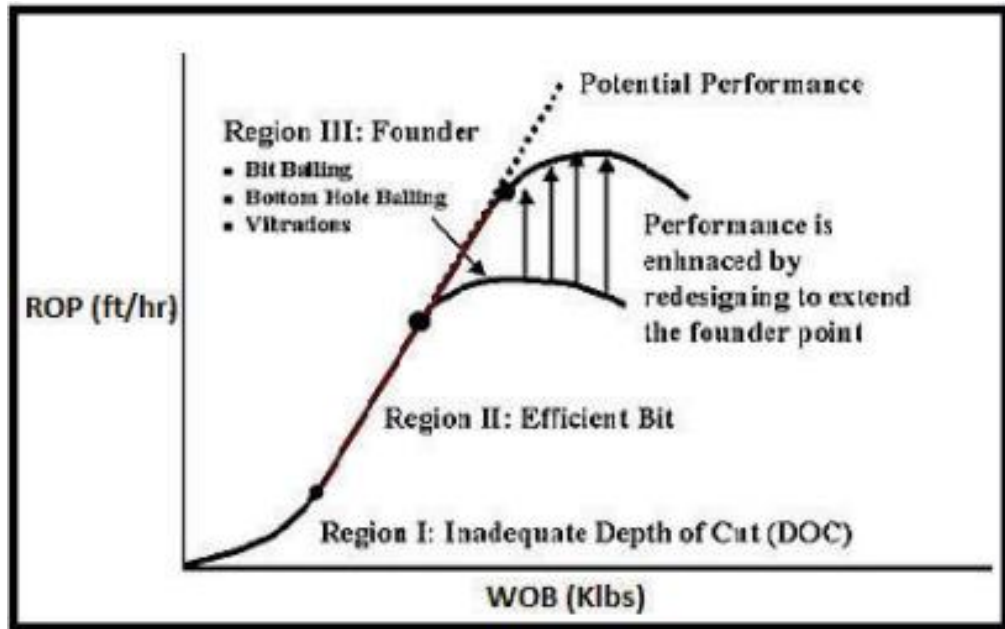
Figura 41. Prueba de Drill-Off-Test.



Fuente: Fred E. DuPriest, ExxonMobil and William L. Koederitz, SPE (2005).

Con el fin de discutir la forma con la cual se aplica el concepto de la Energía Mecánica Específica (MSE) como una herramienta operativa, primero es necesario establecer una visión estructurada de los factores perjudiciales, tanto en el rendimiento como en las brocas de perforación. La figura 42 muestra una curva de Drill-Off-Test clásica que se utiliza para este propósito.

Figura 42. Drill off Tests (3 Regiones).



Fuente: Fred E. DuPriest, ExxonMobil and William L. Koederitz, SPE (2005) p81.

En la Región I, el rendimiento se ve limitado por la inadecuada profundidad de corte (DOC) debido al bajo peso sobre la broca (WOB).

En la Región II, la curva Drilloff-Test comienza cuando la profundidad de corte (DOC) es adecuada para estabilizar el desempeño de la broca. La eficiencia de la broca se mantiene en el mismo nivel a medida que se incrementa el WOB hasta encontrar el Founder Point. A lo largo de esta región, los cambios de peso sobre la broca (WOB) causan un cambio proporcional en la tasa de penetración (ROP). Aunque la eficiencia de la broca no está cambiando, se está aplicando una mayor cantidad de energía. La pendiente lineal de la curva es relativamente constante para una formación dada, a la broca y a la velocidad de rotación¹³.

¹³ DUPRIEST, F. KOEDRITZ, L. maximizing drill rates with real-time surveillance of mechanical specific energy, año 2005 p.2.

La Región III, comienza con el “Founder” Point, en la cual la transferencia de energía de la broca a la roca es restringida y si se desea aumentar la ROP es necesario rediseñar el sistema para extender la restricción.

Los factores que determinan la tasa de penetración (ROP) pueden presentarse en dos categorías:

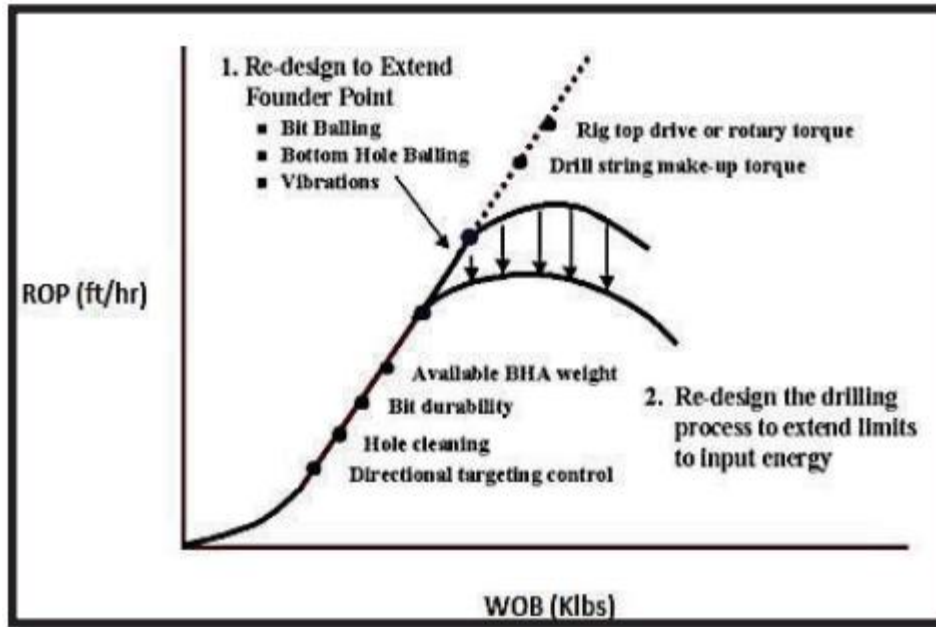
1. Los factores que generan ineficiencia.
2. los factores que limitan la entrada de energía.

Las tres causas del Founder Point son:

1. Bit Balling (Embolamiento de la broca)
 - ROP bajo
 - Torque bajo
 - Presión puede bajar
2. Down Hole Balling (Limpieza del hueco)
 - ROP bajo
 - Torque puede aumentar
 - Presión puede aumentar
3. Vibraciones (hidráulica)

En la Figura 43. se observan algunos de los factores que causan el founder point.

Figura 43 Algunos causantes del Founder Point.



Fuente: Fred E. DuPriest, ExxonMobil and William L. Koederitz, SPE (2005).

Estos factores pueden ser mitigados, pero no eliminados en su totalidad. Por ejemplo, la disminución del número de aletas de la broca no elimina el Bit Balling, pero eleva los valores del peso sobre la broca (WOB) y la tasa de penetración (ROP). Existe una variedad de factores que pueden limitar la entrada de energía, en los que se pueden incluir la eficiencia en la limpieza del hueco, integridad del hueco para sostener la carga de cortes, rating de presión diferencial de motores de fondo, tamaño del target (Direccional), límites de velocidad de rotación para los LWD, peso disponible de BHA, capacidad de manejo de sólidos, torque de la rotaria y del top drive.

En términos generales, el cálculo de la Energía Mecánica Específica (MSE) es útil en la obtención del "Founder Point" en un sistema de perforación, y en algunos casos para localizar causantes del "Founder Point". Si la Energía Mecánica

Específica (MSE) se grafica continuamente en el taladro, el personal de perforación puede observar si el sistema está por debajo o por encima del Founder; convirtiéndose en una herramienta de diagnóstico de la eficiencia de la perforación. Si la Energía Mecánica Específica (MSE) es constante, la broca es eficiente y opera en la zona II, si el MSE aumenta el sistema está por encima del Founder Point.

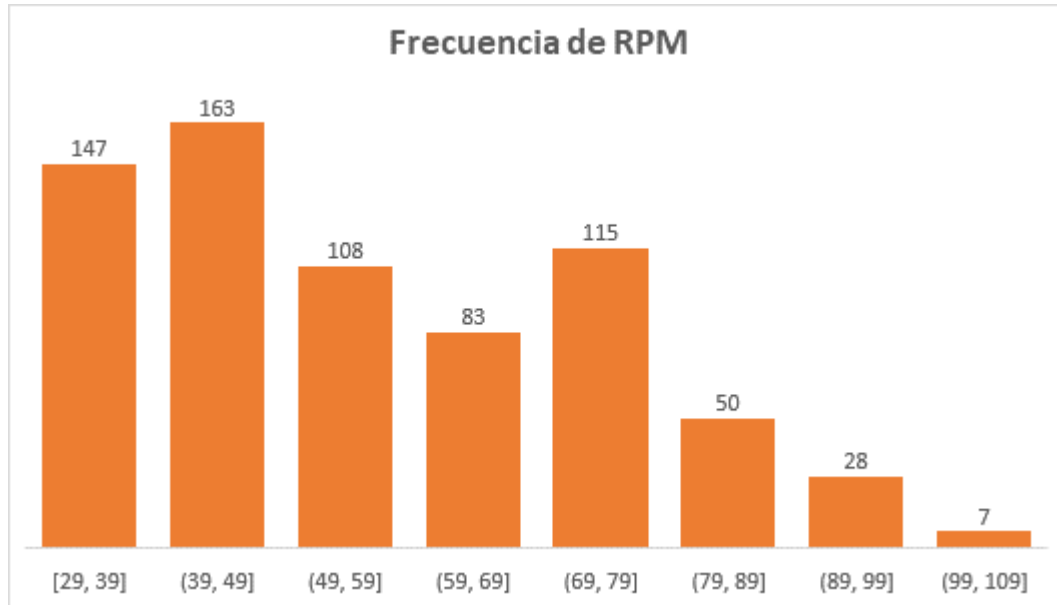
6.6.1 Aplicación de las Drill Off Tests. Una vez que obtuvimos los valores óptimos de RPM y calculada la optimización de este parámetro, pudimos dejar la metodología hasta este punto, pero con la ayuda del concepto de las DT también se puede calcular los valores óptimos del otro parámetro controlable en la operación, el peso sobre la broca o WOB.

Para esto lo que hay que hacer es tomar el rango óptimo de RPM que genera la aplicación MSE_Optimizer, y de acuerdo a la teoría de las DT diseñar un plan para ejecutarlas teniendo en cuenta solo estos valores de RPM.

Hay que mencionar que como este rango de RPM ya es bastante reducido gracias al análisis del histograma que nos presenta el MSE_Optimizer, las pruebas podrán ser llevadas a cabo con mayor rapidez y eficacia, y cabe destacar que este es uno de los principales motivos por lo que las empresas operadoras no autorizan la realización de este tipo pruebas, debido a que ralentizan considerablemente la operación de perforación, lo que genera mayores tiempos y por ende un mayor costo en general. Pero una vez que este rango de RPM es calculado y las pruebas se diseñan en base a ellos, pues el tiempo que tomará hacerlas también se reduce considerablemente.

Para el caso del ejemplo del pozo O1 del campo académico, debemos observar el histograma arrojado por la aplicación (Figura 44).

Figura 44. Histograma Campo Académico pozo O1.



Fuente: MSE_Optimizer.

En este histograma pudimos observar como la mayor concentración de valores óptimos de RPM se encuentran ubicados en los rangos de 40 a 50 (rev/min) aproximadamente, pero vimos que también en los rangos de 30 a 40 y 50 a 60 hay una concentración nada despreciable de estos, por lo que se sugiere diseñar un Drill Off Test con una RPM que vaya entre 20 y 60, y de acuerdo a la teoría de estas pruebas ya explicada anteriormente, se debe variar de 20 en 20 puesto que la formación León no es una formación tan dura.

De esta forma quedarían solo 3 pruebas de DT con RPMs de 20, 40 y 60 (rev/min) y se sugiere que los pesos utilizados en estas sean desde los 2 KI-Lb hasta los 22 KI-Lb saltando de 2 en 2, de esta forma se hallará el Founder Point y así mismo la

combinación de RPM/WOB que genera la mejor ROP sin desperdiciar energía innecesaria.

Por último, hay que resaltar que, si se planean hacer un número considerable de pozos en una zona, aplicar esta metodología y realizar esta prueba en los primeros pozos, garantiza una combinación de parámetros RPM/WOB que estará enfocado en la maximización de la ROP, o lo que es lo mismo una disminución en el MSE, lo que traduce una menor pérdida energética y de recursos en la elaboración directa del hueco, o sea, operaciones mucho más óptimas.

7. CONCLUSIONES

- La implementación de la metodología de la Energía Mecánica Específica (MSE) es factible mediante el uso de curvas de parámetros de perforación y como una herramienta de evaluación en el proceso de perforación, ya que permite controlar o, en casos necesarios realizar reajustes en los parámetros de perforación para obtener resultados óptimos y eficaces en operaciones de campo.
- Los resultados de eficiencia en los intervalos analizados pertenecientes a la formación León de los pozos (O1, O2, O3, O4, O5, O6) del campo Académico, mostraron valores bajos a los esperados. Se disipa más del 75% de la energía utilizada y únicamente se emplea el resto de la energía a los parámetros de perforación para realizar el agujero. Por este motivo, la solución fue realizar el reajuste en los parámetros de perforación para incrementar la eficiencia y alcanzar el valor óptimo ideal del 35 a 40% para un sistema de perforación eficiente.
- Los parámetros directamente modificables en una perforación son el peso sobre la broca (WOB), las revoluciones por minuto (RPM) y el caudal (GPM). Los parámetros como el torque, la tasa de penetración (ROP) y la presión diferencial, constituyen una consecuencia de la magnitud de cómo se aplican los parámetros directamente modificables y de otros factores y condiciones del pozo (fluidos, trayectoria, litología, etc). Sobre esta base se concluye que el parámetro que se recomienda modificar en primera instancia es el

RPM, ya que este aporta la componente rotacional la cual aporta casi un 90% del esfuerzo requerido para destruir una unidad de roca.

- Según los cálculos del RPM recomendado para los pozos (O1, O2, O3, O4, O5, O6) de las figuras 39 y 40 en las diferentes secciones analizadas, se concluye que el RPM y el ROP están directamente relacionados, así como la tasa de penetración (ROP) con la EFF_M y la Energía Mecánica Especifica (MSE) con la EFF_M . Es decir, a mayor Energía Mecánica Especifica (MSE) se tendrá menor EFF_M y a menor EFF_M se tendrá una caída de la tasa de penetración (ROP). Por lo tanto, se perforó con una RPM no óptima en el proceso de perforación que generó valores bajos de ROP. Entonces, la aplicación de la metodología de la Energía Mecánica Especifica (MSE) sería de gran ayuda al momento de realizar análisis de resultados y optimizar parámetros de perforación en futuros pozos.
- La MSE responde rápidamente a cualquier cambio en los parámetros de perforación o cualquier problema que afecte la eficiencia.
- La MSE tiene una función adicional, como marcador litológico, permitiendo la identificación de topes o paquetes de arenas, especialmente en pozos exploratorios donde permite identificar litologías y realizar correlaciones
- A través de la MSE es posible determinar mapas de parámetros de perforación, sirviendo como guía para mejorar las operaciones de perforación de los pozos.
- La CCS junto con la MSE, funciona como un buen indicador para cuantificar la eficiencia en la perforación.

- Empleando los parámetros recomendados en los pozos de prueba, se observa un aumento de la eficiencia del 15.45% aproximadamente.
- Mediante la aplicación desarrollada se generó una herramienta software confiable para el análisis cualitativo y cuantitativo del MSE.

8. RECOMENDACIONES

- Uno de los retos de la perforación de un pozo es determinar los parámetros óptimos de perforación que permitan obtener el mejor desempeño y rendimiento. Por lo tanto, es recomendable la implementación de la metodología del concepto de Energía Mecánica Específica (MSE) como una herramienta importante para la evaluación estos parámetros y su posterior optimización con ahorro de recursos económicos.
- Usar esta metodología para determinar los mapas de parámetros en la perforación de pozos de desarrollo.
- Realizar las futuras perforaciones, empleando los parámetros recomendados, así como usar la Energía Mecánica Específica como indicador de eficiencia que permita identificar áreas problemáticas y ayude a generar posibles soluciones.
- El concepto de Energía Mecánica Especifica (MSE) también puede ser aplicado y considerado como una herramienta útil para detectar irregularidades en factores importantes que pueden afectar la eficiencia en la perforación, como: vibraciones, embolamiento de la broca, la predicción del daño o desgaste de la broca en determinado punto o instante de la perforación, mediante una interpretación del comportamiento y tendencia de la curva de MSE construida en tiempo real con los parámetros de perforación reales utilizados. Por todo esto se recomienda aplicar el concepto de MSE no solo para determinar los parámetros de perforación óptimos que se deben utilizar a partir de la Eficiencia Mecánica alcanzada, sino como una herramienta que permite identificar la restricción de energía, anticipar el

cambio de las brocas, falla en la hidráulica y limpieza del hueco, problemas a causa de desgaste de la estructura de corte de la broca, entre otros factores, permitiendo obtener resultados favorables para un rendimiento eficaz en la perforación de futuros pozos.

- Es recomendable que la data con que se construyan las curvas que van a ser empleadas para la optimización de los parámetros de perforación mediante el MSE sea ordenada y filtrada de acuerdo a una base técnica con el fin de eliminar la data no útil.
- La influencia hidráulica afecta directamente la variación del MSE, observándose un aumento significativo en el consumo de energía en las zonas donde el HSI es bajo, y por lo cual su aporte es menor, ocasionando un aumento en los valores de MSE, mientras que cuando el HSI es alto se observa una disminución en el consumo de energía y en los valores de MSE. Por lo tanto, se recomienda estudiar más a fondo el comportamiento del MSE bajo estas condiciones y en especial en formaciones susceptibles a los impactos hidráulicos, con el fin de utilizar el MSE como otro parámetro de control y predicción del comportamiento de la perforación.
- Se recomienda perfeccionar la aplicación diseñada para que esta sea capaz de analizar la data en tiempo real y crear a partir de esto una serie de respuestas operacionales a los diferentes escenarios que puedan presentarse durante el proceso de perforación.

BIBLIOGRAFÍA

AHMED, T. Reservoir Engineering Handbook. Houston, Texas: Gulf Professional Publishing. 2001.

ARROYO Andrea. Evaluacion técnica de las configuraciones del sistema rotatorio dirigible (GEO-PILOT) de la compañía Halliburton en la cuenca oriente ecuatoriana. 2013. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/6464>.

BOURGOYNE Adam. Chenevert Martin. Millhein Keith. & Young F.S. Applied Drilling Engineering. SPE. VOL.2. 1986.

COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPUBLICA. Decreto 2041 (15, octubre, 2014). Por el cual se reglamenta el Título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre licencias ambientales.

COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPUBLICA. Ley 1185 (12, marzo, 2008). Por la cual se modifica y adiciona la Ley 397 de 1997 –Ley General de Cultura– y se dictan otras disposiciones. Diario oficial. Bogotá D.C., 2008.

CUJIA LARA. & TAUTIVA Juan. Evaluación del comportamiento de la saturación de petróleo actual con base en el análisis de presiones e historia de producción en el campo ocelote. 2016.

DESCONOCIDO. Solid control equipment shale. Shaker. 2018. Disponible en: <http://www.ingenieriadepetroleo.com/solid-control-equipment-shale-shakers/>.

DUQUE, Ana. MANTILLA, Carlos. LÓPEZ, Jannethe. Rodríguez, Johana. Gómez, Napoleón. Cock, Víctor. Bolívar, Lorena. Buenas prácticas en consulta previa. 2013. disponible en: https://acp.com.co/web2017/images/pdf/buenaspracticas/gestionsocial/ACP_Toolkit-PIEZA_Buenas_practicas_en_consulta_previa.pdf.

ESCOBAR, Humberto. Fundamentos De Ingenieria de Yacimientos. Neiva, Colombia: Universidad Surcolombiana. 2000.

GONZÁLEZ Andrés, JARA Manuel, RAMÍREZ Luis & MALAVÉ Kléber. Diseño del Programa de Brocas Requerido para Perforar el Pozo Direccional. 2001.

HAWKER David. VOGT Karen. ROBINSON Allan. Procedimientos y operaciones en el pozo. 2001. Versión 3.0. Disponible en: https://www.u-cursos.cl/usuario/c19094b1ea89f1f08e243796b671e2e5/mi_blog/r/Manual_de_Perforacion_Procedimientos_y_Operaciones_en_el_Pozo.pdf.

LAKE, L. W. Petroleum Engineering Handbook. Austin, Texas: Society of petroleum Engineers. 2007.

LOPEZ Ramiro. Estudio del desempeño y rendimiento de brocas de perforación en el campo shushufindi para optimizar tiempos de perforación mediante la aplicación de la base de datos Phoenix de Halliburton. 2012. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4811179>.

LYONS, W. C; GUO, B., & GHALAMBOR, A. Petroleum Production Engineering, A Computer-Assisted Approach. Louisiana: Elsevier Science & Technology Books. 2007.

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 751 (26, marzo, 2015). Por la cual se adoptan los términos de referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental, (EIA), requerido para el trámite de la licencia ambiental de los proyectos de construcción de carreteras y/o de túneles con sus accesos y se toman otras determinaciones. Bogotá: El Ministerio, 2015.

OSPINA Adriana, ZAMORA José. Cadena productiva de los hidrocarburos. 2008. Disponible en: <http://www.anh.gov.co/Ninos/Cartillas/cadenaProductivaHidrocarburos.pdf>.

PACIFIC. Estudio de impacto ambiental área de perforación exploratoria llanoS-83. 2016. Disponible en: <http://asiltda.co/eialla83/assets/resumen-ejecutivo.pdf>.

RECALDE, M. Determinantes de la inversión en exploración de hidrocarburos: un análisis del caso argentino. 2011.

Rosero Fernando. & Toscano Jimy. Diseño y optimizacion de la perforacion horizontal en las secciones 8 1/2" y 6 1/8" con el uso de brocas smith international. 2012. Disponible en: <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/409>.

ANEXOS

Anexo A. Data real del campo académico.

Se anexa la data real del campo Académico, pozo O1. La cual se utilizó para realizar los cálculos de los ejemplos.

ACADEMICO O1							
MD	ROP	WOB	CAUDAL	SPP	RPM	TORQUE	HSI
2690	396.00	5.57	718.52	2152.59	125.64	5.30	3.06
2691	376.36	5.77	718.56	2140.16	130.85	5.80	3.06
2692	337.09	6.36	717.19	2136.01	120.98	5.96	3.05
2693	252.00	6.00	715.88	2152.85	114.72	6.93	3.03
2694	162.00	3.15	717.22	2153.62	110.41	5.66	3.05
2695	414.00	5.31	716.56	2177.44	111.41	4.93	3.04
2696	236.57	4.40	716.56	2156.73	99.84	3.79	3.04
2697	257.14	3.04	715.88	2144.30	89.31	6.37	3.03
2698	210.00	3.15	715.88	2148.18	95.65	6.23	3.03
2699	203.00	3.04	714.47	2129.80	103.00	5.63	3.01
2700	196.00	3.94	713.14	2146.89	110.09	5.62	2.99
2701	279.69	4.99	713.80	2142.36	106.64	6.85	3.00
2702	285.23	4.78	712.44	2128.25	103.83	5.92	2.99
2703	327.00	4.70	714.46	2143.26	97.80	6.35	3.01
2704	349.20	4.87	712.47	2140.80	103.58	5.64	2.99
2705	330.55	5.77	714.46	2153.10	116.36	4.99	3.01
2706	247.20	5.00	711.12	2141.71	113.66	6.15	2.97
2707	282.46	4.61	715.75	2133.43	112.20	6.16	3.03
2708	312.00	3.79	713.13	2134.98	110.07	5.81	2.99
2709	228.71	3.73	711.78	2161.91	116.46	4.81	2.98
2710	262.29	4.75	715.23	2165.02	136.67	5.00	3.02
2711	265.85	5.00	715.19	2167.09	114.63	5.98	3.02
2712	285.23	3.09	715.89	2163.72	113.05	5.02	3.03
2713	267.43	2.25	713.88	2153.23	114.84	4.98	3.00
2714	259.71	3.71	717.19	2143.52	117.70	4.70	3.05

ACADEMICO O1							
MD	ROP	WOB	CAUDAL	SPP	RPM	TORQUE	HSI
2715	333.82	7.49	715.89	2172.01	95.50	5.77	3.03
2716	327.00	10.11	716.56	2164.11	114.51	5.99	3.04
2717	325.97	10.00	715.89	2160.87	113.26	5.60	3.03
2718	127.12	10.01	711.25	1922.13	124.62	3.33	2.97
2719	137.03	10.74	711.29	2167.22	127.07	4.46	2.97
2720	288.00	2.77	710.59	2163.72	130.45	4.68	2.96
2721	300.06	7.00	711.17	2157.51	120.24	3.60	2.97
2722	301.85	7.38	709.20	2158.80	124.13	5.60	2.95
2723	321.43	2.95	709.16	2160.87	127.63	5.07	2.95
2724	360.00	2.89	711.12	2186.25	124.26	5.38	2.97
2725	375.00	3.50	707.20	2181.59	123.26	5.65	2.92
2726	403.20	5.19	710.51	2165.02	127.22	5.74	2.96
2727	396.00	4.87	709.85	2160.87	128.28	6.03	2.95
2728	493.71	5.42	711.82	2131.87	119.07	6.09	2.98
2729	522.00	6.94	712.48	2121.90	124.63	6.58	2.99
2730	535.50	6.88	712.44	2065.58	126.05	6.51	2.99
2731	517.50	6.41	714.46	2027.78	120.00	6.83	3.01
2732	601.71	8.10	713.11	2036.58	120.24	7.03	3.00
2733	498.86	5.71	713.76	1958.13	124.26	6.84	3.00
2734	499.50	7.61	717.89	1928.87	123.74	6.52	3.06
2735	497.98	7.20	718.56	1916.44	125.25	6.63	3.06
2736	495.09	7.26	717.19	1897.79	121.18	6.50	3.05
2737	490.50	8.01	717.21	1897.79	129.20	6.58	3.05
2738	504.00	6.41	717.86	1897.79	119.77	6.37	3.06
2739	565.71	9.24	716.52	1892.23	129.35	6.80	3.04
2740	555.43	8.48	716.54	1917.08	128.54	6.55	3.04
2741	382.91	3.53	718.55	1912.29	124.24	5.77	3.06
2742	343.64	7.61	717.19	1901.42	117.93	5.92	3.05
2743	388.80	5.71	717.19	1926.79	127.73	6.23	3.05
2744	389.45	4.43	715.89	1959.55	121.54	5.78	3.03
2745	330.55	4.00	715.20	1949.97	124.37	5.41	3.02
2746	414.00	6.12	715.19	1925.63	128.27	5.53	3.02
2747	396.00	6.59	714.53	1918.51	122.88	5.96	3.01
2748	303.00	5.02	715.87	2015.09	127.47	6.38	3.03
2749	388.00	4.40	715.90	2054.19	124.24	5.78	3.03
2750	360.00	5.45	714.54	2049.01	125.39	5.28	3.01
2751	336.00	4.78	714.54	2056.26	123.62	5.27	3.01
2752	486.00	5.95	715.90	2062.99	127.59	6.48	3.03
2753	495.00	8.31	715.23	2080.08	128.39	6.50	3.02

ACADEMICO O1							
MD	ROP	WOB	CAUDAL	SPP	RPM	TORQUE	HSI
2754	495.00	9.18	713.89	2087.33	124.37	6.52	3.01
2755	504.00	9.62	713.88	2083.58	120.95	6.45	3.01
2756	555.43	10.69	713.22	2087.33	120.47	6.75	3.00
2757	414.00	9.91	714.59	2096.14	116.70	6.89	3.01
2758	555.43	10.26	713.93	2099.25	123.25	7.08	3.01
2759	552.00	7.14	714.58	2131.87	124.62	7.22	3.01
2760	367.20	6.12	711.92	2123.59	122.15	6.32	2.98
2761	370.80	4.26	714.59	2167.86	124.49	6.25	3.01
2762	235.20	4.00	713.24	2184.69	126.28	5.93	3.00
2763	363.60	3.56	726.68	2054.19	134.57	6.42	3.17
2764	408.00	6.73	712.53	2048.49	129.47	6.32	2.99
2765	374.40	3.88	715.22	2042.80	124.75	6.35	3.02
2766	370.80	6.68	713.23	1923.95	129.47	5.25	3.00
2767	363.60	6.70	715.89	1926.54	112.84	5.37	3.03
2768	304.62	4.38	711.24	2102.87	118.84	6.96	2.97
2769	342.00	3.79	709.93	2140.16	122.88	6.46	2.96
2770	392.40	5.16	709.93	2138.09	129.89	6.24	2.96
2771	388.00	9.35	711.28	2135.76	122.75	6.12	2.97
2772	486.00	9.70	711.24	2160.87	122.15	6.65	2.97
2773	416.00	8.42	711.93	2182.36	131.97	7.45	2.98
2774	376.00	9.67	711.28	2172.27	129.20	7.22	2.97
2775	412.00	8.74	711.24	2183.66	116.36	7.34	2.97
2776	440.00	9.65	710.63	2177.96	141.38	7.45	2.96
2777	345.60	7.96	711.25	2196.09	123.62	8.85	2.97
2778	454.50	8.19	711.25	2163.72	129.62	7.21	2.97
2779	327.00	7.40	711.25	2184.18	122.15	5.32	2.97
2780	314.18	8.04	709.97	2187.28	126.28	5.32	2.96
2781	228.00	7.60	711.24	1874.10	94.38	5.30	2.97
2782	345.60	4.26	709.28	2243.73	97.06	5.28	2.95
2783	375.00	3.36	708.64	2262.12	107.79	5.79	2.94
2784	325.98	2.45	710.62	2260.82	112.84	5.81	2.96
2785	283.20	3.29	710.63	2247.49	106.40	5.26	2.96
2786	306.00	2.92	709.97	2251.50	109.82	5.31	2.96
2787	348.00	3.74	710.63	2258.23	106.40	6.03	2.97
2788	306.00	3.21	710.63	2247.10	110.61	5.84	2.97
2789	337.09	5.63	712.59	2250.98	111.21	5.80	2.99
2790	345.00	3.24	711.28	2249.56	108.47	5.60	2.98
2791	321.43	3.27	708.67	2243.60	108.47	5.58	2.94
2792	333.00	7.32	709.32	2234.02	104.24	6.58	2.95

ACADEMICO O1							
MD	ROP	WOB	CAUDAL	SPP	RPM	TORQUE	HSI
2793	351.00	3.97	709.97	2229.49	111.01	5.62	2.96
2794	310.15	3.50	709.97	2245.80	103.54	5.84	2.96
2795	432.00	3.04	709.28	2233.37	109.13	5.84	2.95
2796	396.00	7.14	709.28	2226.12	104.16	5.90	2.95
2797	388.00	5.83	709.97	2220.69	109.04	6.19	2.96
2798	396.00	7.67	709.28	2220.82	112.94	6.32	2.95
2799	382.91	6.06	709.95	2223.41	109.43	5.93	2.96
2800	374.40	6.85	709.93	2224.70	113.05	6.35	2.96
2801	356.73	4.32	709.28	2215.12	108.74	5.91	2.95
2802	336.00	6.21	709.93	2228.07	110.31	5.75	2.96
2803	353.45	5.71	710.61	2239.59	109.04	5.83	2.97
2804	396.00	6.56	709.97	2238.55	108.85	6.37	2.96
2805	440.00	6.94	708.63	2232.08	107.79	6.34	2.94
2806	414.00	7.99	708.63	2238.29	111.91	6.63	2.94
2807	432.00	7.87	705.91	2238.68	113.65	6.90	2.91
2808	412.00	8.89	705.95	2216.80	103.23	6.22	2.91
2809	421.20	7.69	709.16	2218.87	104.01	6.43	2.95
2810	404.00	8.39	709.81	2221.59	107.85	6.37	2.96
2811	428.40	9.62	710.48	2225.09	103.58	6.28	2.97
2812	408.00	8.92	710.45	2223.66	102.71	6.26	2.97
2813	421.20	9.62	709.16	2218.87	108.62	6.35	2.95
2814	412.00	8.66	708.51	2200.23	115.15	6.79	2.94
2815	448.00	9.94	709.16	2191.30	106.54	6.31	2.95
2816	440.04	7.23	709.16	2217.45	104.36	6.49	2.95
2817	438.78	9.38	711.16	2209.42	103.76	6.35	2.97
2818	436.50	10.52	709.16	2218.23	109.20	6.71	2.95
2819	495.00	9.62	709.16	2233.37	108.62	7.02	2.95
2820	432.00	7.87	709.16	2197.90	100.10	5.83	2.95
2821	495.00	11.22	709.82	2229.23	102.01	6.56	2.96
2822	486.00	11.65	708.51	2216.03	107.10	6.82	2.94
2823	392.40	9.70	710.48	2224.18	107.58	7.04	2.97
2824	342.00	11.77	708.55	2226.90	100.52	5.89	2.94
2825	360.00	11.22	709.97	2211.37	111.61	6.09	2.96
2826	310.91	9.73	709.28	2209.55	115.49	6.45	2.95
2827	392.40	10.64	709.94	2181.59	106.11	6.63	2.96
2828	436.50	10.26	709.96	2182.88	104.85	6.64	2.96
2829	490.50	11.30	710.62	2162.94	111.62	6.61	2.97
2830	427.50	12.24	709.97	2174.73	104.95	6.46	2.96
2831	468.00	11.30	711.24	2170.84	101.55	7.21	2.97

ACADEMICO O1							
MD	ROP	WOB	CAUDAL	SPP	RPM	TORQUE	HSI
2832	459.00	12.53	710.62	2195.57	128.13	7.28	2.97
2833	436.00	13.23	709.32	2194.02	114.53	6.46	2.95
2834	454.50	14.30	709.28	2200.23	115.06	7.31	2.95
2835	441.00	12.73	709.93	2194.28	101.05	6.42	2.96
2836	280.29	10.43	709.93	2231.69	105.57	4.51	2.96
2837	363.60	11.36	709.30	2200.75	108.36	6.51	2.95
2838	166.91	9.47	709.94	2200.75	105.39	3.27	2.96
2839	370.80	11.42	709.93	2204.11	105.39	6.30	2.96
2840	345.60	8.71	709.31	2198.55	117.70	6.06	2.95
2841	352.88	9.56	709.28	2192.98	112.94	6.29	2.95
2842	358.07	10.20	708.67	2192.98	105.49	5.63	2.94
2843	367.20	9.94	708.02	2173.30	116.70	5.90	2.93
2844	345.60	10.05	708.67	2199.32	106.40	5.89	2.94
2845	340.36	7.61	709.96	2181.59	114.95	6.00	2.96
2846	320.70	7.00	718.56	1685.47	113.67	4.84	3.07
2847	236.00	2.25	710.63	1975.47	113.89	4.88	2.96
2848	217.78	7.00	705.91	2155.69	115.80	4.60	2.91
2849	157.33	5.00	707.90	2158.80	114.40	4.19	2.93
2850	186.26	5.97	705.28	2132.65	116.69	4.58	2.90
2851	288.00	4.09	706.60	2140.93	115.92	4.86	2.91
2852	220.00	2.57	706.56	2141.45	117.02	4.90	2.91
2853	402.55	5.69	708.55	2145.34	108.33	6.72	2.94
2854	432.00	6.47	706.56	2150.52	118.26	6.04	2.91
2855	432.00	5.42	707.86	2174.21	114.08	6.57	2.93
2856	415.64	6.76	709.85	2191.43	115.37	5.99	2.96
2857	234.00	8.13	709.85	2180.03	116.24	5.98	2.96
2858	490.50	7.84	709.26	2185.08	111.20	6.18	2.95
2859	412.00	6.53	710.65	2188.06	114.73	6.25	2.97
2860	337.09	5.80	710.03	2206.57	121.54	5.98	2.96
2861	199.80	8.98	709.98	2192.59	117.48	4.97	2.96
2862	220.00	11.48	711.31	2180.16	116.92	5.64	2.97
2863	208.42	9.21	709.96	2170.71	114.84	5.47	2.96
2864	152.31	10.00	709.96	2180.03	117.93	4.52	2.96
2865	176.09	9.30	758.82	2468.59	114.31	3.69	3.61
2866	212.21	8.86	761.79	2458.15	112.32	5.54	3.65
2867	240.00	10.34	760.29	2457.07	113.26	5.17	3.63
2868	218.00	11.89	758.79	2477.28	110.41	5.25	3.61
2869	204.75	11.65	758.80	2466.64	112.94	5.25	3.61
2870	232.94	12.73	758.82	2449.93	112.53	5.25	3.61

ACADEMICO O1							
MD	ROP	WOB	CAUDAL	SPP	RPM	TORQUE	HSI
2871	228.71	14.39	760.31	2445.75	111.71	5.31	3.63
2872	232.94	16.89	761.05	2454.31	113.15	5.58	3.64
2873	220.00	15.76	760.31	2455.59	113.05	5.58	3.63
2874	208.42	14.22	758.80	2455.72	115.17	5.54	3.61
2875	267.75	19.63	758.05	2458.96	111.62	6.36	3.60
2876	282.46	19.49	758.05	2455.32	114.41	6.64	3.60
2877	300.86	19.57	756.57	2460.71	112.12	6.30	3.58
2878	270.00	22.78	757.31	2463.81	112.02	5.88	3.59
2879	306.00	23.04	758.05	2465.69	114.53	6.29	3.60
2880	271.38	23.24	756.57	2475.60	113.15	6.01	3.58
2881	299.08	23.53	756.57	2470.68	113.26	6.21	3.58
2882	232.94	21.87	758.05	2475.40	112.64	5.55	3.60
2883	237.18	22.69	758.05	2487.39	114.20	5.57	3.60
2884	277.71	23.56	757.33	2481.19	113.37	5.90	3.59
2885	288.00	21.23	758.05	2486.31	113.89	5.91	3.60
2886	272.57	23.50	758.79	2484.90	114.10	5.67	3.61
2887	242.40	23.47	755.08	2493.05	114.95	5.84	3.56
2888	264.86	23.39	758.05	2488.87	113.47	6.13	3.60
2889	249.60	22.75	758.05	2497.70	113.68	5.88	3.60
2890	193.26	21.41	756.58	2497.77	113.89	5.32	3.58
2891	202.00	20.74	757.32	2507.33	114.31	5.65	3.59
2892	218.12	21.20	758.07	2497.43	115.60	5.54	3.60
2893	216.00	22.19	756.60	2511.65	112.84	5.89	3.58
2894	197.05	21.73	757.33	2503.02	114.74	5.59	3.59
2895	146.56	11.07	755.82	2504.23	116.26	4.66	3.57
2896	126.00	11.36	755.85	2494.94	116.70	4.63	3.57
2897	134.67	15.58	756.58	2511.11	114.31	5.20	3.58
2898	159.65	17.91	756.60	2510.10	114.95	6.20	3.58
2899	207.53	15.38	758.07	2515.96	117.37	6.93	3.60
2900	155.09	12.15	754.35	2553.42	112.33	3.23	3.54
2901	135.69	8.19	756.58	2525.79	118.50	3.75	3.58
2902	202.74	7.81	754.38	2529.64	109.52	5.38	3.55
2903	314.18	9.38	757.33	2533.68	114.10	5.90	3.59
2904	356.73	9.09	755.10	2515.15	118.15	6.51	3.56
2905	294.55	9.12	755.10	2535.36	110.02	5.33	3.55
2906	416.00	10.37	757.32	2517.04	115.38	6.84	3.59
2907	404.00	7.32	753.64	2538.60	115.49	6.54	3.53
2908	327.00	9.06	753.62	2540.08	115.71	5.61	3.53
2909	312.98	8.60	753.61	2517.57	92.90	4.78	3.54

ACADEMICO O1							
MD	ROP	WOB	CAUDAL	SPP	RPM	TORQUE	HSI
2910	297.09	8.90	754.37	2514.00	100.16	4.80	3.55
2911	225.47	7.00	754.36	2525.86	97.00	4.81	3.55
2912	378.00	7.40	754.36	2521.01	100.33	5.81	3.55
2913	342.00	5.54	756.57	2519.73	91.52	6.45	3.58
2914	283.20	4.55	755.10	2498.71	98.23	5.14	3.56
2915	267.75	3.65	752.17	2512.45	96.15	5.27	3.52
2916	184.70	10.30	755.09	2508.82	94.91	4.11	3.56
2917	265.50	6.79	753.61	2494.40	93.26	5.68	3.54
2918	396.00	8.28	751.41	2500.33	89.48	5.67	3.51
2919	300.00	2.63	752.89	2515.42	100.00	6.39	3.53
2920	168.55	6.70	750.69	2542.91	109.13	5.75	3.50
2921	158.40	7.11	751.43	2514.34	94.83	6.07	3.51
2922	333.00	8.71	752.88	2535.36	104.35	5.78	3.53
2923	282.86	8.74	752.89	2532.80	94.33	7.04	3.53
2924	333.00	9.12	751.44	2521.95	108.47	6.45	3.51
2925	382.91	10.84	752.17	2522.49	97.07	6.76	3.52
2926	392.40	9.67	753.63	2519.06	115.17	7.08	3.54
2927	448.00	10.93	751.43	2518.25	92.25	6.10	3.51
2928	363.60	8.71	752.14	2514.07	89.96	6.98	3.52
2929	270.00	9.44	750.69	2518.32	107.04	5.97	3.50
2930	340.36	11.51	755.10	2523.50	106.75	6.69	3.56
2931	127.86	6.94	754.37	2511.38	114.74	3.76	3.55
2932	414.00	8.80	753.65	2519.19	123.25	6.36	3.54
2933	370.80	8.04	753.65	2487.93	125.25	6.04	3.54
2934	382.91	8.34	756.58	2514.34	122.88	6.54	3.58
2935	526.50	10.14	754.39	2509.49	124.49	7.13	3.55
2936	565.71	10.72	751.47	2495.47	125.90	7.26	3.51
2937	565.71	10.66	753.64	2520.13	125.39	7.43	3.54
2938	540.00	10.11	752.19	2509.49	120.95	7.14	3.52
2939	534.86	7.69	753.67	2512.45	142.03	7.14	3.54
2940	468.00	8.19	752.93	2508.88	119.07	7.60	3.53
2941	463.50	10.40	753.65	2506.93	119.19	6.35	3.54
2942	468.00	9.00	752.95	2513.80	131.13	6.52	3.53
2943	460.00	7.64	754.37	2515.96	123.99	6.27	3.55
2944	495.00	7.40	754.37	2512.32	126.28	7.18	3.55
2945	540.00	8.39	752.92	2518.11	121.30	6.84	3.53
2946	627.43	9.18	752.89	2503.76	129.20	7.26	3.53
2947	478.29	6.94	752.16	2483.35	133.70	6.66	3.52
2948	396.00	7.72	753.65	2509.49	120.12	6.07	3.54

ACADEMICO O1							
MD	ROP	WOB	CAUDAL	SPP	RPM	TORQUE	HSI
2949	380.00	6.73	754.38	2512.18	129.89	6.32	3.55
2950	374.40	8.19	752.21	2509.49	131.00	6.06	3.52
2951	454.50	8.10	755.87	2505.18	118.50	6.50	3.57
2952	459.00	8.25	752.95	2504.23	121.54	7.05	3.53
2953	444.00	6.94	756.58	2507.33	126.02	6.78	3.58
2954	454.50	8.01	754.42	2510.57	126.80	6.50	3.55
2955	459.00	6.59	752.21	2515.15	125.64	6.72	3.52
2956	490.50	10.52	752.93	2514.68	126.94	6.46	3.53
2957	540.00	8.07	753.67	2499.79	126.02	7.15	3.54
2958	495.00	6.94	751.47	2524.04	131.28	7.54	3.51
2959	468.00	8.22	752.95	2520.00	130.30	7.54	3.53
2960	363.60	6.68	752.95	2508.95	134.28	6.51	3.53
2961	392.00	8.57	752.93	2514.88	117.93	6.58	3.53
2962	350.18	8.10	752.95	2521.55	126.54	6.42	3.53
2963	218.12	10.43	751.48	2512.72	125.00	6.45	3.51
2964	364.00	9.18	751.44	2515.96	119.65	6.23	3.51
2965	350.18	7.58	750.69	2522.43	121.66	5.87	3.50
2966	392.00	9.03	749.98	2518.79	128.13	5.99	3.49
2967	338.40	4.75	750.70	2527.82	127.33	6.41	3.50
2968	337.09	6.27	749.98	2508.95	129.35	6.15	3.49
2969	374.40	6.62	752.21	2500.86	132.70	6.15	3.52
2970	296.31	5.92	756.62	2507.47	133.99	6.17	3.58
2971	173.14	6.30	703.39	2343.16	113.66	6.27	2.87
2972	161.41	2.93	756.60	2586.77	112.10	5.57	3.58
2973	288.00	3.50	756.61	2589.26	113.66	5.47	3.58
2974	314.18	11.92	754.40	2593.58	117.58	5.59	3.55
2975	280.80	3.53	758.11	2589.26	113.89	5.61	3.60
2976	354.00	5.98	760.33	2588.19	103.54	6.44	3.63
2977	375.00	5.63	760.33	2586.37	110.01	6.51	3.63
2978	464.00	8.05	758.14	2590.81	113.68	6.66	3.60
2979	535.50	11.68	757.38	2592.97	98.56	7.84	3.59
2980	316.00	7.64	756.61	2591.02	135.03	7.78	3.58
2981	472.50	9.75	757.37	2587.92	115.92	6.71	3.59
2982	421.20	8.54	756.60	2593.64	106.58	6.67	3.58
2983	432.00	10.12	758.92	2600.58	105.03	8.13	3.61
2984	421.20	23.22	757.43	2612.71	121.90	7.54	3.59
2985	270.00	24.77	755.23	2630.30	114.20	5.28	3.56
2986	226.58	12.74	759.66	2604.42	115.17	5.23	3.62
2987	208.42	15.16	758.17	2611.90	116.04	5.24	3.60

ACADEMICO O1							
MD	ROP	WOB	CAUDAL	SPP	RPM	TORQUE	HSI
2988	222.00	16.57	760.39	2594.65	116.70	6.23	3.63
2989	228.00	18.01	757.47	2606.51	116.14	5.82	3.59
2990	194.00	18.15	756.73	2612.64	114.10	5.32	3.58
2991	231.75	20.34	755.95	2621.61	100.23	7.09	3.57
2992	220.00	18.24	755.21	2590.01	114.53	5.61	3.56
2993	247.50	20.23	756.65	2588.19	112.02	6.22	3.58
2994	208.42	24.60	755.17	2632.39	112.64	5.32	3.56
2995	208.42	21.90	755.21	2622.68	113.89	5.50	3.56
2996	237.18	18.90	757.41	2608.33	115.17	6.70	3.59
2997	277.71	24.08	755.95	2597.08	113.57	6.29	3.57
2998	237.18	25.58	756.67	2606.31	110.50	6.15	3.58
2999	261.60	26.93	755.23	2610.83	113.36	6.26	3.56
3000	198.00	25.67	755.23	2594.65	111.51	6.20	3.56
3001	263.08	25.15	755.19	2593.31	107.41	6.00	3.56
3002	264.86	22.96	754.44	2583.07	113.36	6.21	3.55
3003	252.00	20.20	755.17	2582.59	113.46	6.25	3.56
3004	277.71	19.77	753.71	2584.48	114.63	5.92	3.54
3005	268.80	19.94	755.90	2583.07	114.09	5.81	3.57
3006	259.20	17.44	755.90	2588.66	114.74	5.85	3.57
3007	232.94	19.65	755.93	2589.26	114.52	5.46	3.57
3008	247.50	22.16	755.23	2597.89	113.78	5.51	3.56
3009	237.18	21.44	755.19	2591.15	113.99	5.61	3.56
3010	238.50	22.16	754.45	2584.95	113.26	5.63	3.55
3011	216.00	23.68	753.73	2589.06	114.10	5.55	3.54
3012	234.00	22.59	758.22	2598.56	114.74	5.58	3.60
3013	203.29	22.59	755.30	2611.90	114.53	5.30	3.56
3014	183.60	26.33	756.73	2632.93	114.74	4.56	3.58
3015	168.55	22.96	755.25	2615.27	116.26	5.33	3.56
3016	201.18	23.85	756.78	2616.22	114.10	5.23	3.58
3017	197.05	26.53	756.01	2618.98	114.31	5.27	3.57
3018	117.29	12.48	753.09	2625.92	117.70	3.33	3.53
3019	157.60	13.72	756.78	2576.33	128.39	4.29	3.58
3020	183.60	14.76	757.49	2572.55	127.33	5.26	3.59
3021	195.16	17.00	756.83	2567.50	129.75	5.37	3.58
3022	229.50	23.22	756.04	2576.73	124.62	5.78	3.57
3023	245.25	24.77	752.35	2590.88	127.36	6.00	3.52
3024	181.89	19.57	754.51	2585.09	126.17	5.40	3.55
3025	157.33	16.80	753.85	2576.19	125.91	5.73	3.54
3026	206.53	19.54	751.59	2582.53	126.57	6.18	3.51

ACADEMICO O1							
MD	ROP	WOB	CAUDAL	SPP	RPM	TORQUE	HSI
3027	232.80	24.83	751.59	2580.10	124.26	6.41	3.51
3028	231.75	24.17	750.17	2586.70	126.31	6.90	3.49
3029	259.71	27.31	751.57	2583.34	125.40	7.06	3.51
3030	234.00	27.85	752.37	2583.94	125.66	6.49	3.52
3031	218.12	22.39	753.04	2587.58	125.66	6.14	3.53
3032	240.00	22.73	761.20	2317.79	127.07	6.37	3.64
3033	216.98	12.31	780.25	2458.96	126.54	5.56	3.97
3034	214.95	12.00	767.84	2562.99	128.66	3.71	3.78
3035	212.40	12.14	769.37	2553.82	127.07	5.37	3.80
3036	283.20	21.55	768.61	2558.00	126.80	5.82	3.79
3037	264.00	19.80	767.86	2560.16	126.94	5.66	3.78
3038	246.09	16.25	764.87	2551.80	126.83	5.10	3.74
3039	224.00	15.82	760.31	2587.38	126.31	5.35	3.67
3040	276.00	20.46	764.86	2573.63	126.05	5.86	3.74
3041	223.58	16.34	764.09	2604.90	128.16	5.41	3.73
3042	151.71	11.68	762.57	2611.36	128.55	4.73	3.70
3043	225.47	16.49	764.12	2583.07	128.16	5.50	3.73
3044	252.00	17.26	762.59	2576.33	126.31	5.39	3.70
3045	259.71	22.44	764.83	2581.92	125.13	6.52	3.74
3046	222.35	19.39	767.10	2583.34	127.21	6.37	3.77
3047	218.00	19.88	767.10	2560.90	126.42	6.44	3.77
3048	198.00	18.70	768.61	2541.83	125.51	6.07	3.79
3049	220.00	20.72	770.16	2555.85	119.65	7.59	3.82
3050	227.45	15.77	768.61	2561.24	122.02	7.05	3.79
3051	235.06	7.10	769.38	2544.19	123.99	5.85	3.80
3052	226.00	14.01	763.30	2668.03	127.86	4.44	3.72
3053	220.00	14.59	760.30	2684.40	134.15	5.03	3.67
3054	155.52	14.70	760.29	2681.44	126.68	3.73	3.67
3055	198.00	14.41	761.79	2687.10	126.80	4.72	3.69
3056	228.00	13.81	762.55	2685.35	128.27	5.16	3.71
3057	206.00	16.34	761.79	2694.31	126.54	5.39	3.69
3058	192.00	15.31	761.80	2683.53	122.15	6.91	3.69
3059	299.08	17.46	762.55	2691.27	124.12	6.05	3.70
3060	366.55	21.26	762.54	2683.59	124.75	6.10	3.70
3061	295.71	20.37	761.04	2685.21	121.78	7.13	3.68
3062	444.00	20.00	760.31	2679.82	129.89	7.14	3.67
3063	463.50	20.69	760.29	2686.83	128.66	6.90	3.67
3064	396.00	15.97	761.05	2684.00	126.80	6.45	3.68
3065	360.00	14.87	761.06	2677.87	125.13	5.76	3.68

ACADEMICO O1							
MD	ROP	WOB	CAUDAL	SPP	RPM	TORQUE	HSI
3066	504.00	14.61	761.05	2674.56	131.97	5.90	3.68
3067	343.64	14.27	761.05	2670.79	126.42	5.83	3.68
3068	370.80	14.70	761.81	2668.70	125.64	6.14	3.69
3069	440.00	17.90	762.54	2667.69	122.75	6.92	3.70
3070	460.00	19.10	761.79	2666.88	123.25	6.84	3.69
3071	396.00	19.33	761.79	2681.10	144.03	6.08	3.69
3072	303.00	16.28	762.54	2665.94	135.76	6.36	3.70
3073	404.00	19.65	761.04	2680.16	122.15	5.97	3.68
3074	421.20	18.24	763.30	2665.81	122.51	6.69	3.72
3075	452.57	22.21	762.55	2671.53	124.37	7.69	3.70
3076	218.12	9.38	761.80	2655.63	124.62	4.43	3.69
3077	262.29	7.99	762.54	2652.67	132.54	5.18	3.70
3078	220.24	7.97	763.30	2643.23	121.78	5.02	3.72
3079	388.80	9.84	762.55	2640.61	126.94	6.32	3.70
3080	498.86	11.28	763.30	2643.50	127.86	7.23	3.72
3081	454.50	10.21	761.04	2642.09	134.15	6.97	3.68
3082	416.00	12.60	764.05	2641.95	119.42	7.05	3.73
3083	412.00	11.71	763.29	2652.87	133.12	6.77	3.72
3084	363.60	11.39	764.05	2667.29	141.06	5.93	3.73
3085	367.20	10.18	764.04	2659.61	164.00	6.58	3.73
3086	399.60	11.77	764.81	2651.79	133.99	6.74	3.74
3087	384.00	11.10	764.04	2655.56	139.46	6.61	3.73
3088	342.00	11.33	762.55	2657.45	142.22	7.59	3.70
3089	363.60	10.30	765.56	2669.04	125.51	6.46	3.75
3090	340.36	11.28	764.05	2655.16	130.85	6.47	3.73
3091	342.00	11.22	762.55	2657.18	126.94	6.22	3.70
3092	356.73	12.05	762.55	2668.70	142.69	5.37	3.70
3093	297.82	11.88	759.54	2669.04	139.32	5.74	3.66
3094	376.36	13.00	781.06	2372.16	131.13	6.02	3.98
3095	277.71	14.70	762.59	2576.33	116.26	5.33	-999.25
3096	237.18	17.90	764.83	2581.92	114.10	5.23	-999.25
3097	261.60	19.10	767.10	2583.34	114.31	5.27	-999.25
3098	198.00	19.33	767.10	2560.90	117.70	3.33	-999.25
3099	263.08	16.28	768.61	2541.83	128.39	4.29	-999.25
3100	264.86	19.65	770.16	2555.85	127.33	5.26	-999.25
3101	252.00	18.24	768.61	2561.24	129.75	5.37	-999.25
3102	277.71	22.21	769.38	2544.19	124.62	5.78	-999.25
3103	268.80	23.22	763.30	2668.03	127.36	6.00	-999.25
3104	259.20	24.77	760.30	2684.40	126.17	5.40	-999.25

ACADEMICO O1							
MD	ROP	WOB	CAUDAL	SPP	RPM	TORQUE	HSI
3105	232.94	17.90	760.29	2681.44	125.91	5.73	-999.25
3106	247.50	14.27	761.79	2687.10	126.57	6.18	-999.25
3107	237.18	14.70	762.55	2685.35	124.26	6.41	-999.25
3108	238.50	17.90	761.79	2694.31	126.31	6.90	-999.25
3109	216.00	19.10	761.80	2683.53	125.40	7.06	-999.25
3110	234.00	19.33	755.83	2635.62	125.66	6.49	-999.25
3111	203.29	16.28	755.10	2653.41	125.66	6.14	-999.25
3112	183.60	19.65	755.09	2594.12	127.07	6.37	-999.25
3113	168.55	18.24	754.35	2609.61	126.54	5.56	-999.25
3114	204.00	22.21	754.36	2606.51	128.66	3.71	-999.25
3115	277.71	10.64	754.37	2687.16	127.07	5.37	-999.25
3116	376.73	22.07	750.69	2714.99	119.77	12.95	3.53
3117	376.73	22.07	750.69	2714.99	119.77	12.95	3.53
3118	204.00	10.64	754.37	2687.16	116.70	7.69	3.59
3119	277.71	7.30	755.83	2635.62	121.30	6.83	3.61
3120	343.64	12.43	755.10	2653.41	123.37	5.43	3.60
3121	119.06	10.00	755.09	2594.12	121.30	3.68	3.60
3122	127.74	12.09	754.35	2609.61	123.62	4.72	3.59
3123	115.20	10.00	754.36	2606.51	125.00	4.08	3.59
3124	118.90	10.00	758.05	2586.03	123.25	4.34	3.64
3125	119.70	10.00	756.58	2582.12	123.74	4.11	3.62
3126	139.85	10.83	754.35	2593.44	123.74	4.66	3.59
3127	145.87	12.12	755.10	2581.04	126.05	5.02	3.60
3128	170.61	7.00	754.37	2578.15	125.02	4.46	3.59
3129	146.67	11.81	755.13	2583.87	127.48	5.06	3.60
3130	263.25	4.71	752.92	2586.84	115.60	5.52	3.57
3131	236.25	12.27	753.65	2585.42	123.51	5.51	3.58
3132	299.08	13.22	752.88	2586.10	110.98	5.66	3.57
3133	264.00	4.48	752.15	2583.87	111.79	5.46	3.56
3134	201.60	10.00	753.62	2592.63	125.39	4.73	3.58
3135	197.08	12.52	771.75	2246.32	118.15	4.20	3.84
3136	190.78	5.03	758.07	2571.07	124.24	3.77	3.64
3137	160.90	5.90	768.67	2148.70	117.03	4.33	3.79
3138	113.63	6.41	754.36	2510.57	116.58	4.35	3.59
3139	169.90	5.40	753.62	2584.82	125.13	4.17	3.58
3140	198.70	4.80	755.10	2588.19	124.49	3.80	3.60
3141	216.00	5.57	755.84	2587.78	121.66	4.52	3.61
3142	252.00	8.54	755.10	2602.00	116.26	4.22	3.60
3143	262.29	9.63	752.16	2595.73	121.30	5.32	3.55

ACADEMICO O1							
MD	ROP	WOB	CAUDAL	SPP	RPM	TORQUE	HSI
3144	227.25	10.01	755.13	2607.59	129.35	5.11	3.60
3145	185.40	9.37	753.66	2615.54	126.18	5.43	3.58
3146	183.90	10.61	755.87	2608.74	109.63	5.74	3.61
3147	189.72	10.29	755.14	2632.59	122.51	4.15	3.60
3148	179.80	11.68	755.10	2628.61	131.41	4.74	3.60
3149	176.57	11.50	752.89	2618.37	130.72	5.16	3.57
3150	173.14	10.38	752.90	2614.87	117.82	5.19	3.57
3151	150.92	10.35	753.62	2612.98	115.06	3.89	3.58
3152	232.80	12.34	754.37	2613.66	127.59	5.51	3.59
3153	227.25	10.03	752.91	2619.05	135.03	5.54	3.57
3154	288.00	13.95	753.64	2618.37	123.62	5.49	3.58
3155	285.23	14.29	755.12	2613.12	128.93	4.73	3.60
3156	275.14	14.64	755.10	2622.14	132.83	5.40	3.60
3157	203.29	7.10	752.90	2609.61	126.02	5.63	3.56
3158	258.90	5.83	755.82	2623.76	133.99	5.59	3.61
3159	321.23	5.29	754.34	2617.83	152.46	5.45	3.59
3160	321.29	5.35	752.14	2615.14	134.90	5.77	3.56
3161	321.43	7.96	750.69	2633.46	124.37	5.34	3.54
3162	324.00	9.32	751.42	2633.73	117.14	5.34	3.55
3163	195.16	9.98	753.61	2639.33	106.67	5.20	3.58
3164	205.90	10.03	751.40	2679.82	110.98	4.70	3.55
3165	212.40	14.32	750.67	2651.79	112.62	4.23	3.53
3166	159.23	9.37	748.48	2658.26	141.81	4.13	3.50
3167	163.38	9.92	748.50	2655.83	133.59	2.78	3.50
3168	185.90	11.07	748.49	2650.24	152.77	3.21	3.50
3169	227.25	9.72	748.49	2666.14	102.98	5.01	3.50
3170	212.21	10.44	750.68	2678.74	139.68	4.98	3.53
3171	162.00	9.29	752.15	2665.81	122.27	4.73	3.56
3172	158.40	9.75	751.42	2652.87	116.36	4.06	3.55
3173	186.26	12.34	752.16	2651.32	123.00	4.61	3.56
3174	174.86	10.67	749.96	2649.77	139.00	4.66	3.52
3175	166.50	11.76	750.69	2660.42	120.00	5.43	3.53
3176	183.13	11.21	751.41	2657.59	86.48	3.12	3.54
3177	174.86	11.82	750.69	2655.70	103.44	4.65	3.53
3178	144.00	13.17	751.42	2658.80	118.61	2.85	3.55
3179	166.29	8.57	752.88	2662.03	97.16	4.75	3.57
3180	180.00	12.34	751.42	2638.32	95.85	4.79	3.55
3181	165.60	10.67	752.16	2660.95	104.77	3.33	3.56
3182	176.57	11.10	752.88	2646.54	116.14	4.55	3.57

ACADEMICO O1							
MD	ROP	WOB	CAUDAL	SPP	RPM	TORQUE	HSI
3183	237.18	11.99	752.88	2651.39	102.40	4.71	3.57
3184	228.55	10.58	753.61	2651.79	111.82	3.98	3.58
3185	210.50	11.62	750.70	2647.82	117.14	4.60	3.53
3186	205.74	14.55	760.30	2281.28	115.92	3.62	3.67
3187	198.76	10.12	752.87	2622.14	101.39	4.49	3.57
3188	195.98	11.53	753.61	2640.74	119.88	4.10	3.58
3189	189.98	11.56	753.61	2650.71	113.36	5.08	3.58
3190	179.89	14.24	752.15	2662.91	116.92	3.43	3.56
3191	166.91	13.03	749.95	2655.56	119.88	3.43	3.52
3192	157.90	12.63	754.35	2620.33	116.04	5.75	3.59
3193	140.40	16.48	752.88	2634.14	128.27	3.76	3.57
3194	145.40	15.47	751.43	2646.81	112.23	3.84	3.55
3195	157.60	16.77	767.85	2425.40	118.27	3.85	3.78
3196	176.93	15.16	752.15	2637.98	119.19	4.51	3.56
3197	185.32	14.78	752.16	2625.92	120.50	5.40	3.56
3198	190.80	12.94	753.61	2631.51	121.06	5.07	3.58
3199	145.33	13.43	752.87	2628.41	120.47	5.09	3.56
3200	157.09	13.11	755.09	2627.54	117.25	4.88	3.60
3201	156.72	10.34	754.35	2624.91	110.41	4.63	3.59
3202	154.76	10.29	752.88	2633.26	120.59	5.29	3.57
3203	153.87	9.72	753.62	2611.03	120.56	3.18	3.58
3204	152.50	3.93	751.42	2604.90	120.35	3.77	3.54
3205	150.70	6.72	804.64	2824.28	118.96	3.51	4.35
3206	148.97	5.52	809.94	2466.84	117.13	3.50	4.44
3207	148.50	10.03	804.69	2825.76	121.42	4.02	4.35
3208	148.70	16.28	805.47	2843.75	122.51	4.48	4.37
3209	151.70	14.64	803.01	2849.68	115.06	4.73	4.33
3210	155.89	14.90	803.01	2857.70	115.49	4.53	4.33
3211	164.70	16.22	802.97	2839.10	117.59	4.82	4.33
3212	167.54	16.94	801.30	2859.31	120.83	4.28	4.30
3213	176.04	13.06	802.18	2846.38	119.30	4.09	4.31
3214	180.12	11.79	801.31	2847.32	120.35	4.15	4.30
3215	189.56	13.89	818.34	2634.74	119.07	3.44	4.58
3216	200.87	12.57	802.15	2843.68	120.35	3.83	4.31
3217	210.54	14.24	758.14	2651.86	121.54	3.92	3.64
3218	220.36	14.73	757.35	2658.12	118.73	4.01	3.63
3219	223.95	12.11	758.13	2655.03	119.30	4.35	3.64
3220	225.80	11.47	758.13	2656.10	121.18	4.47	3.64
3221	249.60	10.26	759.74	2631.91	112.43	5.56	3.66

ACADEMICO O1							
MD	ROP	WOB	CAUDAL	SPP	RPM	TORQUE	HSI
3222	251.75	10.76	764.08	2584.41	111.62	3.61	3.73
3223	257.89	11.47	760.31	2597.35	115.49	5.51	3.67
3224	259.71	14.78	760.31	2630.43	126.28	4.72	3.67
3225	159.84	15.53	758.83	2614.26	110.71	5.17	3.65
3226	183.13	18.50	761.79	2625.11	117.37	4.51	3.69
3227	151.71	19.87	764.83	2533.88	115.74	4.52	3.74
3228	140.40	21.35	765.58	2529.77	114.63	4.53	3.75
3229	184.70	17.95	765.56	2491.70	112.43	5.16	3.75
3230	216.00	17.69	765.58	2496.82	112.53	5.30	3.75
3231	128.00	23.10	761.79	2567.37	118.04	4.79	3.69
3232	128.67	22.99	759.59	2569.86	111.10	4.87	3.66
3233	129.50	14.81	756.59	2661.49	116.04	3.54	3.62
3234	131.36	18.06	758.81	2651.25	116.26	4.60	3.65
3235	135.65	13.81	758.81	2655.03	112.75	3.58	3.65
3236	139.54	17.78	757.31	2663.65	115.27	4.32	3.63
3237	141.43	12.08	756.59	2635.62	113.47	4.82	3.62
3238	132.00	14.21	754.39	2648.56	112.40	4.77	3.59
3239	127.87	14.84	754.39	2679.21	117.58	4.56	3.59
3240	125.32	14.27	753.62	2658.26	116.91	4.48	3.58
3241	122.30	13.46	756.59	2664.73	116.14	4.56	3.62
3242	120.00	12.28	753.65	2648.76	113.77	4.52	3.58
3243	123.54	19.36	755.11	2671.40	114.74	4.88	3.60
3244	135.60	17.81	755.86	2674.70	115.82	4.50	3.61
3245	142.56	17.60	756.62	2664.12	114.95	5.22	3.62
3246	144.00	18.12	756.58	2679.15	118.50	4.65	3.62
3247	138.86	18.50	756.58	2668.64	114.74	5.28	3.62
3248	208.42	23.85	757.32	2690.60	110.70	5.57	3.63
3249	184.64	16.65	755.86	2648.56	117.14	3.43	3.61
3250	151.20	14.75	755.84	2656.10	110.61	3.58	3.61
3251	168.55	18.21	756.59	2668.30	109.24	5.32	3.62
3252	170.43	20.80	755.11	2702.53	121.18	3.86	3.60
3253	171.45	14.15	755.15	2666.75	113.78	4.47	3.64
3254	172.17	16.68	757.31	2661.49	112.23	5.59	3.67
3255	185.14	12.05	756.57	2668.57	125.90	5.27	3.66
3256	132.00	15.62	757.32	2684.40	114.41	4.85	3.67
3257	123.75	16.86	757.33	2680.76	117.14	4.87	3.67
3258	168.48	18.24	759.57	2640.47	116.70	5.33	3.70
3259	161.22	14.81	755.13	2671.53	117.70	4.44	3.64
3260	134.07	15.04	755.86	2662.03	110.90	4.63	3.65

ACADEMICO O1							
MD	ROP	WOB	CAUDAL	SPP	RPM	TORQUE	HSI
3261	202.00	19.96	755.11	2677.26	110.50	5.23	3.64
3262	144.00	19.88	755.86	2668.03	110.70	5.27	3.65
3263	216.00	19.45	756.59	2667.69	111.11	5.84	3.66
3264	179.56	13.93	705.50	2451.95	118.15	4.29	2.97
3265	153.39	13.89	706.79	2455.38	117.14	4.91	2.98
3266	176.57	13.92	706.10	2455.92	112.32	5.66	2.97
3267	163.64	13.78	707.40	2458.82	113.57	5.32	2.99
3268	126.00	17.20	708.09	2471.02	112.64	4.32	3.00
3269	145.44	13.60	706.82	2451.01	115.17	4.96	2.98
3270	135.69	14.12	709.36	2456.53	114.74	5.15	3.02
3271	148.65	15.67	710.01	2455.05	114.95	5.17	3.02
3272	165.27	17.20	708.05	2462.73	113.89	5.32	3.00
3273	120.77	18.90	707.41	2478.70	113.05	4.14	2.99
3274	168.55	17.14	706.77	2471.02	115.17	5.20	2.98
3275	139.85	16.54	705.48	2457.74	113.36	4.21	2.97
3276	144.00	18.01	706.13	2458.21	113.47	4.84	2.97
3277	173.14	18.73	708.06	2449.79	114.95	6.16	3.00
3278	126.62	17.72	706.09	2462.46	110.11	4.65	2.97
3279	195.16	19.91	707.36	2450.60	112.94	6.17	2.99
3280	170.18	19.85	708.03	2450.53	113.36	5.80	3.00
3281	154.50	16.08	706.10	2442.25	113.36	5.20	2.97
3282	163.64	19.79	708.06	2328.66	113.15	5.27	3.00
3283	85.85	12.00	709.36	2432.27	113.47	3.22	3.02
3284	196.09	12.00	706.74	2436.38	112.73	3.16	2.98
3285	254.12	10.81	706.06	2425.54	110.50	6.24	2.97
3286	180.00	12.86	704.83	2431.33	107.33	5.50	2.96
3287	165.70	20.02	703.53	2485.77	113.99	3.59	2.94
3288	156.76	20.80	705.48	2483.48	128.93	3.89	2.97
3289	149.87	16.45	705.48	2493.05	121.18	4.38	2.97
3290	145.40	18.18	704.26	2496.22	124.37	3.92	2.95
3291	137.30	5.37	704.20	2451.27	120.59	4.48	2.95
3292	132.75	4.36	708.68	2436.18	123.99	4.51	3.01
3293	192.00	4.28	706.77	2436.59	127.33	4.50	2.98
3294	185.40	3.47	704.82	2434.97	124.12	4.71	2.96
3295	174.00	3.90	707.38	2432.95	123.37	5.18	2.99
3296	223.58	6.03	709.35	2439.55	117.37	5.40	3.02
3297	267.75	6.95	706.74	2445.88	126.16	5.51	2.98
3298	220.00	6.06	705.48	2437.26	129.47	5.53	2.97
3299	198.00	6.52	708.12	2442.65	114.95	5.22	3.00

ACADEMICO O1							
MD	ROP	WOB	CAUDAL	SPP	RPM	TORQUE	HSI
3300	198.00	11.10	707.40	2442.85	116.14	5.52	2.99
3301	168.00	13.83	706.16	2451.27	117.25	4.95	2.98
3302	144.67	11.96	714.67	2454.91	116.92	5.67	3.08
3303	132.34	9.75	712.63	2463.40	110.50	4.29	3.06
3304	130.53	11.44	714.67	2456.66	115.06	4.55	3.08
3305	127.84	6.49	716.04	2456.06	116.48	4.47	3.10
3306	123.30	7.33	715.39	2459.63	115.82	3.89	3.09
3307	117.03	11.30	713.35	2452.89	112.12	4.57	3.07
3308	132.00	12.28	714.62	2472.09	115.92	4.65	3.08
3309	136.55	10.47	712.05	2464.75	114.20	4.81	3.05
3310	183.27	13.78	714.66	2467.98	110.70	5.21	3.08
3311	126.00	9.14	714.07	2471.76	113.89	4.88	3.08
3312	132.08	11.85	712.66	2464.95	115.49	4.93	3.06
3313	145.38	12.74	714.05	2462.86	113.15	4.93	3.08
3314	181.80	14.78	714.69	2449.12	113.57	6.25	3.08
3315	178.98	14.75	714.74	2459.43	114.20	6.12	3.09
3316	165.44	12.80	711.21	2454.51	110.38	4.94	3.04
3317	156.50	11.19	711.94	2465.29	113.55	4.56	3.05
3318	145.33	15.45	711.30	2465.42	111.09	5.31	3.04
3319	154.34	14.20	657.49	2086.30	113.47	4.34	2.40
3320	169.04	20.40	652.97	2158.28	113.78	3.85	2.35
3321	141.43	14.58	654.06	2080.21	109.63	4.86	2.36
3322	132.00	12.63	653.45	2093.81	113.15	5.19	2.36
3323	128.00	10.90	654.05	2133.43	113.36	3.45	2.36
3324	112.32	11.73	656.94	2102.87	113.26	4.16	2.40
3325	102.20	15.43	653.56	2088.89	113.47	4.10	2.36
3326	135.54	16.35	654.65	2062.87	112.23	5.45	2.37
3327	95.68	18.81	652.96	2150.26	111.41	3.76	2.35
3328	134.65	16.74	653.46	2140.55	113.15	3.97	2.36
3329	145.30	13.70	656.97	2096.14	112.84	4.51	2.40
3330	154.50	13.20	657.49	2100.67	109.82	4.94	2.40
3331	146.88	13.57	658.03	2119.96	116.04	4.97	2.41
3332	156.00	18.12	655.82	2137.05	115.60	4.55	2.38
3333	146.30	13.98	651.84	2126.30	113.57	3.92	2.34
3334	137.45	16.31	653.48	2126.56	113.57	4.58	2.36
3335	124.80	13.92	656.33	2109.60	113.47	4.61	2.39
3336	113.62	16.08	656.37	2102.48	109.82	4.19	2.39
3337	204.00	18.35	654.19	2117.76	117.93	5.08	2.37
3338	167.67	14.78	650.22	2047.98	112.23	4.84	2.32

ACADEMICO O1							
MD	ROP	WOB	CAUDAL	SPP	RPM	TORQUE	HSI
3339	131.14	14.35	652.41	2057.69	112.23	5.05	2.35
3340	170.18	14.27	652.41	2063.51	111.82	5.66	2.35
3341	158.09	17.63	653.52	2069.73	111.41	5.11	2.36
3342	161.22	17.49	651.77	2075.94	110.50	5.47	2.34
3343	197.05	19.71	647.67	2067.66	113.23	6.57	2.30
3344	181.80	16.34	649.37	2076.85	111.79	5.46	2.31
3345	208.00	14.55	648.27	2066.62	122.15	7.24	2.30
3346	151.50	25.95	646.04	2202.69	109.00	3.87	2.28
3347	167.65	28.74	647.19	2223.02	115.92	3.56	2.29
3348	187.70	10.00	654.39	2107.27	117.92	3.05	2.37
3349	216.00	5.43	653.77	2073.87	113.03	5.97	2.36
3350	232.00	6.01	655.47	2107.01	114.93	5.93	2.38
3351	237.87	9.14	632.03	1922.65	116.26	5.84	2.13
3352	249.88	10.52	631.60	1937.15	116.48	6.53	2.13
3353	326.77	17.00	632.64	1930.68	109.63	6.93	2.14
3354	156.00	10.29	629.45	1958.77	116.81	3.98	2.11
3355	145.55	10.65	631.57	1971.33	118.73	4.36	2.13
3356	205.65	11.42	630.58	1950.62	118.50	4.81	2.12
3357	230.00	15.45	630.07	1912.29	115.38	6.29	2.11
3358	236.00	15.24	629.12	1920.84	117.25	6.19	2.10
3359	202.29	12.37	630.07	1939.74	116.92	5.36	2.11
3360	168.48	11.88	629.97	1957.09	118.84	4.50	2.11
3361	220.00	19.56	630.06	1949.19	113.26	6.21	2.11
3362	288.00	21.92	629.99	1943.63	114.85	6.24	2.11
3363	231.75	21.23	631.09	1912.68	116.92	6.57	2.12
3364	218.12	22.35	631.60	1919.29	113.89	6.48	2.13
3365	232.94	17.92	629.56	1929.38	121.78	8.08	2.11
3366	218.76	13.90	628.54	2005.51	126.28	8.01	2.10
3367	218.80	14.97	631.08	1974.44	127.33	7.80	2.12
3368	167.87	15.19	629.49	1952.17	127.21	6.08	2.11
3369	144.00	30.93	626.99	2107.53	130.02	4.01	2.08
3370	147.88	22.27	624.85	1986.87	113.36	4.98	2.06
3371	154.76	23.91	622.42	1967.84	114.95	4.28	2.04
3372	155.08	16.28	625.38	1926.79	113.57	5.94	2.07
3373	216.00	17.20	625.96	1887.44	113.57	5.87	2.07
3374	142.62	19.62	622.44	1931.97	113.26	4.91	2.04
3375	141.76	22.81	622.89	1965.89	113.78	5.17	2.04
3376	141.43	22.58	621.12	1926.79	112.93	5.54	2.02
3377	154.65	24.80	622.63	1960.20	112.10	4.90	2.04

ACADEMICO O1							
MD	ROP	WOB	CAUDAL	SPP	RPM	TORQUE	HSI
3378	157.23	21.56	624.54	1919.03	110.45	4.98	2.06
3379	158.40	20.43	624.15	1915.27	102.19	5.25	2.05
3380	188.57	23.85	624.10	1925.76	110.18	6.35	2.05
3381	188.57	15.85	622.63	1916.31	112.93	5.56	2.04
3382	237.18	21.75	623.44	1904.53	116.48	6.58	2.05
3383	228.71	22.96	622.44	1906.86	85.89	7.30	2.04
3384	180.00	25.32	620.91	1948.80	120.47	5.57	2.02
3385	156.92	19.65	631.61	1999.30	109.43	4.17	2.13
3386	132.73	24.02	629.96	2014.57	113.78	4.20	2.11
3387	120.01	21.92	626.99	2029.85	116.70	3.83	2.08
3388	116.47	24.66	627.50	2010.17	114.10	4.55	2.09
3389	162.00	18.41	630.54	1959.94	111.21	5.93	2.12
3390	117.29	21.86	628.93	2018.46	116.14	3.80	2.10
3391	22.34	14.12	632.54	1996.19	114.84	3.74	2.14