

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE SEPARACIÓN DE
PARTÍCULAS MAGNÉTICAS EN EL FLUIDO DE
PERFORACIÓN**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por la Br. Madeleine Gómez
Para optar al Título de
Ingeniera Química

Caracas, 2015

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE SEPARACIÓN DE PARTÍCULAS MAGNÉTICAS EN EL FLUIDO DE PERFORACIÓN

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Pedro Díaz

TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Ángel Huerta

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por la Br. Madeleine Gómez
Para optar al Título de
Ingeniera Química

Caracas, 2015

Caracas, Noviembre de 2015


Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Química, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por la Bachiller Gómez F. Madeleine J., titulado:

“Optimización del Proceso de Separación de Partículas Magnéticas en el Fluido de Perforación”

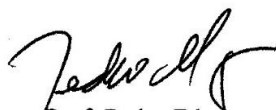
Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniera Química, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por los autores, lo declaran APROBADO.



Prof. José Sorrentino
Jurado



Prof. María Rodríguez
Jurado



Prof. Pedro Díaz
Tutor Académico



Caracas, 03 de noviembre de 2015

ACTA


MENCIÓN HONORÍFICA


Los miembros del Jurado examinador del Trabajo Especial de Grado para optar al Título de Ingeniera Química presentado por la bachiller MADELEINE J. GÓMEZ F. (C.I. 20.327.686) y cuyo título es **"OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE SEPARACIÓN DE PARTÍCULAS MAGNÉTICAS EN EL FLUIDO DE PERFORACIÓN"** consideramos que merece ser reconocido con una Mención Honorífica.


Luego de finalizada la defensa pública y considerando que:

1. La Br. Gómez luego de asignada a su sitio de trabajo con la empresa Schlumberger realizó un diagnóstico que le permitió detectar un problema a ser resuelto, formularlo como proyecto y desarrollarlo como tema de Trabajo Especial de Grado.
2. No solo cumplió a cabalidad los objetivos planteados, sino que fue más allá aportando una mayor información al estudio realizado, así como una solución viable y aplicable a corto plazo para el problema estudiado, proponiendo un cambio en la ubicación tradicional del equipo magnético estudiado que hace más efectivo el proceso de remoción de partículas magnéticas.
3. Demostró, tanto en el trabajo escrito como en la presentación oral, un excelente dominio de los aspectos teóricos y prácticos del problema.

Acordado y firmado a los tres días del mes de noviembre del año dos mil quince.


Prof. José Ángel Sorrentino
Jurado


Profa. María Alejandra Rodríguez
Jurado


Prof. Pedro Díaz
Tutor Académico

DEDICATORIA

A Dios, por la salud y oportunidades que me brida día tras día, por darme la fuerza y el valor para hacer este sueño realidad.

A mis padres, mi mayor y mejor ejemplo, por darme la vida, por enseñarme que la perseverancia y el esfuerzo son el camino para lograr los objetivos, por estar conmigo en cada momento de mi vida y comprenderme en los momentos más difíciles, por amarme incondicionalmente y apoyarme en todas las decisiones que he tomado. No existen palabras que describan lo importante que son para mí y lo agradecida que estoy con ustedes.

A mis hermanas, Mariana y Amanda quienes con su cariño y compañía me dan los mejores momentos de mi vida.

A mis abuelos, pilares fundamentales durante mi niñez. Una gran parte de lo que soy se lo debo a ustedes.

A mi tío Arturo, por darme sus mejores consejos en cada etapa de mi vida y por siempre estar presente.

A César, por estar en las buenas y en las malas, apoyándome en todo momento.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Central de Venezuela, la casa que vence las sombras, por haberme dado la oportunidad de escalar un peldaño más en el campo del conocimiento.

A Schlumberger por brindarme la oportunidad de realizar este Trabajo Especial de Grado y dar mi primer paso en el ámbito profesional.

A mi tutor académico, profesor Pedro Díaz, por recibirme y haberme preparado para mi experiencia en campo y por todos sus valiosos comentarios y sugerencias durante la realización de este Trabajo Especial de Grado.

A mi tutor industrial, ingeniero Ángel Huerta, por darme todo su apoyo en el desarrollo de este Trabajo Especial de Grado

Al profesor Humberto Kum, que siempre estuvo pendiente de mí durante esta etapa, brindándome sus consejos en todo momento.

A todos los que contribuyeron conmigo para alcanzar esta preciada meta.

Gracias.

Gómez F. Madeleine J.

OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE SEPARACIÓN DE PARTÍCULAS MAGNÉTICAS EN EL FLUIDO DE PERFORACIÓN

**Tutor académico: Prof. Pedro Díaz. Tutor industrial: Ángel Huerta. Tesis.
Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Química. Año
2015, 69 p.**

Palabras Claves: Pozos petrolíferos, Partículas magnéticas, Fluido de perforación

Resumen. La presencia de partículas magnéticas en el fluido de perforación es altamente perjudicial para el funcionamiento del PowerDrive. Un exceso en la cantidad de este tipo de partículas trae como consecuencia la desorientación de la herramienta y consecuentemente la pérdida del control direccional del pozo. Con la finalidad de optimizar el proceso de separación de partículas magnéticas en el fluido de perforación, se realizaron pruebas para determinar la posición, la cantidad necesaria y la frecuencia de limpieza adecuada de los magnetos colocados en el sistema de circulación de lodo. Los resultados de las pruebas realizadas fueron obtenidos mediante la cuantificación y la clasificación granulométrica de la masa de partículas magnéticas adheridas a la superficie de los imanes. La ubicación del magneto fue determinada mediante la comparación de estas variables cuando se colocaba el imán antes y después de los equipos de control de sólidos del taladro. El análisis de los resultados obtenidos en esta prueba, demuestra que el magneto debe ser ubicado después de los equipos de control de sólidos ya que estos equipos son capaces de eliminar más del 57% de las partículas magnéticas que provienen del pozo. Luego de establecer la ubicación más adecuada, se realizó una evaluación para determinar si el magneto colocado después de los equipos de control de sólidos era capaz de atraer todas las partículas que circulan en el fluido. En este análisis se evidenció la necesidad de colocar más de un magneto en serie, sin embargo, debido a la geometría del canal, no es posible la implementación de esta mejora en el proceso en todos los taladros. Por otra parte, en vista de que no se alcanzó el punto de saturación del imán en ninguna de las pruebas realizadas cada 12 horas, se recomienda remover las partículas magnéticas con esta frecuencia, sin embargo, se deben tomar en cuenta las operaciones que se estén llevando a cabo en el taladro para identificar situaciones que puedan generar una mayor cantidad de partículas magnéticas y la necesidad de remover las mismas con una mayor frecuencia.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS	x
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	2
I.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
I.2 ANTECEDENTES	6
I.3 OBJETIVOS	10
I.3.1 Objetivo General.....	10
I.3.2 Objetivos Específicos	10
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	11
II.1 PERFORACIÓN DIRECCIONAL	11
II.2 SISTEMAS DE MOTORES DE FONDO	11
II.3 SISTEMAS ROTATIVOS DIRECCIONALES	12
II.3.1 PowerDrive.....	12
II.4 FLUIDOS DE PERFORACIÓN	14
II.4.1 Remoción y suspensión de los ripios del pozo.....	14
II.4.2 Control de las presiones de formación	14
II.4.3 Mantenimiento de la estabilidad del hoyo.....	14
II.5 SISTEMA DE CIRCULACIÓN DE FLUIDO DE PERFORACIÓN	15
II.6 CONTROL DE SÓLIDOS	16
II.6.1 Las Zarandas.....	18
CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO	20
III.1 DETERMINACIÓN DE MASA DE LA MUESTRA RECOLECTADA	20
III.2 UBICACIÓN DEL MAGNETO.....	24
III.3 CANTIDAD DE MAGNETOS	25
III.4 FRECUENCIA DE LIMPIEZA ÓPTIMA	26
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	27
IV.1 FRECUENCIA DE REMOCIÓN DE PARTÍCULAS EN PRUEBAS	27

IV.2 UBICACIÓN DEL MAGNETO	29
IV.2.1 Cantidad de partículas magnéticas totales	30
IV.2.2 Granulometría de las muestras	32
IV.2.3 Otras consideraciones	41
IV.3 CANTIDAD DE MAGNETOS	42
IV.4 FRECUENCIA ÓPTIMA DE REMOCIÓN DE PARTÍCULAS MAGNÉTICAS	45
IV.4.1 Tipo de fluido de perforación	45
IV.4.2 <i>Sidetrack</i>	47
IV.4.3 Limpieza de hoyo.....	49
IV.4.4 Otras consideraciones	51
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	54
V.1 CONCLUSIONES	54
V.2 RECOMENDACIONES	56
BIBLIOGRAFÍA	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1: Fallas en los <i>Torquers</i> del PowerDrive en el año 2012 a nivel mundial.....	3
Figura N° 2: Partículas metálicas alojadas en el <i>Torquer</i> del PowerDrive.....	6
Figura N° 3: Corrosión interna de tuberías de perforación.....	7
Figura N° 4: Magneto convencional y EZ clean.....	8
Figura N° 5: Componentes de los <i>Torquers</i>	13
Figura N° 6: Sistema de circulación de fluido de perforación.....	15
Figura N° 7: Clasificación de los tamaños de partículas	17
Figura N° 8: Zaranda lineal.....	19
Figura N° 9: Esquema de la metodología a seguir en el desarrollo del trabajo	20
Figura N° 10: Procedimiento experimental para determinar la masa de partículas depositadas sobre el magneto.....	21
Figura N° 11: Magneto ubicado en el sistema de circulación de fluido de perforación	21
Figura N° 12: Dilución de una muestra con gasoil	23
Figura N° 13: Clasificación granulométrica de las muestras	23
Figura N° 14: Determinación de la masa de partículas magnéticas.....	24
Figura N° 15: Posibles ubicaciones del magneto en el sistema de circulación de fluidos.....	24
Figura N° 16: Cantidad promedio de partículas magnéticas en función del tiempo... 28	
Figura N° 17: Diferencia entre las cantidad de partículas magnéticas adheridas a la superficie del magneto colocado antes y después de los equipos de control de sólidos	31
Figura N° 18: Distribución de tamaño de partícula de las muestras recolectadas antes de los equipos de control de sólidos.....	39

Figura N° 19: Distribución de tamaño de partícula de las muestras recolectadas antes de los equipos de control de sólidos.....	40
Figura N° 20: Muestras recolectadas por dos magnetos dispuestos en serie después de los equipos de control de sólidos	44
Figura N° 21: Partículas magnéticas generas durante la realización de un <i>sidetrack</i> . 48	
Figura N° 22: Masa de partículas magnéticas y relación entre el tiempo de bombeo y el tiempo de perforación de la prueba 9	48
Figura N° 23: Masa de partículas magnéticas y relación entre el tiempo de bombeo y el tiempo de perforación de la prueba 1	50
Figura N° 24: Masa de partículas magnéticas y relación entre el tiempo de bombeo y el tiempo de perforación de la prueba 4	50
Figura N° 25: Masa de partículas magnéticas y relación entre el tiempo de bombeo y el tiempo de perforación de la prueba 6	51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1: Fallas por <i>Jamming</i> en D&M Venezuela West desde diciembre de 2013	5
Tabla N° 2: Resumen de las pruebas realizadas	26
Tabla N° 3: Masa total promedio de partículas magnéticas antes y después de los equipos de control de sólidos cada 12 y 24 horas.	28
Tabla N° 4: Masa total de partículas magnéticas en las muestras recolectada antes de los equipos de control de sólidos cada 12 y 24 horas	29
Tabla N° 5: Masa total promedio de partículas magnéticas recolectadas en las pruebas 1 y 2	30
Tabla N° 6: Masa total promedio de partículas magnéticas recolectadas en las pruebas 4 y 5	30
Tabla N° 7: Masa total promedio de partículas magnéticas recolectadas en las pruebas 6 y 7	31
Tabla N° 8: Masa de partículas magnéticas clasificada por tamaño de las muestras recolectadas en la prueba 4	32
Tabla N° 9: Masa de partículas magnéticas clasificada por tamaño de las muestras recolectadas en la prueba 5	33
Tabla N° 10: Promedio de la cantidad de partículas magnéticas clasificado por tamaño en las pruebas 4 y 5	33
Tabla N° 11: Comparación entre la cantidad de partículas magnéticas inferiores a 150 Mesh entre la muestra 1 de la prueba 4 y la muestra 2 de la prueba 5.....	34
Tabla N° 12: Comparación entre la cantidad de partículas magnéticas inferiores a 150 Mesh entre la muestra 2 de la prueba 4 y la muestra 1 de la prueba 5.....	35
Tabla N° 13: Masa de partículas magnéticas clasificada por tamaño de las muestras recolectadas en la prueba 6	35
Tabla N° 14: Masa de partículas magnéticas clasificada por tamaño de las muestras recolectadas en la prueba 7	36

Tabla N° 15: Promedio de la cantidad de partículas magnéticas clasificado por tamaño en las pruebas 6 y 7	36
Tabla N° 16: Comparación entre la cantidad de partículas magnéticas inferiores a 150 Mesh entre la muestra 3 de la prueba 6 y la muestra 1 de la prueba 7.....	37
Tabla N° 17: Comparación entre la cantidad de partículas magnéticas inferiores a 150 Mesh entre la muestra 4 de la prueba 6 y la muestra 4 de la prueba 7.....	37
Tabla N° 18: Distribución porcentual de tamaño de partículas magnéticas en las pruebas 4 y 6	39
Tabla N° 19: Distribución porcentual de tamaño de partículas magnéticas después de los equipos de control de sólidos	40
Tabla N° 20: Masa de partículas magnéticas clasificada por tamaños en la prueba 3.....	42
Tabla N° 21: Porcentaje de partículas magnéticas recuperadas por el segundo magneto en la prueba 3	43
Tabla N° 22: Masa de partículas magnéticas clasificada por tamaños en la prueba 7	43
Tabla N° 23: Porcentaje de partículas magnéticas recuperadas por el segundo magneto en la prueba 7	44
Tabla N° 24: Comparación de cantidad de partículas promedio en las pruebas 4 y 6.	46
Tabla N° 25: Masa de partículas magnéticas clasificada por tamaños en la prueba 8.....	47

INTRODUCCIÓN

La perforación direccional se ha convertido en una operación fundamental en el desarrollo de reservas de hidrocarburos, ya que ha permitido la explotación de yacimientos antiguamente inaccesibles y que no eran rentables desde el punto de vista económico. Recientemente, en búsqueda de tecnologías que operen de forma más eficiente en este campo, las empresas de servicios petroleros han desarrollado sistemas rotativos direccionales, que a diferencia de los sistemas convencionales de motores de fondo, son capaces de direccionar un pozo con rotación continua de la sarta.

El PowerDrive, es la herramienta direccional desarrollada por Schlumberger que se fundamenta en esta tecnología y se utiliza en la mayoría de los pozos perforados por esta compañía en la zona occidental de Venezuela. El correcto funcionamiento de esta herramienta se ve perjudicado por la presencia de partículas magnéticas en el fluido de perforación, ya que las mismas generan fricción excesiva en el sistema y se van acumulando paulatinamente hasta causar atascamientos mecánicos internos de la herramienta. Para evitar esta falla, se instala un magneto en la línea de flujo de lodo proveniente del pozo, que se encarga de recolectar una gran cantidad de partículas magnéticas generadas durante la perforación. Actualmente, la cantidad recolectada por este imán no se cuantifica, haciendo imposible determinar si el proceso de separación de partículas está siendo del todo eficiente.

En este trabajo se presentan los fundamentos de la investigación, el marco teórico y el marco metodológico para evaluar la eficiencia del proceso, con la finalidad de determinar la frecuencia con la cual deben ser removidas las partículas atraídas por el magneto. Del mismo modo, mediante el análisis de los datos obtenidos, se estudiarán los factores que influyen en la cantidad de partículas magnéticas existentes en el fluido de perforación y se determinará la posición y cantidad más adecuada de magnetos en la línea de retorno del lodo. Esto permitirá optimizar el proceso de separación de las partículas magnéticas y consecuentemente disminuir la incidencia de las fallas en los PowerDrive, evitando pérdidas de capital y de confiabilidad al segmento *Drilling and Measurements Venezuela West*.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

I.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los sistemas rotativos direccionales permiten planificar y ejecutar la perforación de pozos con geometrías complejas, incluyendo pozos horizontales y de alcance extendido, y a diferencia de los sistemas convencionales de motores de fondo, permiten la rotación continua de la sarta de perforación mientras se dirige la trayectoria del pozo. Este sistema transfiere peso a la mecha en forma más efectiva, permitiendo un aumento en la tasa de penetración y un mejor control direccional en las tres dimensiones (Hendricks, 2000). El PowerDrive es la herramienta desarrollada por la empresa Schlumberger que cuenta con esta tecnología y se emplea en más del 80% de los pozos perforados en la zona occidental de Venezuela. *Drilling and Measurements* (D&M) es el segmento de esta compañía encargado de prestar el servicio de perforación direccional y con la finalidad de garantizar la satisfacción del cliente, evitar pérdidas de capital y de confiabilidad, considera que es indispensable contar con el desempeño óptimo de todas sus tecnologías durante cada etapa de perforación, para ello, es necesario prevenir fallas en las herramientas y aumentar la eficiencia de las mismas.

En la unidad de control del PowerDrive hay dos embragues electrónicamente opuestos llamados *Torquers*, en los cuales pueden originarse diversas fallas. En la Figura N° 1 se muestran los resultados de un estudio estadístico realizado a nivel mundial en el año 2012 sobre los problemas que afectan a estos componentes (Schlumberger, 2013). En el mismo se aprecia que la falla más frecuente en el *Upper Torquer* y en el *Lower Torquer* es el *Jamming* o atascamiento.

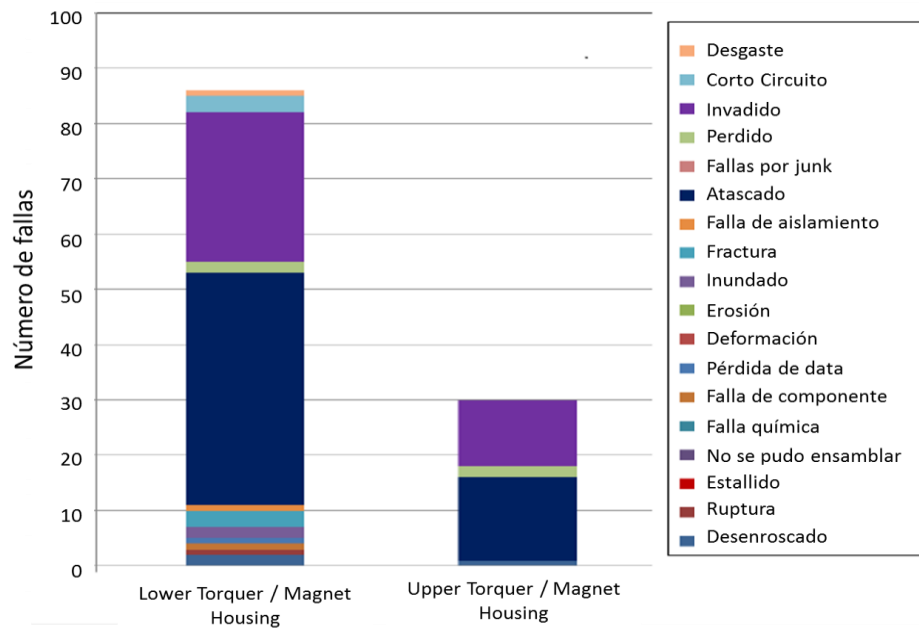


Figura N° 1: Fallas en los *Torquers* del PowerDrive en el año 2012 a nivel mundial. Modificado (Schlumberger, 2013)

El *Jamming* es un fenómeno que se origina debido a la presencia de partículas magnéticas, plásticos, gomas, textiles y madera en el sistema de lodos de perforación y trae como consecuencia atascamientos en los componentes internos de la herramienta. De todos los materiales sólidos mencionados anteriormente, la mayor incidencia de fallas se origina por la presencia de partículas magnéticas, debido a la estructura interna de la herramienta y a que estas partículas se encuentran con más frecuencia y en mayor concentración en el fluido (Schlumberger, 2013).

Los *Toquers* están compuestos por un alternador magnético permanente, un *impeller* y el *magnet housing*. Estas piezas juegan un papel fundamental en el funcionamiento del PowerDrive ya que son utilizados para suministrar potencia a la herramienta y mantener la posición y la tasa rotacional en los valores deseados mediante un acoplamiento electromagnético entre el *magnet housing* y el estator del alternador magnético permanente (Ribeiro, 2014).

Debido a la naturaleza magnética de los embragues, estos son capaces de atraer cualquier partícula magnética que circule en el fluido de perforación. Dependiendo de

la cantidad presente en el sistema, estas partículas pueden acumularse paulatinamente hasta generar empaquetamientos en la sección interna de la herramienta o *Jamming*. Esta acumulación de viruta magnética trae como resultado la desorientación del PowerDrive y consecuentemente la pérdida del control direccional del mismo.

La gravedad y regularidad de esta problemática ha impulsado a buscar soluciones que permitan disminuir las pérdidas de tiempo y capital. La clave para lograr este objetivo es mantener el fluido de perforación libre de partículas magnéticas y para ello, se instala un imán o magneto en el distribuidor de fluido de perforación hacia los equipos de control de sólidos capaz de generar un campo magnético lo suficientemente fuerte para recuperar una elevada cantidad de las partículas magnéticas que se encuentran circulando en el fluido. En este punto de distribución, el fluido se encuentra en las mismas condiciones con las cuales sale del hoyo y no ha sido sometido a ningún proceso de separación o reacondicionamiento. La instalación del magneto es una solución práctica y económica para la problemática planteada, sin embargo, la eficiencia de este proceso de separación se ve afectada por la frecuencia de remoción de las partículas magnéticas adheridas a la superficie del imán, ya que si el imán alcanza su punto de saturación, la cantidad de partículas atraídas disminuirá y la turbulencia generada por el fluido de perforación puede ser capaz de arrastrar las partículas adheridas en la zona superficial, permitiendo que las partículas sean devueltas al sistema de circulación.

La frecuencia de remoción de las partículas adheridas a la superficie del imán depende básicamente de las decisiones que tome el personal de campo, no se cumple ningún procedimiento estricto y la cantidad de partículas magnéticas recuperadas por el magneto no se cuantifica, haciendo imposible determinar si el proceso de separación está siendo realmente eficiente.

Particularmente en D&M Venezuela West se han originado seis eventos de *Jamming* por partículas magnéticas en los PowerDrive desde diciembre del año 2013. En la Tabla N° 1 se muestran cada una de estas fallas en forma detallada.

Tabla N° 1: Fallas por *Jamming* en D&M Venezuela West desde diciembre de 2013. (QUEST, 2015)

Pozo	1	2	3	4	5	6
Ciente	PDVSA SUR DEL LAGO TRUJILLO	PDVSA SUR DEL LAGO TRUJILLO	PDVSA SUR DEL LAGO TRUJILLO	PETROBOSCAN	PDVSA SUR DEL LAGO TRUJILLO	PDVSA SUR DEL LAGO TRUJILLO
Sección (in)	8,5	12,25	12,25	12,25	8,5	12,25
Fecha	Dec 18, 2013	Feb 19, 2014	Mar 25, 2014	May 17, 2014	Nov 16, 2014	Feb 19, 2015
Profundidad de la falla (ft)	15849	15290	14471	6750	11631	10813
Tiempo de bombeo (h)	153,15	64	58	10,76	100,43	34,29
Tiempo de perforación (h)	222,66	197,8	95	21,04	179,5	53,74
Magneto	NO	NO	NO	NO	SI	SI

La Tabla N° 1 demuestra que el *Jamming* en los PowerDrive debido a las partículas magnéticas contenidas en el fluido de perforación es un problema frecuente en la locación.

La mayor problemática se encuentra en los campos de la zona Sur de Lago-Trujillo. Los pozos perforados en esta locación se caracterizan por una tasa de penetración bastante baja y por alcanzar grandes profundidades. Por otra parte, se puede observar que en la mayoría de los pozos donde ocurrieron las fallas no se encontraba instalado el magneto en el distribuidor de fluido, sin embargo, en los últimos eventos si se instaló. Esta afirmación indica que el proceso de separación de metales actualmente no está siendo del todo eficiente ya que de igual forma se producen fallas cuando el imán se encuentra en la línea de flujo.

En el presente Trabajo Especial de Grado se determinará la posición, el número y la frecuencia de limpieza óptima de los magnetos utilizados. Del mismo modo, mediante el análisis de los datos generados, se estudiarán los factores que influyen en la cantidad de partículas magnéticas que circulan en el fluido de perforación. Esto permitirá aumentar la eficiencia del proceso de separación de partículas metálicas y disminuir la incidencia de las fallas en los PowerDrive utilizados por el segmento D&M en la zona occidental de Venezuela.

I.2 ANTECEDENTES

En la siguiente sección se presentan los antecedentes de la investigación clasificados según los estudios realizados en cuanto a los parámetros involucrados en la cantidad de partículas magnéticas existentes en el fluido de perforación y la eficiencia del proceso de separación de las mismas.

Parámetros involucrados en la cantidad de partículas magnéticas existentes en el fluido de perforación

El estudio titulado *Study for PowerDrive Torquer Jamming in Shaybah Field* tenía como finalidad determinar las causas potenciales de *Jamming* en los PowerDrive. La investigación fue desarrollada por Schlumberger en el año 2011 mediante la inspección física de las piezas internas de las herramientas que presentaron la falla y se determinó que el *Jamming* de los *Torquers* del PowerDrive era producido principalmente por las partículas magnéticas (Figura N° 2) que circulan en el fluido de perforación.



Figura N° 2: Partículas metálicas alojadas en el *Torquer* del PowerDrive (Schlumberger, 2011)

El autor sugiere que la cantidad de viruta magnética se genera principalmente por dos razones: al desgaste del revestidor y a la corrosión de los canales o tuberías por donde fluye el lodo de perforación (Figura N° 3).



Figura N° 3: Corrosión interna de tuberías de perforación (Schlumberger, 2011)

El desgaste del revestidor fue evaluado en 7 pozos de secciones de 12¼” y 14¾” por Matthew Cullen (2013) en un estudio titulado “*Flowline Magnet Recovery Analysis in the 12¼” and 14¾” Sections of a 7-well Project*”. Los resultados de la investigación, fueron obtenidos mediante una evaluación y cuantificación de la cantidad de partículas magnéticas depositadas sobre un imán ubicado en el distribuidor de fluido de perforación hacia los equipos de control de sólidos y además se emplearon datos simulados para estimar la magnitud de las fuerzas laterales ejercidas sobre el revestidor. En la sección de 14¾” el promedio diario de partículas recolectadas fue de 275 ± 75 gramos (g) con un pico de 2300 ± 400 g, mientras que en la sección de 12¼” fue de 160 g con un pico de 1800 ± 500 g. Estos picos en las cantidades de partículas metálicas recolectadas se deben principalmente al roce de la mecha con el revestidor cuando se procedía a limpiar la zapata y al tiempo en el cual se realizaba la operación. Por lo general, esta elevada recuperación de metal culminaba en un lapso de tiempo no mayor a 36 horas, en donde se garantizaba la limpieza del hoyo. Estos resultados indican que el diámetro de la sección y la tasa de penetración durante la limpieza de la zapata, son variables que afectan directamente la cantidad de partículas magnéticas generadas durante la perforación de un pozo.

Otra variable que fue objeto de estudio en la investigación realizada por Cullen fue la inclinación de los pozos construidos. Con respecto a esto, no se observaron diferencias significativas en la cantidad de partículas magnéticas recolectadas en pozos de bajo ángulo (menores a 20°) y de alto ángulo (mayores a 45°) de inclinación.

En contraste con lo mencionado anteriormente, una gran cantidad de metal circulando en lodo puede encontrarse cuando se hacen operaciones de cambio de dirección del pozo con ayuda de *whipstock* o cucharas deflectoras, esta afirmación fue hecha en un estudio realizado por Schlumberger en el año 2012 titulado *Sidetrack from vertical whipstock with PowerDrive*, en donde se recolectó una gran cantidad de metal debido al roce de la mecha con la superficie metálica del *whipstock*.

Eficiencia del magneto

En cuanto a la eficiencia del proceso de separación de partículas magnéticas en el fluido de perforación, Hamza Fkerin (2012) realizó un estudio titulado *Ditch Magnet Optimization* en donde se hacía una comparación entre dos tipos de magnetos: el EZ Clean y el magneto usado convencionalmente a nivel mundial, el cual es objeto de estudio en el presente trabajo (Figura N° 4). La finalidad de la investigación era determinar cuál de los dos tipos de imanes recuperaba una mayor cantidad de partículas magnéticas a la salida de las zarandas operando a condiciones relativamente similares, para estudiar la posibilidad de reemplazo de los magnetos utilizados convencionalmente por los EZ Clean que poseen una mayor área de contacto con el fluido.

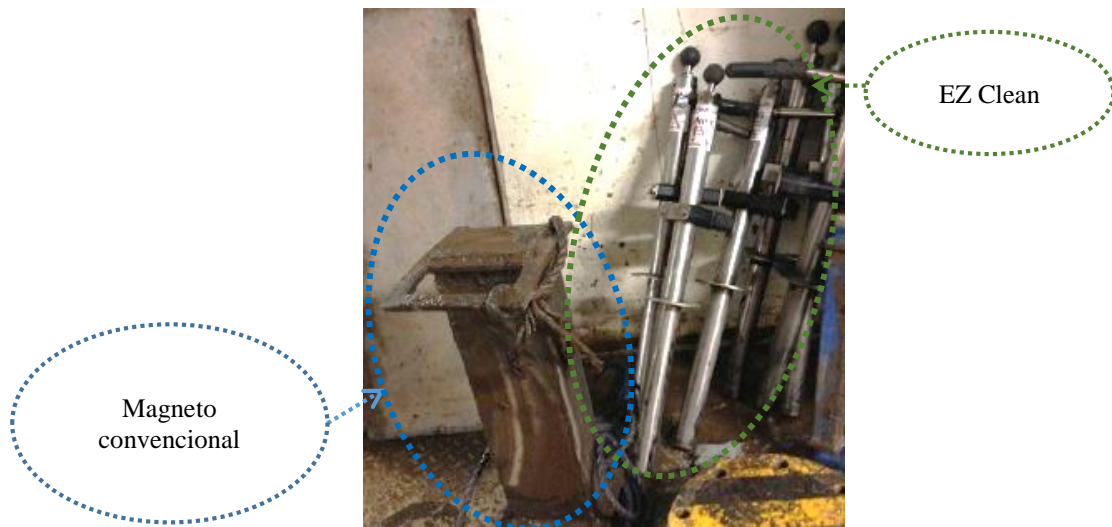


Figura N° 4: Magneto convencional y EZ clean (Fkerin, 2012)

Los EZ Clean mostraron una recuperación promedio de 66 g/día, mientras que el magneto utilizado convencionalmente recuperó tan sólo 15 g/día en promedio. Con esta diferencia tan significativa se evidencia que el magneto utilizado convencionalmente no es del todo eficiente en el proceso de recuperación de metales. Sin embargo, Hamza Fkerin sugiere que por motivos económicos es imposible sustituir los magnetos existentes por los nuevos EZ Clean.

Por otra parte, en otro estudio de Matthew Cullen en 2012 titulado *PowerDrive Lower Torquer jammed with fine magnetic solids*, se determinó que la eficiencia de un magneto convencional colocado en la línea de retorno de fluido se veía afectada cuando la masa de partículas magnéticas excedía los 0,95 g/cm², después de este valor, la turbulencia generada por el fluido de perforación era capaz de arrastrar las partículas adheridas en la zona superficial, ya que el campo magnético en esta zona no era suficientemente fuerte para mantenerlas unidas al imán.

Cullen sugiere que la separación de las partículas magnéticas del fluido de perforación es clave para evitar fallas en las herramientas y daños en las estructuras de cortes de la mecha. Recomienda el uso de más de un magneto para aumentar la eficiencia del proceso de separación ya que podrían haber fallas aun si el imán no se encuentra saturado, debido a la posibilidad de que una parte del fluido de perforación no entre en contacto directo con el imán.

I.3 OBJETIVOS

I.3.1 Objetivo General

Optimizar el proceso de separación de partículas magnéticas del fluido de perforación para disminuir la incidencia de fallas en los PowerDrive.

I.3.2 Objetivos Específicos

- Diseñar y ejecutar un programa de recolección de muestras.
- Determinar la ubicación más apropiada del magneto en el sistema de circulación de fluido de perforación.
- Determinar la cantidad de magnetos necesarios en el sistema de circulación de fluido de perforación.
- Establecer la frecuencia con la cual deben ser removidas las partículas metálicas del magneto para evitar la saturación del mismo.
- Analizar los factores que inciden en la cantidad de partículas magnéticas generadas durante la perforación de un pozo.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

II.1 PERFORACIÓN DIRECCIONAL

La perforación direccional se ha convertido en una herramienta fundamental para el desarrollo de reservas de hidrocarburos. Probablemente, el aspecto más importante de este tipo de perforación es que permite la extracción de reservas de hidrocarburos que antes no eran rentables desde el punto de vista económico.

La perforación direccional controlada es definida como la ciencia y el arte de desviar un pozo a través de una trayectoria planeada desde un punto ubicado en la superficie terrestre hasta un objetivo predeterminado en el subsuelo (Schlumberger, 2001).

Para direccionar un pozo se emplean dos tecnologías básicas: los sistemas motores de fondo y los sistemas rotativos direccionales.

II.2 SISTEMAS DE MOTORES DE FONDO

Un motor de fondo consta de una sección para la generación de potencia, una sección curva de 0 a 3°, un eje impulsor y la mecha. La perforación direccional con motor de fondo se logra en dos modos: rotación y deslizamiento. En modo rotación, la sarta de perforación gira completamente; en modo deslizamiento solo gira la mecha, mientras el resto la sarta se mantiene estática. El modo deslizamiento se emplea para iniciar el cambio de dirección en el pozo, la sarta de perforación es detenida en una posición tal que la sección curva del motor se encuentre apuntando en la dirección de la nueva trayectoria deseada.

Esta tecnología ha funcionado de manera extraordinaria, sin embargo, se requiere extrema precisión para orientar la sección curva del motor. Una de las mayores desventajas de esta tecnología, es que mientras opera en modo deslizamiento, la sarta

tiende a sufrir atascamientos en el hoyo. Por otra parte, la falta de rotación de la tubería disminuye la capacidad del fluido de perforación de remover los ripios y disminuye la potencia disponible para hacer mover la mecha, lo cual, sumado a la fricción del deslizamiento, reduce la tasa de penetración.

II.3 SISTEMAS ROTATIVOS DIRECCIONALES

El próximo paso en la perforación direccional es el desarrollo de los sistemas que permiten la rotación continua de la sarta mientras se controla la dirección de la mecha.

En la actualidad, la industria petrolera clasifica los sistemas rotativos direccionales en dos grupos: *Point the Bit* y *Push the Bit*. El sistema *Point the Bit* tiene una estructura similar a los motores de fondo, ya que consta de una sección curva que se encarga de direccionar el pozo. La diferencia está en que la dirección en la cual apunta la herramienta es controlada por un motor eléctrico y no de forma manual. El sistema *Push the Bit* tiene un mecanismo de funcionamiento totalmente diferente. Con esta tecnología se direcciona la trayectoria del hoyo aplicando una fuerza lateral continua sobre la formación, esto se logra a través de unos brazos accionados por el fluido de perforación y controlados por la electrónica de la herramienta. (Schaaf, Pafitis, & Guichemerre, 2000)

II.3.1 PowerDrive

El PowerDrive X5/X6 es una herramienta direccional desarrollada por Schlumberger que se fundamenta en el sistema *Push the Bit*. El PowerDrive está compuesto por dos secciones principales: *Bias Unit* y *Control Unit*.

El *Bias Unit* es el sistema mecánico de la herramienta que tiene como finalidad convertir la caída de presión hidráulica generada por los chorros de la mecha en energía mecánica para direccionar el pozo. El *Control Unit* se encarga de controlar el *Bias Unit*, para ello, contiene un paquete de electrónica y una serie de sensores. El *Control Unit* del PowerDrive define y mantiene la dirección en la cual se perfora el pozo. Esto se logra mediante el control de una válvula giratoria capaz de desviar el

fluido de perforación que pasa a través de la herramienta hacia los Pads del *Bias Unit*. Los pads del *Bias Unit* serán accionados por el fluido de forma tal que empujen la formación en la dirección opuesta a la dirección planeada, con la finalidad de desviar la mecha en ese sentido. La unidad de control puede recibir instrucciones desde la superficie para cambiar la posición de la válvula giratoria y consecuentemente la dirección en la cual el pozo es perforado (Clarke, 2014).

La dirección de la rotación del *Control Unit* viene determinada por la acción del *Upper Torquer* and *Lower Torquer*. Los *Torquers* son embragues electrónicamente opuestos y son utilizados para mantener la posición y la tasa rotacional de la válvula giratoria en los valores deseados. Como se muestra en la Figura N° 5, los *Torquers* están compuestos por tres partes: un *impeller*, el *magnet housing* y un alternador magnético permanente.

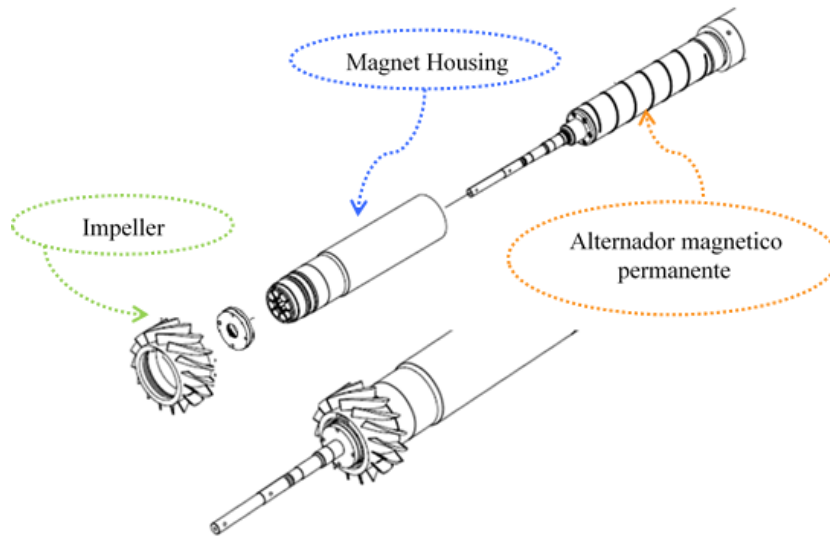


Figura N° 5: Componentes de los *Torquers* (Ribeiro, 2014)

Los *impellers* son accionados por el fluido de perforación para proporcionar la potencia demandada por la electrónica de la herramienta. Con la finalidad de cambiar la posición de la válvula rotatoria, se realiza un acoplamiento electromagnético entre *magnet housing* y el alternador magnético permanente. En el caso de que el *Control Unit* necesite moverse en dirección antihoraria, la unidad hace un corto circuito en el *Lower Torquer*, si por el contrario, es necesario que el *Control Unit* gire en dirección horaria el corto circuito se produce en el *Upper Torquer*. (Inerowicz, 2013)

II.4 FLUIDOS DE PERFORACIÓN (M-I Swaco, 2001)

Los fluidos de perforación desempeñan numerosas funciones en la perforación de un pozo. Sus funciones principales son: retirar y suspender los ripios generados por los cortes de la mecha, controlar las presiones de la formación y mantener la estabilidad del hoyo.

II.4.1 Remoción y suspensión de los ripios del pozo

Los ripios deben ser retirados del pozo a medida que son generados por la mecha. A este fin, se hace circular un fluido de perforación dentro de la sarta y a través de la mecha, el cual arrastra y transporta los recortes hasta la superficie, subiendo por el espacio anular. La remoción de sólidos del hoyo depende del tamaño, la forma y la densidad de los recortes, unidos a la tasa de penetración o ROP por sus siglas en inglés. Cuando se efectúan conexiones de tuberías u otras operaciones durante las cuales no hay circulación de fluido, los recortes se mantienen suspendidos debido a que el fluido se gelifica bajo condiciones estáticas.

II.4.2 Control de las presiones de formación

El control de las presiones de formación garantiza la seguridad en las operaciones de perforación. A medida de que aumenta la presión de la formación, se aumenta la densidad del fluido de perforación agregando sólidos densificantes para equilibrar las presiones y mantener la estabilidad del hoyo. Esto impide que los fluidos de la formación fluyan hacia el pozo evitando arremetidas.

II.4.3 Mantenimiento de la estabilidad del hoyo

Un pozo se mantiene estable a través de un equilibrio entre los factores químicos y mecánicos tales como la presión y el esfuerzo. Las propiedades físicas del lodo y la composición química del mismo deben proporcionar un pozo estable hasta que se pueda introducir y cementar el revestidor.

La inestabilidad del pozo suele ser indicada por el derrumbe de la formación, causando condiciones de agujero reducido, puentes y relleno durante las maniobras.

II.5 SISTEMA DE CIRCULACIÓN DE FLUIDO DE PERFORACIÓN

El lodo de perforación fluye a través de un sistema cerrado que puede observarse en la Figura N° 6.

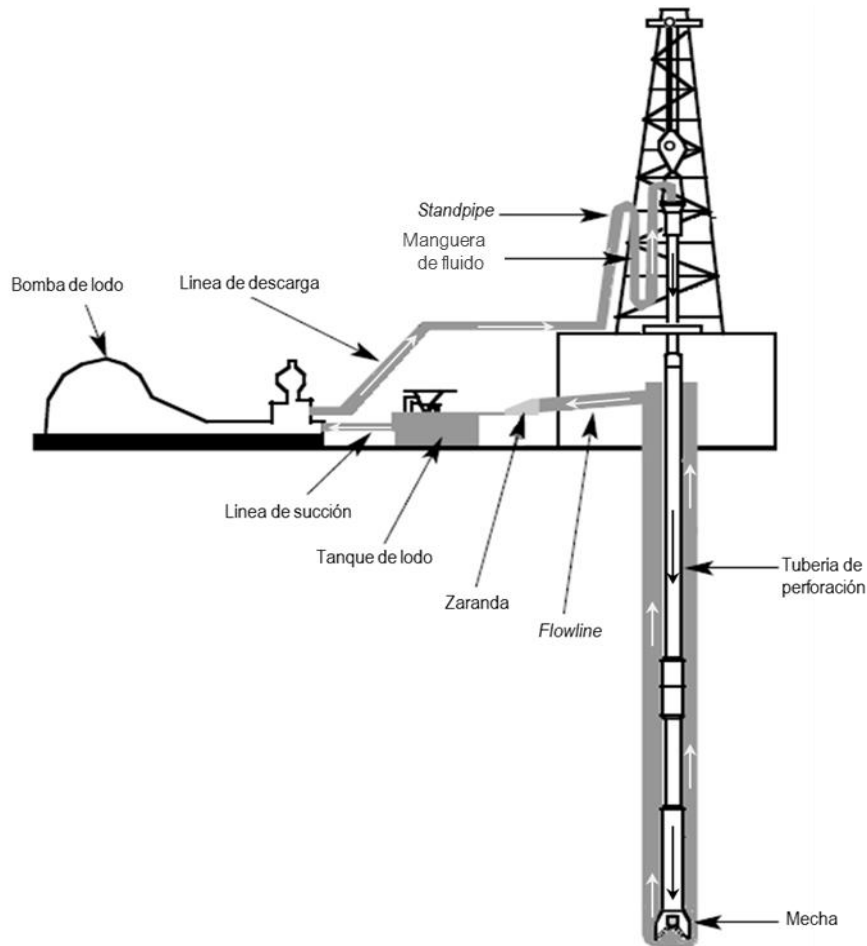


Figura N° 6: Sistema de circulación de fluido de perforación. Modificado (M-I Swaco, 2001)

En las operaciones de perforación se emplean bombas de pistón o de desplazamiento positivo. Estos equipos se encargan de suministrar energía al fluido de perforación para que el mismo alcance las condiciones de caudal y presión necesarias durante la operación.

El fluido de perforación a alta presión sale de la bomba y sube a través de una tubería vertical denominada *Standpipe*. Luego pasa a través de la manguera de fluido para dirigirse hacia el fondo del pozo dentro de la tubería de perforación y alcanzar la mecha.

El fluido de perforación pasa a través de los chorros de la mecha a gran velocidad y traslada los recortes de formación (ripios) hasta la superficie a través del espacio anular, que es la zona existente entre la sarta de perforación y el pozo.

Cuando la mezcla de fluido y ripios llega a superficie, se transporta a través de una tubería hasta el *flowline*, el cual se encarga de distribuir el flujo hacia los principales equipos de control de sólidos o zarandas. Dependiendo del caudal que se esté manejando en la operación, puede emplearse una zaranda o un arreglo dos o tres en paralelo. Estos equipos constan de mallas metálicas vibratorias que se encargan de separar los ripios del fluido de perforación para que este pueda ser reutilizado durante la operación.

El fluido de perforación efluente de los equipos primarios de control de sólidos cae dentro de un tanque de asentamiento, que permite que los sólidos residuales de gran tamaño puedan sedimentarse. A partir del tanque de asentamiento, el lodo pasa a través de fosos agitados donde pueden separarse el gas, la arena y el limo, luego, el lodo pasa a los tanques activos en los cuales pueden agregarse productos químicos de tratamiento y aditivos acondicionadores de lodo, tales como las arcillas y los agentes densificantes (M-I Swaco, 2001).

El tanque activo se comunica directamente con las bombas de lodo a través de la línea de succión. Las bombas de lodo succionan fluido de perforación desde tanque activo para recircularlo al sistema.

II.6 CONTROL DE SÓLIDOS

Las cantidades y tipos de sólidos que se encuentran en los fluidos de perforación determinan sus propiedades químicas y mecánicas, tales como la densidad, la viscosidad, la calidad del revoque y los esfuerzos de gel. (Baker Hughes, 1998)

Con la finalidad de que el fluido de perforación tenga las propiedades requeridas, se agregan productos químicos, arcillas y materiales densificantes.

A medida de que se perfora un pozo, los sólidos provenientes de la formación se incorporan al fluido, estos sólidos afectan la composición y consecuentemente las propiedades del lodo. En vista de que no es posible eliminar todos los sólidos

perforados estos deben ser considerados como contaminantes constantes de un sistema de lodo.

La remoción de los sólidos generados durante la perforación, es uno de los aspectos más importantes del control del sistema de fluido, ya que tiene un impacto directo sobre la eficacia del proceso.

El control de sólidos se logra usando uno o varios de los métodos básicos de separación de sólidos, tales como, sedimentación, zarandas, hidrociclones y centrifugas rotativas. (M-I Swaco, 2001)

Cada uno de estos equipos está diseñado para eliminar una cantidad suficiente de sólidos de manera que se puedan mantener en un nivel controlable. Para una situación determinada, es importante usar la combinación correcta de estos equipos, asegurarse que estos funcionen y estén configurados de la manera correcta.

Para entender la manera en que los tamaños de las partículas contenidas en el lodo de perforación son clasificadas se muestra la Figura N° 7.

En esta figura se observa la relación de los tamaños de las partículas con términos familiares, ejemplos típicos, mallas equivalentes, y con los equipos de control de sólidos que eliminarán partículas que tienen un tamaño determinado. La selección de la malla es importante porque determina el tamaño de separación para las zarandas.

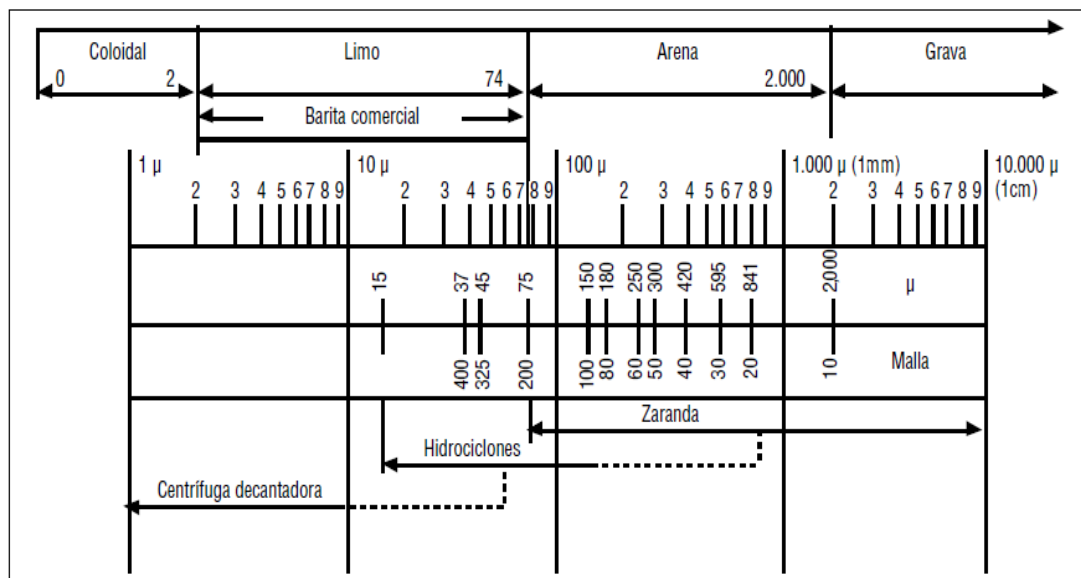


Figura N° 7: Clasificación de los tamaños de partículas (M-I Swaco, 2001)

La capacidad del equipo de control de sólidos es determinada por el volumen de lodo que puede procesar y el tamaño de los sólidos que puede eliminar. Cabe destacar que la separación de sólidos en base al tamaño no toma en cuenta la composición del material y que ningún equipo de control de sólidos es capaz de eliminar el 100% de los sólidos generados (Baroid Drilling Fluids, 1998).

II.6.1 Las Zarandas

Las zarandas son los equipos principales de control de sólidos que constituyen la primera línea de defensa contra la acumulación de los mismos. Las zarandas pueden ser definidas como mallas vibratorias separadoras usadas para eliminar los sólidos del fluido de perforación.

El uso de mallas finas constituye un método eficaz para el control de sólidos ya que impide que los sólidos inertes sean circulados de nuevo y que su tamaño se degrade a tal punto que no puedan ser eliminados con facilidad. En general, una zaranda operando en su punto óptimo puede eliminar hasta el 90% de los sólidos generados en las operaciones de perforación. (Baker Hughes, 1998)

Existen tres tipos básicos de zarandas. Estos son: la zaranda de movimiento circular, la de movimiento elíptico y la de movimiento lineal.

Las zarandas más comunes usadas en la actualidad son las de movimiento lineal (Figura N° 8). Este tipo de zaranda usa dos motores de movimiento circular montados en la cubierta del equipo. Estos motores pueden ser configurados para producir una fuerza G descendente o ascendente. La fuerza G de la mayoría de las zarandas de movimiento lineal varía aproximadamente de 3 a 6. (M-I Swaco, 2001)

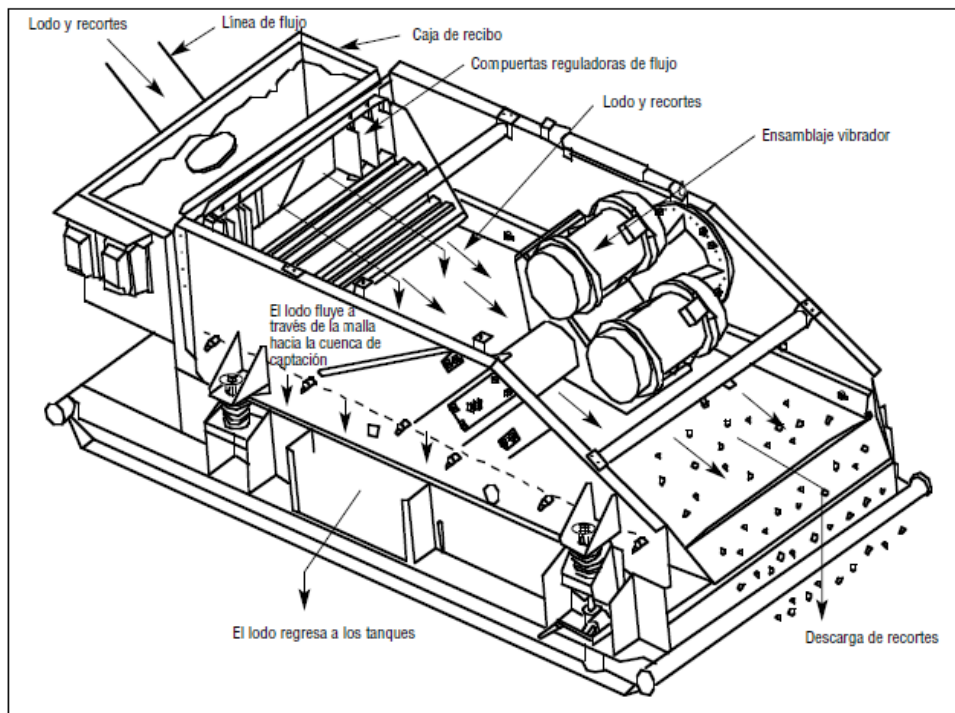


Figura N° 8: Zaranda lineal (M-I Swaco, 2001)

Para garantizar una operación eficiente de las zarandas el fluido debe extenderse lo más posible sobre la superficie de la malla mediante el uso de compuertas reguladoras en la caja de alimentación de fluido de perforación. Por otra parte, las mallas rotas o dañadas deben ser reemplazadas inmediatamente.

Ocasionalmente, los recortes pueden ser del mismo tamaño que las aberturas de la malla y pueden bloquearse dentro de estas. Este problema es conocido como taponamiento de la malla y resulta en una reducción de la capacidad de filtrado del equipo y en una pérdida de fluido. Con la finalidad de corregir esta situación se debe reemplazar la malla por una más fina. La malla más fina debería impedir que los recortes obturen las aberturas, de manera que puedan ser transportados hasta el final de la zaranda y separados del sistema de circulación de fluido

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

La metodología a través de la cual se llevó a cabo la optimización del proceso de separación de partículas magnéticas del fluido de perforación se presenta en forma general en la Figura N° 9.

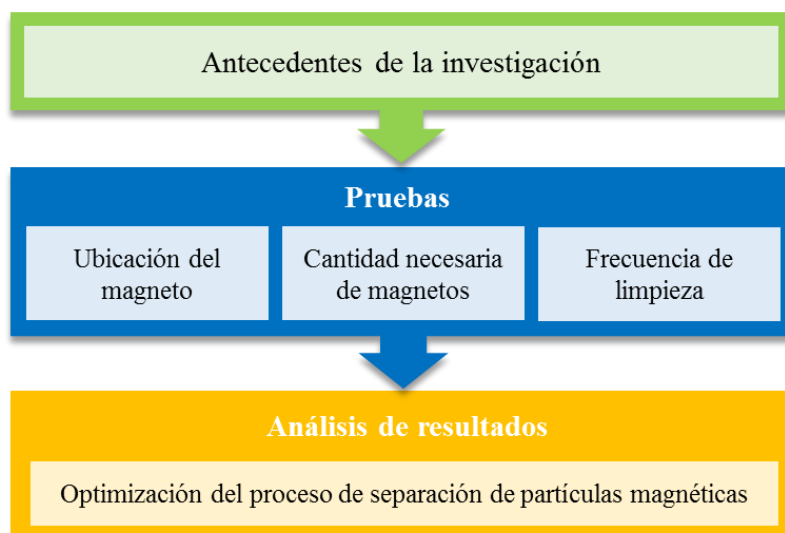


Figura N° 9: Esquema de la metodología a seguir en el desarrollo del trabajo

Las pruebas fueron realizadas en tres taladros ubicados en la zona occidental de Venezuela. Para la obtención de los resultados de las pruebas fue necesario determinar la masa de partículas magnéticas adheridas a la superficie del imán, el procedimiento experimental que fue llevado a cabo para la determinación de estos valores es explicado en la siguiente sección.

III.1 DETERMINACIÓN DE LA MASA DE LA MUESTRA RECOLECTADA

Los pasos que fueron realizados para determinar la masa de las muestras, se observan esquemáticamente en la Figura N° 10.

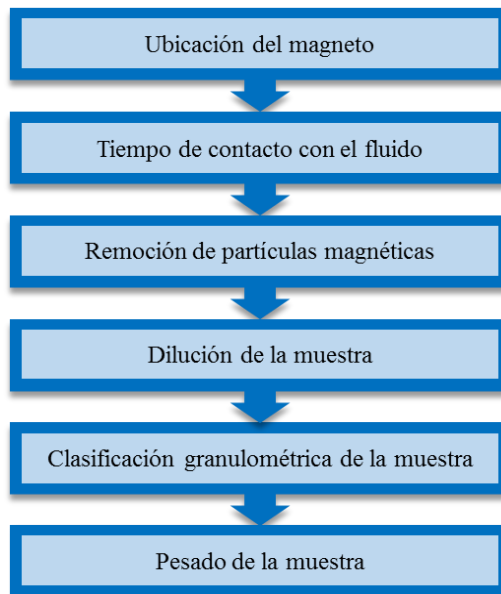


Figura N° 10: Procedimiento experimental para determinar la masa de partículas depositadas sobre el magneto

Ubicación del magneto

Cada una de las pruebas realizadas inició con la ubicación del magneto en el lugar de interés. Con la finalidad de aumentar el área de contacto del imán con el fluido de perforación se debe tratar en lo posible que el mismo quede completamente sumergido en el lodo (Figura N° 11).



Figura N° 11: Magneto ubicado en el sistema de circulación de fluido de perforación

Tiempo de contacto con el fluido

La frecuencia de remoción de partículas magnéticas no estaba establecida en ningún valor fijo. Debido a esto, fue necesario establecer una frecuencia de limpieza tal que permita la recolección de una buena cantidad de datos y una operación eficiente del magneto, considerando el punto de saturación del mismo. Para la determinación de la frecuencia de recolección de muestras, se realizaron pruebas cada 12 y 24 horas. Finalmente, se realizó una comparación cuantitativa de la cantidad total de partículas magnéticas obtenidas en cada prueba y se seleccionó el intervalo de tiempo adecuando entre las tomas de cada muestra.

Remoción de partículas

Al finalizar el lapso de tiempo predeterminado, el magneto se extrajo de la línea que transporta el fluido de perforación con la finalidad de recolectar el material adherido sobre su superficie. Las partículas fueron removidas del magneto en forma manual y se recolectaron en un envase destinado para tal fin. Luego de retirar las partículas magnéticas del imán, se colocó en el mismo sitio para una prueba posterior.

Dilución de la muestra

Las muestras que contenían las partículas, se encontraban impregnadas en fluido de perforación, el cual fue removido para determinar cantidad exacta de metal existente. Los fluidos de perforación empleados en los campos petroleros del estado Zulia pueden ser a base de aceite (OBM) o a base de agua (WBM). Para facilitar el procedimiento de lavado de la muestra, la misma fue diluida previamente con agua si se trabajaba con un fluido a base de agua o con gasoil si el fluido era a base de aceite (Figura N° 12).

Este proceso de dilución disminuye la densidad de la mezcla, permitiendo que la misma fluya con mayor facilidad. La fluidez de la muestra juega un papel de suma importancia al momento de separar por tamaños las partículas adheridas al imán ya que facilita en gran medida el filtrado de la muestra.



Figura N° 12: Dilución de una muestra con gasoil

Clasificación granulométrica de las muestras

La clasificación granulométrica de la muestra recolectada fue hecha con tres tamices con un tamaño de malla de 10, 100 y 200 Mesh (Figura N° 13). Los mismos fueron dispuestos en serie y en orden decreciente para luego agregar la mezcla diluida. Seguidamente, se agregó más fluido de dilución para asegurar que las partículas magnéticas quedaran libres de fluido de perforación.

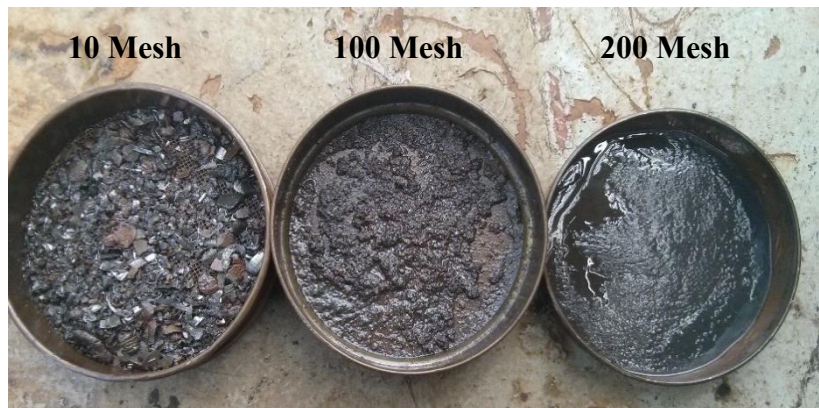


Figura N° 13: Clasificación granulométrica de las muestras

Pesado de la muestra

Al concluir la etapa de separación de la muestra por tamaño de partícula, se pesó cada uno de los tamices para finalmente obtener la masa total de partículas magnéticas y la clasificación granulométrica de la misma (Figura N° 14).



Figura N° 14: Determinación de la masa de partículas magnéticas

III.2 UBICACIÓN DEL MAGNETO

Un análisis realizado en el sistema de circulación de fluidos del taladro, indicó que existe otro lugar en donde el magneto puede ser instalado además del lugar en donde se coloca convencionalmente.

En la Figura N° 15 se muestra un esquema del sistema de circulación de fluidos con las dos posibles ubicaciones del magneto.

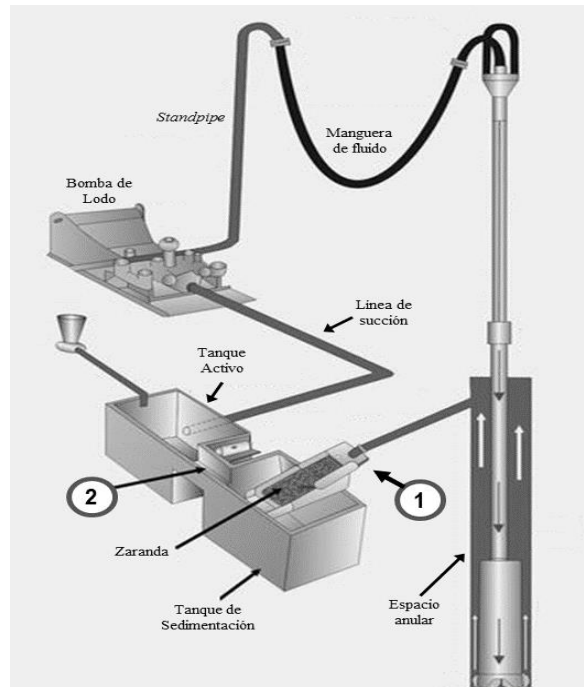


Figura N° 15: Posibles ubicaciones del magneto en el sistema de circulación de fluidos. Modificado (Barrero, s.f.)

La ubicación señalizada con el número uno es la que se usa convencionalmente. En este punto, el fluido de perforación proviene directamente del pozo y es distribuido hacia los equipos principales de control de sólidos.

El punto señalizado con el número dos, es el otro lugar en donde el magneto puede ser ubicado. Como puede observarse en la figura, el fluido de perforación que pasa por este canal ya ha sido procesado por los equipos de control de sólidos.

Para determinar cuál de estas dos ubicaciones es más adecuada, se realizaron pruebas recolectando muestras antes y después de los equipos con control de sólidos en dos taladros diferentes y con una frecuencia idéntica de recolección de muestras.

En estas pruebas fueron comparados dos parámetros fundamentales: la cantidad de partículas magnéticas adheridas a la superficie del imán y la granulometría de la muestra. Por otra parte, también se tomó en cuenta la cantidad de partículas no magnéticas y la turbulencia del fluido en cada una de las ubicaciones.

A medida de que transcurría el lapso de tiempo establecido entre cada muestra recolectada, se tomaron datos de la operación que se estaba llevando a cabo en el taladro.

III.3 CANTIDAD DE MAGNETOS

Luego de que la ubicación del magneto fue establecida, fue necesario determinar la cantidad de magnetos que permitan optimizar el proceso de separación.

Para ello, se realizaron dos pruebas empleando un arreglo en serie de dos magnetos. No fue posible emplear más de dos magnetos debido a la falta de espacio físico en el canal.

Esta prueba se realizó con la finalidad de determinar si el campo magnético ejercido por el primer imán es capaz de atraer todas las partículas magnéticas que circulan en el fluido de perforación. De ser así, es necesario el uso de un magneto. Si por el contrario, se observan partículas en el segundo magneto, se evidencia la necesidad de colocar dos imanes en serie.

III.4 FRECUENCIA DE LIMPIEZA ÓPTIMA

Al establecer la cantidad de magnetos necesarios y recolectar una buena cantidad de datos operacionales fue necesario determinar la frecuencia con la cual deben ser removidas las partículas para evitar la saturación de los mismos y una pérdida en la eficiencia del proceso de separación de partículas magnéticas del fluido de perforación. La frecuencia de limpieza de un magneto depende de la cantidad de partículas generadas durante la perforación. Esta cantidad tiene una relación directa con los parámetros con los cuales se esté llevando a cabo la operación.

Con la finalidad de puntualizar situaciones en donde se genere una mayor cantidad de partículas, se recolectaron diversos datos operacionales que fueron relacionados con la cantidad de partículas adheridas a la superficie del imán.

Los datos operacionales que se tomaron en cuenta fueron: la geometría del pozo construido, los tiempos de circulación, los tiempos de perforación, la distancia recorrida por la mecha y el tipo de lodo empleado durante la perforación.

En la Tabla N° 2 puede observarse un resumen de todas las pruebas realizadas, en la cual se especifica el taladro en cual se ejecutaron, el lapso de tiempo entre la recolección de las muestras, la cantidad de magnetos empleados, el número de muestras recolectadas, la ubicación de los magnetos con respecto a los equipos de control de sólidos y el tipo de fluido de perforación empleado durante las operaciones.

Tabla N° 2: Resumen de las pruebas realizadas

Prueba	Taladro	Tiempo (h)	Cantidad de magnetos	Número de muestras recolectadas	Ubicación de los magnetos con respecto a los equipos de control de sólidos	Tipo de fluido de perforación
1	A	24	1	4	Antes	WBM
2	A	24	1	5	Después	WBM
3	A	24	2	5	Después	WBM
4	A	12	1	3	Antes	WBM
5	A	12	1	3	Después	WBM
6	B	12	1	7	Antes	OBM
7	B	12	1	6	Después	OBM
8	B	12	2	3	Después	OBM
9	C	12	1	7	Antes	OBM

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En el desarrollo de este capítulo, se muestran los resultados obtenidos a partir de la metodología empleada, así como la discusión y análisis de dichos resultados para alcanzar los objetivos propuestos en el presente Trabajo Especial de Grado.

IV.1 FRECUENCIA DE REMOCIÓN DE PARTÍCULAS EN LAS PRUEBAS

Como se mencionó en la sección previa, el magneto no se limpiaba con regularidad, en vista de esta observación, fue necesario establecer una frecuencia fija de remoción de partículas para la obtención de los resultados de las pruebas. Cabe destacar que la frecuencia establecida en esta sección no es la frecuencia óptima de limpieza del magneto, ya que como se explicará posteriormente, esta frecuencia depende de muchos factores.

El punto de inicio para determinar la frecuencia de remoción de partículas fue la evaluación de las cantidades adheridas a la superficie del imán en lapsos de tiempo de 12 y 24 horas. La frecuencia de limpieza de los magnetos en las pruebas realizadas se determinó mediante la comparación de las cantidades de partículas magnéticas depositadas sobre la superficie de los imanes. Se realizaron comparaciones entre magnetos ubicados antes y después de los equipos de control sólidos (ECS) en un mismo taladro para garantizar la validez de las mismas.

En la Tabla N° 3 se muestra el promedio de la masa total de partículas magnéticas depositadas sobre la superficie de un magneto colocado antes de las zarandas en las pruebas 1 y 4; y los resultados de estos mismos valores cuando magneto fue ubicado después de los equipos de control de sólidos en las pruebas 2 y 5.

Tabla N° 3: Masa total promedio de partículas magnéticas antes y después de los equipos de control de sólidos cada 12 y 24 horas.

	Posición del magneto respecto a ECS	Tiempo (h)	Masa de partículas magnéticas ($m \pm 1$) g
Prueba 1	Antes	24	1553
Prueba 2	Después		362
Prueba 4	Antes	12	836
Prueba 5	Después		260

El análisis de los resultados presentados se realizó a través de la siguiente gráfica.

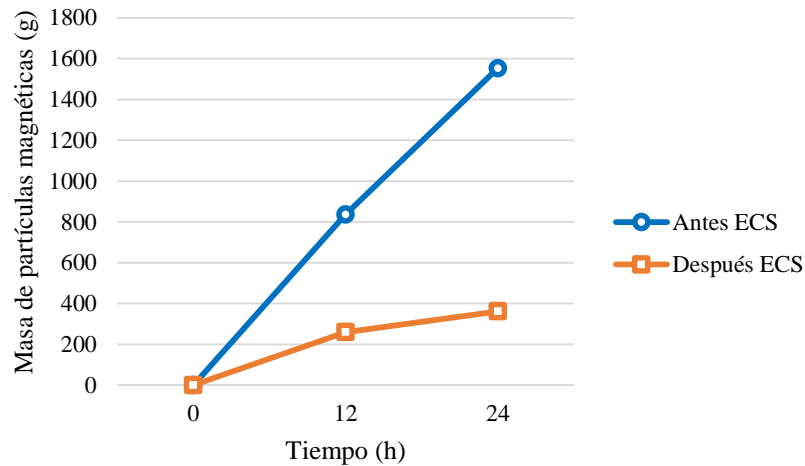


Figura N° 16: Cantidad promedio de partículas magnéticas en función del tiempo

En la Figura N° 16 se observa que la cantidad de partículas magnéticas adheridas al imán no tiene un comportamiento lineal con respecto al tiempo. Los resultados sugieren que a medida de que transcurre el tiempo, la cantidad de partículas adheridas va disminuyendo progresivamente. Esta tendencia coincide con los resultados esperados, ya la fuerza del campo magnético disminuye considerablemente cuando existe una cantidad de partículas adheridas al imán previamente.

Por otra parte, en los resultados obtenidos de la masa total de partículas magnéticas de cada muestra recolectada antes de los equipos de control de sólidos (Tabla N° 4), se observa que la muestra 2 de la prueba realizada cada 24 horas supera el punto de saturación del imán. El punto de saturación del imán es de $0,95 \text{ g/cm}^2$ gramos, este valor fue establecido por Matthew Cullen en su estudio *“PowerDrive Lower Torquer*

jammed with fine magnetic solids” analizado en los antecedentes del presente Trabajo Especial de Grado.

Tabla N° 4: Masa total de partículas magnéticas en las muestras recolectada antes de los equipos de control de sólidos cada 12 y 24 horas

Muestra	Masa de partículas magnéticas (m ± 1) g	
	Prueba 1	Prueba 4
	24 horas	12 horas
1	1356	841
2	1961	885
3	1713	782
4	1180	---

Cuando el magneto alcanza su punto de saturación, las partículas superficiales débilmente atraídas por el campo magnético del imán pueden ser arrastradas debido a la turbulencia del fluido y consecuentemente devueltas al sistema de circulación.

Según los resultados observados y con base en los antecedentes estudiados, se estableció un lapso de tiempo de 12 horas para la recolección de las muestras, con la finalidad de obtener una buena densidad de datos, evitar que el magneto alcance el punto de saturación y asegurar una operación eficiente del imán.

IV.2 UBICACIÓN DEL MAGNETO

El magneto es colocado convencionalmente en el distribuidor de fluido de perforación hacia los equipos de control de sólidos. Al realizar un estudio del sistema de circulación de este fluido en los taladros, se comprobó la existencia de otra posible ubicación para este equipo. En esta ubicación el magneto fue colocado en el canal efluente de los equipos de control de sólidos.

En vista de que esta nueva ubicación sugiere la posibilidad de una mejora en el proceso de separación de partículas magnéticas, se realizaron tres pruebas en diferentes taladros, colocando el magneto antes y después de los equipos de control de sólidos con la finalidad de establecer las diferencias entre ambas ubicaciones.

La ubicación óptima del magneto en el sistema de circulación de fluido fue lograda a través del análisis de los resultados obtenidos en las pruebas realizadas. En estas

pruebas se tomaron en cuenta dos variables fundamentales: la cantidad de partículas y la distribución de tamaños de las mismas. Además, se tomaron en cuenta otros factores que caracterizan cada una de las ubicaciones, tales como, la turbulencia del fluido y la cantidad de sólidos no magnéticos en la zona.

IV.2.1 Cantidad de partículas magnéticas totales

La finalidad de esta prueba es establecer relaciones entre la cantidad de partículas totales adheridas a la superficie del imán ubicando el magneto antes y después de las zarandas. Este análisis se realizó a través de la masa total promedio de las muestras recolectadas en cada taladro.

En la Tabla N° 5 se muestran los resultados obtenidos en el taladro A cuando se realizaron las pruebas cada 24 horas.

Tabla N° 5: Masa total promedio de partículas magnéticas recolectadas en las pruebas 1 y 2

	Posición del magneto respecto a ECS	Masa de partículas magnéticas (m ± 1) g
Prueba 1	Antes	1553
Prueba 2	Después	362

El promedio de la masa recolectada antes de los equipos de control de sólidos fue de 1553 gramos, mientras que la masa promedio recolectada después de los mismos es equivalente a 362 gramos.

En la Tabla N° 6 se puede observar los resultados alcanzados en el mismo taladro A con la diferencia de que las pruebas 4 y 5 se realizaron recolectando muestras cada 12 horas.

Tabla N° 6: Masa total promedio de partículas magnéticas recolectadas en las pruebas 4 y 5

	Posición del magneto respecto a ECS	Masa de partículas magnéticas (m ± 1) g
Prueba 4	Antes	836
Prueba 5	Después	260

Al igual que en la Tabla N° 5 se observa una mayor recuperación de partículas cuando el magneto es colocado antes de los equipos de control de sólidos.

Esta misma tendencia en los resultados fue obtenida en el taladro B, en donde se realizaron pruebas cada 12 horas (Tabla N° 7).

Tabla N° 7: Masa total promedio de partículas magnéticas recolectadas en las pruebas 6 y 7

	Posición del magneto respecto a ECS	Masa de partículas magnéticas ($m \pm 1$) g
Prueba 6	Antes	480
Prueba 7	Después	132

En las tres comparaciones realizadas en las tablas mostradas anteriormente, se observa una diferencia significativa entre la masa de partículas magnéticas recolectadas antes y después de las zarandas. Incluso, la relación entre las cantidades supera el doble.

La Figura N° 17 se perciben las grandes diferencias en las cantidades de partículas adheridas a la superficie del imán.



(a)



(b)

Figura N° 17: Diferencia entre las cantidad de partículas magnéticas adheridas a la superficie del magneto colocado antes (a) y después (b) de los equipos de control de sólidos

La discrepancia entre las cantidades se debe a que cuando el magneto es instalado antes de las zarandas entra en contacto con un fluido de perforación que se encuentra en las mismas condiciones con las cuales sale del hoyo y que no ha sido sometido a

ningún tipo de acondicionamiento o separación física. En contraste, cuando el magneto es ubicado después de las zarandas, el fluido de perforación ya ha sido procesado por las mismas y por ende, una gran cantidad de material magnético es descartado en este proceso de separación de sólidos.

En vista de que el imán ubicado antes de las zarandas entra en contacto con una mayor cantidad de partículas magnéticas, alcanza su punto de saturación en un lapso de tiempo menor en comparación al magneto colocado después de las mismas.

En este sentido, resulta beneficioso ubicar el magneto después de los equipos de control de sólidos, ya que bajo las mismas condiciones de operación es necesario limpiarlo con menos frecuencia para evitar que el mismo alcance el punto de saturación.

IV.2.2 Granulometría de las muestras

Además de la cantidad total de partículas adheridas a la superficie del imán, es importante estudiar la granulometría de las muestras recolectadas, ya que este estudio permite analizar y establecer diferencias entre la distribución de tamaño de partículas de las muestras obtenidas antes y después de los equipos de control de sólidos. Para establecer esta comparación se estudiaron los datos recolectados cada 12 horas en los taladros A y B.

En la Tabla N° 8 se muestra la masa de partículas magnéticas clasificada por tamaño de las muestras recolectadas en la prueba 4. Esta prueba fue llevada a cabo en el taladro A y el magneto fue instalado antes de los equipos de control de sólidos.

Tabla N° 8: Masa de partículas magnéticas clasificada por tamaño de las muestras recolectadas en la prueba 4

Muestra	Masa de partículas magnéticas ($m \pm 1$) g				Total
	10 Mesh	100 Mesh	200 Mesh	<200 Mesh	
1	470	260	69	42	841
2	482	276	78	49	885
3	500	186	53	43	782

Los resultados de la prueba 5, realizada en el mismo taladro después de los equipos de control de sólidos se muestran en la Tabla N° 9

Tabla N° 9: Masa de partículas magnéticas clasificada por tamaño de las muestras recolectadas en la prueba 5

Muestra	Masa de partículas magnéticas (m ± 1) g				Total
	10 Mesh	100 Mesh	200 Mesh	<200 Mesh	
1	0	26	122	95	243
2	0	18	108	64	190
3	0	39	168	140	347

Al comparar los resultados mostrados en las dos tablas anteriores, se evidencia una diferencia muy marcada entre las partículas con un tamaño superior a 2000 micrones. Cuando el magneto es colocado antes de los equipos de control de sólidos se observa que la mayor cantidad de partículas adheridas a la superficie del imán no pasa a través de la malla de 10 Mesh. En contraste, cuando el magneto es colocado después de los equipos de control de sólidos, no se evidenciaron partículas de este tamaño.

Con la finalidad de establecer diferencias entre las cantidades de partículas que pasan a través de la malla de 10 Mesh, se calculó el promedio de partículas obtenidas en cada una de las pruebas (Tabla N° 10).

Tabla N° 10: Promedio de la cantidad de partículas magnéticas clasificado por tamaño en las pruebas 4 y 5

Prueba	Posición del magneto respecto a ECS	Masa de partículas magnéticas (m ± 1) g			
		10 Mesh	100 Mesh	200 Mesh	<200 Mesh
4	Antes	484	241	67	45
5	Después	0	28	133	100

En la Tabla N° 10 se evidencia que las partículas de 100 Mesh disminuyen en gran magnitud. La cantidad recolectada de este tipo de partículas en la prueba 5 es tan solo el 11,6% de la cantidad recolectada en la prueba 4. Las partículas con un tamaño comprendido entre 75 y 150 micrones aumentan prácticamente el doble, pasando de 67 g antes de las zarandas a 133 g después de las mismas. Por otra parte, la cantidad de partículas en promedio que pasan a través de la malla de 200 Mesh antes de los equipos de control de sólidos es igual a 45 g. Cuando el magneto es colocado después

de estos equipos el incremento en la recuperación equivale a un 122%, alcanzando 100 g de partículas magnéticas.

Debido a que las partículas con un tamaño inferior a 150 micrones son altamente perjudiciales para el desempeño del PowerDrive, se realizó una comparación más precisa entre los resultados obtenidos tomando en cuenta la relación entre el tiempo de bombeo (TB) y el tiempo de perforación (TP) de las muestras. Esta relación permite establecer una excelente comparación entre los datos obtenidos siempre y cuando los tiempos de circulación sean similares.

En la Tabla N° 11 se establece la comparación entre las cantidades de partículas con un tamaño inferior a 150 micrones entre la muestra 1 de la prueba 4 y la muestra 2 de la prueba 5.

Esta comparación es realizada a través del incremento porcentual de la cantidad de partículas magnéticas depositadas en el magneto ubicado después de los equipos de control de sólidos con respecto al magneto colocado antes de los mismos.

Tabla N° 11: Comparación entre la cantidad de partículas magnéticas inferiores a 150 Mesh entre la muestra 1 de la prueba 4 y la muestra 2 de la prueba 5

Prueba	Posición del magneto respecto a ECS	Muestra	TB (h)	TB/TP	Masa de partículas magnéticas (m ± 1) g	
					200 Mesh	<200 Mesh
4	Antes	1	8,32	1,28	69	42
5	Después	2	8,64	1,25	108	64
Incremento porcentual (%)					56,5	52,4

El estudio de la cantidad de partículas depositadas sobre la superficie del imán en condiciones análogas permite realizar una comparación apropiada debido a que en teoría deben salir cantidades similares de partículas magnéticas del pozo.

En la Tabla N° 12 se muestra otra comparación entre las pruebas 4 y 5, y las muestras 2 y 1 respectivamente.

Tabla N° 12: Comparación entre la cantidad de partículas magnéticas inferiores a 150 Mesh entre la muestra 2 de la prueba 4 y la muestra 1 de la prueba 5

Prueba	Posición del magneto respecto a ECS	Muestra	TB (h)	TB/TP	Masa de partículas magnéticas (m ± 1) g	
					200 Mesh	<200 Mesh
4	Antes	2	9,89	1,34	78	49
5	Después	1	9,78	1,36	122	95
Incremento porcentual (%)					56,4	93,9

Al igual que en la comparación general de las cantidades adheridas a la superficie del imán realizada en la Tabla N° 10, se observa un incremento en la cantidad de partículas que atraviesan la malla de 100 Mesh cuando el magneto es colocado después de los equipos de control de sólidos.

El incremento porcentual de la cantidad de partículas con un tamaño comprendido entre 75 y 150 micrones es de aproximadamente 56% en ambas comparaciones, mientras que el incremento de partículas con un tamaño inferior a 75 micrones se encuentra entre 52% y 94%.

Con la finalidad de comprobar todas las tendencias observadas en las pruebas 4 y 5, se realizaron las pruebas 6 y 7 en el taladro B. Los resultados obtenidos de estas pruebas se aprecian en las siguientes tablas.

Tabla N° 13: Masa de partículas magnéticas clasificada por tamaño de las muestras recolectadas en la prueba 6

Muestra	Masa de partículas magnéticas (m ± 1) g				
	10 Mesh	100 Mesh	200 Mesh	<200 Mesh	Total
1	365	246	67	15	693
2	282	156	43	19	500
3	232	124	31	17	404
4	246	129	45	29	449
5	258	142	75	26	501
6	346	172	93	54	665
7	98	36	8	9	151

Tabla N° 14: Masa de partículas magnéticas clasificada por tamaño de las muestras recolectadas en la prueba 7

Muestra	Masa de partículas magnéticas (m ± 1) g				Total
	10 Mesh	100 Mesh	200 Mesh	<200 Mesh	
1	0	21	55	37	113
2	0	15	67	26	108
3	0	26	72	50	148
4	0	28	87	52	167
5	0	26	71	33	130
6	0	22	54	47	123

En la Tabla N° 13 se evidencian los resultados obtenidos en el taladro B cuando el magneto fue colocado antes de zarandas y en la Tabla N° 14 los resultados cuando fue colocado después de las mismas. Estas muestras fueron tomadas en intervalos de tiempo de 12 horas. Del mismo modo que en el taladro anterior, los resultados de la cantidad de partículas promedio clasificadas por tamaños fueron relacionadas en la tabla que se muestra a continuación.

Tabla N° 15: Promedio de la cantidad de partículas magnéticas clasificado por tamaño en las pruebas 6 y 7

Prueba	Posición del magneto respecto a ECS	Masa de partículas magnéticas (m ± 1) g			
		10 Mesh	100 Mesh	200 Mesh	<200 Mesh
6	Antes	261	144	52	24
7	Después	0	23	68	41

Al igual que en la Tabla N° 10, en la Tabla N° 15 se observa una disminución bien considerable de las partículas de 100 Mesh. La cantidad recolectada de este tipo de partículas en la prueba 7 es tan solo el 16% de la cantidad recolectada en la prueba 6. Las partículas recolectadas después de las zarandas con un tamaño comprendido entre 75 y 150 micrones incrementan en 30,7% con respecto a las partículas recolectadas después de estos equipos, pasando de 52 g a 68 g. Por su parte, las partículas con un tamaño inferior a 75 micrones incrementaron en 70,8% después de las zarandas.

Las diferencias entre las muestras con un tamaño inferior a 150 micrones fueron estudiadas mediante la comparación de muestra 3 de la prueba 6 y la muestra 1 de la prueba 7 en la siguiente tabla.

Tabla N° 16: Comparación entre la cantidad de partículas magnéticas inferiores a 150 Mesh entre la muestra 3 de la prueba 6 y la muestra 1 de la prueba 7

Prueba	Posición del magneto respecto a ECS	Muestra	TB (h)	TB/TP	Masa de partículas magnéticas (m ± 1) g	
					200 Mesh	<200 Mesh
6	Antes	3	9,36	1,35	31	17
7	Después	1	9,89	1,30	55	37
Incremento porcentual (%)					77,4	117,6

La muestra 4 de la prueba 6 fue comparada con la muestra 4 de la prueba 7, los resultados pueden ser apreciados en la Tabla N° 17.

Tabla N° 17: Comparación entre la cantidad de partículas magnéticas inferiores a 150 Mesh entre la muestra 4 de la prueba 6 y la muestra 4 de la prueba 7

Prueba	Posición del magneto respecto a ECS	Muestra	TB (h)	TB/TP	Masa de partículas magnéticas (m ± 1) g	
					200 Mesh	<200 Mesh
6	Antes	4	10,13	1,64	45	29
7	Después	4	10,52	1,67	87	52
Incremento porcentual (%)					93,3	79,3

Los incrementos porcentuales en las cantidades de partículas con un tamaño inferior a 150 micrones cuando el magneto es colocado después de los equipos de control de sólidos no son nada despreciables. Para el caso de las pruebas 6 y 7 se alcanza hasta un 117% bajo condiciones de operación muy similares.

Todos los resultados mostrados en las tablas anteriores sugieren que colocar el magneto después de los equipos de control de sólidos optimiza el proceso de separación de partículas magnéticas del fluido de perforación. Esta mejora en el proceso se debe al efecto de los equipos de control de sólidos en la composición del fluido que sale del pozo.

En las pruebas realizadas en ambos taladros después de las zarandas no se evidencian partículas con un tamaño superior a 2000 micrones ya que estos equipos son capaces

de remover el 100% de estas partículas. Cuando el magneto es ubicado antes de los equipos de control de sólidos, la mayor cantidad de partículas pertenecen a esta clasificación. Estas partículas de mayor tamaño son atraídas con mayor fuerza y son capaces de crear una interferencia en el campo magnético que impide que las otras partículas se adhieran fuertemente al imán.

Por otra parte, en el caso de que las zarandas se encuentren en mal estado y dejen pasar partículas grandes, estas serán retenidas en las trampas de arenas o tanques de asentamiento evitando que las mismas sean transportadas hacia los tanques activos

En cuanto a los metales que fueron retenidos por la malla de 100 Mesh, se observa una diferencia bien marcada en las dos pruebas. La cantidad recolectada de este tipo de partículas cuando el magneto es colocado después de los equipos de control de sólidos es aproximadamente 14% de la cantidad retenida por el magneto colocado en el distribuidor de fluido hacia las zarandas. La variación de este porcentaje depende básicamente de la eficiencia, el diseño y la configuración de los equipos de control de sólidos que se estén utilizando en el taladro. Un menor porcentaje de recuperación después de las zarandas sugiere una mayor eficiencia en el proceso de separación de partículas sólidas del fluido de perforación.

A través de las relaciones de las cantidades observadas en las tablas anteriores, se evidencia un aumento significativo en la recuperación de partículas con un tamaño inferior a 150 micrones. Como se mencionó anteriormente, este tipo de partículas son las más perjudiciales para el funcionamiento del PowerDrive por ello es importante maximizar la eficiencia del proceso hacia la separación de este tipo de partículas.

Das y Roy (2007) indican que la fuerza con la cual una partícula magnética en un fluido es atraída por el campo magnético de un imán es proporcional al tamaño de la partícula. Debido a esta afirmación, hacen hincapié en que la selectividad de una separación magnética húmeda se ve altamente influenciada por la distribución de tamaños de partículas.

En la distribución de tamaños de partículas se evidencia una tendencia clara de los resultados obtenidos cuando el magneto es colocado antes y después de los equipos de control de sólidos.

La Tabla N° 18 nos muestra estos resultados cuando el magneto fue ubicado antes de los equipos de control de sólidos.

Tabla N° 18: Distribución porcentual de tamaño de partículas magnéticas en las pruebas 4 y 6

Prueba	Porcentajes (%)			
	10 Mesh	100 Mesh	200 Mesh	<200 Mesh
4	57,9	28,8	8,0	5,3
6	54,3	29,9	10,8	5,0

En vista de que la distribución porcentual de las pruebas 4 y 6 tienen una tendencia similar, en la Figura N° 18 se muestra el promedio de la distribución de tamaño de partículas.

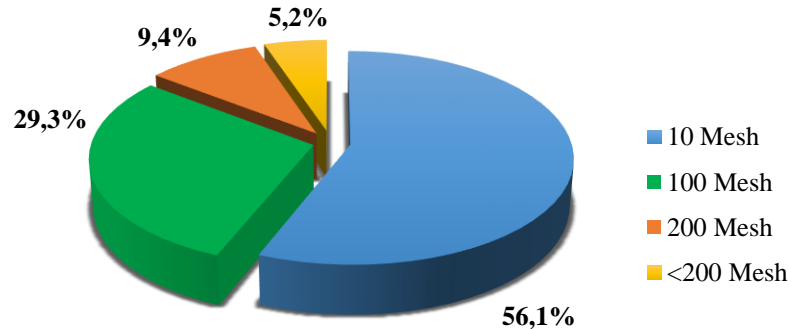


Figura N° 18: Distribución de tamaño de partícula de las muestras recolectadas antes de los equipos de control de sólidos.

En la Figura N° 18 indica que aproximadamente el 56% de la muestra recolectada es lo suficientemente grande para ser totalmente descartada por los equipos de control de sólidos.

La distribución porcentual de tamaño de partícula cambia significativamente cuando el magneto es colocado después de los equipos de control de sólidos, esta afirmación se evidencia en la Tabla N° 19.

Tabla N° 19: Distribución porcentual de tamaño de partículas magnéticas después de los equipos de control de sólidos

Prueba	Porcentajes (%)			
	10 Mesh	100 Mesh	200 Mesh	<200 Mesh
5	0,0	10,6	51,0	38,3
7	0,0	17,5	51,5	31,1

Al igual que la distribución de tamaño de partícula evaluada en la Tabla N° 18, los resultados mostrados en la Tabla N° 19 siguen una clara tendencia.

En la Figura N° 19 se muestran los promedios de los resultados de las pruebas 5 y 7.

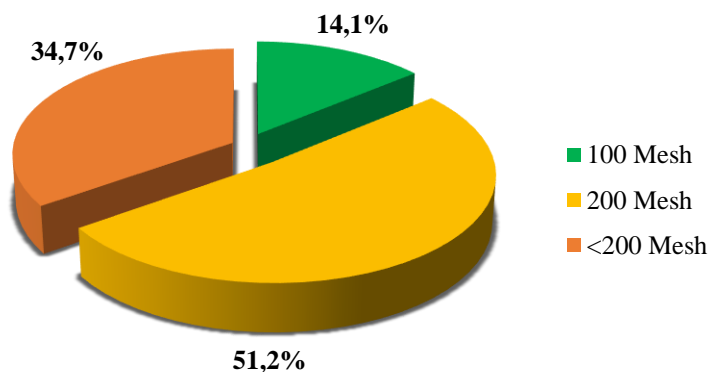


Figura N° 19: Distribución de tamaño de partícula de las muestras recolectadas antes de los equipos de control de sólidos.

Se observa que aproximadamente el 65% de partículas recolectadas tiene un tamaño inferior a 150 micrones.

Este análisis granulométrico de las muestras obtenidas, permite complementar el análisis realizado en cuanto a la cantidad de partículas magnéticas totales, pudiendo sustentar las mejoras en el proceso generadas por el cambio de la ubicación del magneto.

IV.2.3 Otras consideraciones

Una de las ventajas más importantes que es observada cuando el magneto es colocado después de los equipos de control de sólidos es una menor turbulencia en este canal. Una menor turbulencia en el fluido sugiere un mejor contacto entre las partículas metálicas y la superficie del imán. Daniel Norrgram afirmó en su estudio denominado “*Magnetic Field*” realizado en el año 2006 que la relación entre las partículas magnéticas y las no magnéticas tiene influencias en la cantidad de partículas que pueden ser atraídas por un separador magnético. Esta influencia se genera debido a la interferencia que causan las partículas no magnéticas. Cuando el magneto es colocado en el distribuidor de fluido hay una gran cantidad de sólidos no magnéticos provenientes del pozo. Además de generar interferencia en el campo magnético, estos sólidos pueden arrastrar las partículas adheridas al imán por efectos de fricción. Por otra parte, en algunos taladros se observó que el magneto se enterró en los ripios sedimentados en el distribuidor de fluido de perforación. Al no estar expuesta directamente la superficie del magneto al lodo, el mismo no es capaz de cumplir con su función principal de atraer las partículas magnéticas para evitar que continúen circulando en el sistema de fluidos.

Los análisis de los resultados realizados en esta sección indican que colocar el magneto después de los equipos de control de sólidos mejora el proceso de separación de partículas magnéticas. El cambio de la ubicación del magneto es una propuesta técnicamente factible ya que todos los taladros visitados cuentan con el espacio físico para colocar el imán en el canal de fluido de perforación que se dirige hacia los tanques activos.

IV.3 CANTIDAD DE MAGNETOS

La cantidad necesaria de magnetos para optimizar el proceso de separación de partículas fue determinada en los taladros A y B.

En ambos taladros se ubicaron dos magnetos en serie después de los equipos de control de sólidos y se analizaron las diferencias en los resultados obtenidos entre los dos magnetos.

En las siguientes tablas se muestran los resultados obtenidos en el taladro A.

Tabla N° 20: Masa de partículas magnéticas clasificada por tamaños en la prueba 3

Muestra	Masa de partículas magnéticas (m ± 1) g				Total
	10 Mesh	100 Mesh	200 Mesh	<200 Mesh	
1 M1	0	58	136	89	283
1 M2	0	8	31	26	65
2 M1	0	65	187	98	350
2 M2	0	12	26	31	69
3 M1	0	73	148	146	367
3 M2	0	6	39	44	89
4 M1	0	54	159	97	310
4 M2	0	9	34	25	68
5 M1	0	128	210	168	506
5 M2	0	35	49	80	164

En la Tabla N° 20 se aprecia que en la prueba 3 fueron recolectadas un total de 5 muestras. El lapso de tiempo entre la recolección de cada muestra fue de 24 horas. Cada una de las muestras está dividida en dos partes: la masa recolectada por el primer magneto (M1) y la masa recolectada por segundo magneto colocado en serie en el canal efluente de los equipos de control de sólidos (M2).

En general se observa una mayor recuperación de partículas magnéticas en el primer imán. Este resultado es completamente lógico, ya que cuando el fluido de perforación pasa por el segundo imán, la gran mayoría de las partículas magnéticas existentes en el seno del fluido habían sido sometidas al campo magnético ejercido por el primer imán colocado en el canal efluente de los equipos de control de sólidos.

Con la finalidad de analizar la tendencia de los resultados obtenidos en cuanto al tamaño de partícula, se calculó el porcentaje de la muestra total recuperada por el segundo magneto. Los resultados pueden ser observados a continuación.

Tabla N° 21: Porcentaje de partículas magnéticas recuperadas por el segundo magneto en la prueba 3

Muestra	Porcentajes del magneto 2 (%)		
	100 Mesh	200 Mesh	<200 Mesh
1	2,3	8,9	7,5
2	2,9	6,2	7,4
3	1,3	8,6	9,6
4	2,4	9,0	6,6
5	5,2	7,3	11,9
Promedio	2,8	8,0	8,6

La Tabla N° 21 indica que el segundo magneto recupera un porcentaje no despreciable de partículas. En promedio, este magneto fue capaz de recuperar el 2,8% de las partículas con un tamaño superior a 150 micrones, mientras que la recuperación de partículas con un tamaño inferior alcanzó hasta 8,6%.

Se justifica una mayor recuperación de partículas pequeñas en el segundo imán debido a que como se mencionó en la discusión del objetivo anterior, la fuerza con la cual una partícula en un fluido es atraída por el campo magnético de un imán, se relaciona directamente con el diámetro de la misma.

Estas mismas tendencias pueden ser observadas en la Tabla N° 22 y en la Tabla N° 23 en donde se plasman los resultados obtenidos en el taladro B.

Tabla N° 22: Masa de partículas magnéticas clasificada por tamaños en la prueba 8

Muestra	Masa de partículas magnéticas (m ± 1) g				Total
	10 Mesh	100 Mesh	200 Mesh	<200 Mesh	
1 M1	0	20	58	34	112
1 M2	0	5	13	11	29
2 M1	0	16	51	42	109
2 M2	0	7	15	16	38
3 M1	0	23	72	52	147
3 M2	0	6	25	18	49

Tabla N° 23: Porcentaje de partículas magnéticas recuperadas por el segundo magneto en la prueba 8

Muestra	Porcentajes del magneto 2 (%)		
	100 Mesh	200 Mesh	<200 Mesh
1	3,5	9,2	7,8
2	4,8	10,2	10,9
3	3,1	12,8	9,2
Promedio	3,8	10,7	9,3

Los resultados de la prueba 8 reflejan las cantidades de partículas obtenidas en el taladro B, realizando las pruebas cada 12 horas.

A pesar de que la tendencia en los porcentajes de las dos pruebas es similar, se observa que en este taladro el segundo magneto recupera un mayor porcentaje de las partículas magnéticas con respecto al primer taladro evaluado, esta diferencia puede observarse en la Figura N° 20. Es posible que esta pequeña desviación se deba a las condiciones de velocidad de fluido o un contacto inadecuado entre la superficie del imán y el fluido de perforación.



(a)



(b)

Figura N° 20: Muestras recolectadas por dos magnetos dispuestos en serie después de los equipos de control de sólidos. (a) primer magneto M1, (b) segundo magneto M2. (Taladro B)

Los análisis de estos resultados indican que el uso de dos imanes dispuestos en serie después de los equipos de control de sólidos optimiza el proceso de separación de partículas magnéticas del fluido de perforación.

A pesar de la optimización del proceso visualizada cuando se usan dos imanes en lugar de uno, es imposible implementar el uso de dos imanes en serie después de las zarandas en todos los taladros. Esto se debe a que el canal efluente de los equipos de control de sólidos no es lo suficientemente espacioso para colocar los dos imanes. En estos casos solo se empleará un imán.

IV.4 FRECUENCIA ÓPTIMA DE REMOCIÓN DE PARTÍCULAS MAGNÉTICAS

El imán debe ser limpiado antes de que el mismo se sature de partículas y consecuentemente, sea incapaz de atraer las partículas magnéticas que circulan en el fluido. La cantidad de partículas magnéticas generadas durante las operaciones de perforación depende de muchos factores, debido a esto, resulta imposible estandarizar la frecuencia de limpieza de los imanes para todas las operaciones.

Ante la situación planteada, resultaría beneficioso estudiar los factores que inciden en la cantidad de partículas magnéticas para saber en que situaciones el imán debe ser chequeado y limpiado con mayor frecuencia para evitar la saturación del mismo.

Durante la experiencia de campo se evidenciaron tres factores que aumentan la cantidad de partículas magnéticas que salen del pozo. Estos factores son: la limpieza del hoyo, el tipo de fluido de perforación y la ejecución de un *sidetrack*.

IV.4.1 Tipo de fluido de perforación

El tipo de fluido de perforación aparentemente tiene un efecto significativo en la cantidad de partículas magnéticas generadas en el pozo. Esta observación fue hecha mediante la comparación de la Tabla N° 8 y la Tabla N° 13. Estas tablas reflejan los resultados de las pruebas 4 y 6 respectivamente, obtenidos cuando el imán fue colocado antes de los equipos de control de sólidos. El promedio de la cantidad de partículas fue comparada en la siguiente tabla.

Tabla N° 24: Comparación de cantidad de partículas promedio en las pruebas 4 y 6.

Prueba	Masa de partículas magnéticas (m ± 1) g				Total
	10 Mesh	100 Mesh	200 Mesh	<200 Mesh	
4	484	241	67	45	836
6	261	144	52	24	480

En la Tabla N° 24 se observa una diferencia bien marcada entre las cantidades obtenidas. El fluido de perforación con el cual se trabajó en la prueba 4 es a base de agua, mientras que en la prueba 6 se utilizó un fluido a base de aceite.

Cabe destacar que el aumento en la cantidad de partículas grandes no tiene un gran impacto en el proceso, ya que como fue mencionado anteriormente, estas partículas serán descartadas fácilmente por los equipos de control sólidos antes de que entren en contacto con el campo magnético de imán que se encargará de retirar las partículas que pasan a través de las mallas de las zarandas. Debido a lo mencionado anteriormente, es importante resaltar la mayor cantidad de partículas con un tamaño inferior a 150 micrones depositadas sobre el magneto puesto en contacto con un fluido de perforación a base de agua.

Es probable que se haya obtenido una menor cantidad de partículas magnéticas en el fluido base aceite debido a las propiedades lubricantes del mismo. Los fluidos a base de aceite disminuyen el efecto de la fricción de la sarta con el revestidor. Este roce es una de las principales causas de partículas magnéticas pequeñas.

Las pruebas 4 y 6 son comparables ya que las condiciones de operación en ambos taladros era similar y la diferencia más significativa era el tipo de fluido de trabajo.

Esta comparación fue realizada solo con los datos tomados antes de los equipos de control de sólidos ya que en esta ubicación, el magneto entra en contacto con el fluido que proviene directamente del pozo, permitiendo hacer un análisis de la cantidad de partículas generadas durante las operaciones. No tiene sentido hacer comparaciones de las muestras obtenidas después de que el fluido es procesado por los equipos de control de sólidos ya que como se mencionó anteriormente la cantidad de partículas magnéticas en esta ubicación se ve afectada por la eficiencia y el diseño de las zarandas y es muy poco probable que estos parámetros sean idénticos en dos taladros

diferentes. Las zarandas se diseñan en base a la granulometría de los compuestos densificantes, el tipo de formación existente en la zona a perforar y la mecha a utilizar.

IV.4.2 Sidetrack

Un *sidetrack* es definido como la desviación de la trayectoria original de un pozo. En este taladro se estaba realizando esta operación para mejorar la producción del yacimiento. La descripción general de la operación era perforar el tapón de cemento, alcanzar 5° de inclinación, con una dirección de 300° con respecto al norte referencial y mantener estos valores por 600 pies (ft) para finalmente verticalizar el pozo.

La zapata del revestidor se encontraba a 3020 ft y el sidetrack inició a 3098 ft. El magneto fue colocado antes de los equipos de control de sólidos con la finalidad de observar la granulometría de las muestras que salía del hoyo. Se recolectaron muestras cada 12 horas y los resultados obtenidos pueden observarse en la Tabla N° 25.

Tabla N° 25: Masa de partículas magnéticas clasificada por tamaños en la prueba 8

Muestra	Masa de partículas magnéticas (m ± 1) g				Total
	10 Mesh	100 Mesh	200 Mesh	<200 Mesh	
1	1050	502	143	78	1773
2	820	368	113	55	1356
3	720	342	96	41	1199
4	920	414	126	78	1538
5	325	93	54	18	490
6	426	115	73	30	644

En la primera muestra se observa una recuperación muy elevada de partículas magnéticas, alcanzando un total de 1773 gramos. Cabe destacar que por poco se alcanza el punto de saturación del imán en tan solo 12 horas. Esta elevada recuperación se debe a que la perforación del tapón de cemento se estaba realizando muy cerca de la zapata. Esta operación crea un incremento bastante considerable del roce de la sarta con el revestidor debido a que el ensamblaje de fondo o BHA generalmente tiene estabilizadores. Estas herramientas tienen un diámetro mayor que

la sarta y por ende, el espacio la zona estabilizada y el revestidor es mucho menor, causando un mayor desgaste en el mismo.

El roce de los estabilizadores con el revestidor genera grandes partículas con una forma muy característica, observada en la Figura N° 21.



Figura N° 21: Partículas magnéticas generadas durante la realización de un *sidetrack*

Este tipo de partículas alcanzaron un valor de 1050 gramos durante la primera etapa del *sidetrack*. Cabe destacar que no solo este tipo de partículas aumentaron, esta tendencia se observa en todos los tamaños de partículas estudiados. En la Figura N° 22 se observa el comportamiento de la cantidad de partículas en cada muestra recolectada y la relación entre los tiempos de bombeo y de perforación TB/TP.

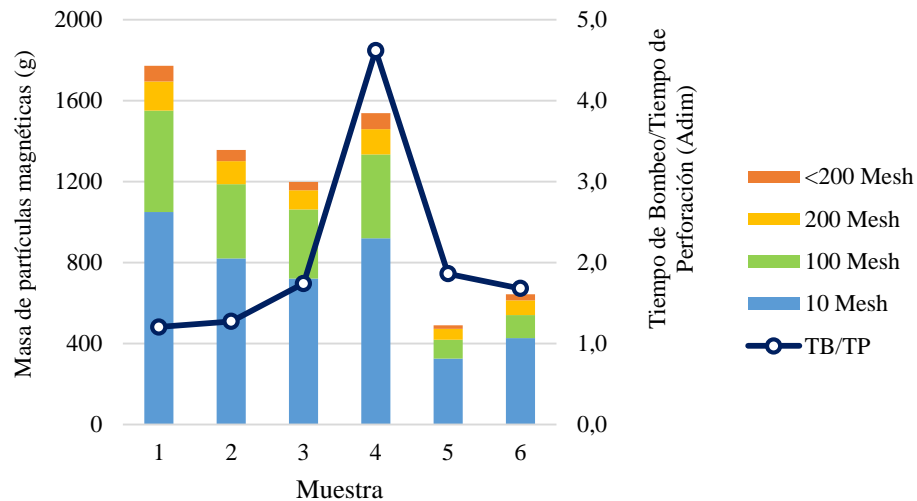


Figura N° 22: Masa de partículas magnéticas y relación entre el tiempo de bombeo y el tiempo de perforación de la prueba 9

En la segunda muestra recolectada se observa una disminución considerable en la cantidad de partículas. Esto se debe a que después de 12 horas perforando, el ensamblaje de fondo ya había salido del revestidor y por ende la cantidad de partículas generadas disminuyó.

En la cuarta muestra recolectada se observa de nuevo un incremento en la cantidad de partículas recuperadas por el imán, esta tendencia se debe a que hay un aumento significativo de la relación entre el tiempo de bombeo y el tiempo de perforación. Un aumento del tiempo de bombeo incrementa la limpieza del hoyo.

Al observar los datos obtenidos de esta experiencia, se puede concluir que se genera una gran cantidad de partículas cuando el ensamblaje de fondo rota dentro del revestidor.

IV.4.3 Limpieza de hoyo

Como se observó en el punto discutido anteriormente, la limpieza del hoyo juega un papel fundamental en la cantidad de partículas que salen del pozo.

Cuando los tiempos de circulación son altos y los tiempos de perforación bajos, es posible asegurar una buena limpieza del hoyo ya que estas condiciones permiten que la mayoría de los sólidos existentes en el pozo sean transportados a la superficie.

En estos sólidos están incluidas las partículas magnéticas y debido a esta razón, cuando la relación entre el tiempo de bombeo y el tiempo de perforación aumenta, hay un incremento en la cantidad de partículas adheridas a la superficie del imán.

Después de una elevada recuperación de partículas debido a los efectos de la limpieza del hoyo, se observa una disminución considerable de las mismas.

Este comportamiento puede observarse en todas las muestras recolectadas antes de los equipos de control de sólidos en las siguientes figuras.

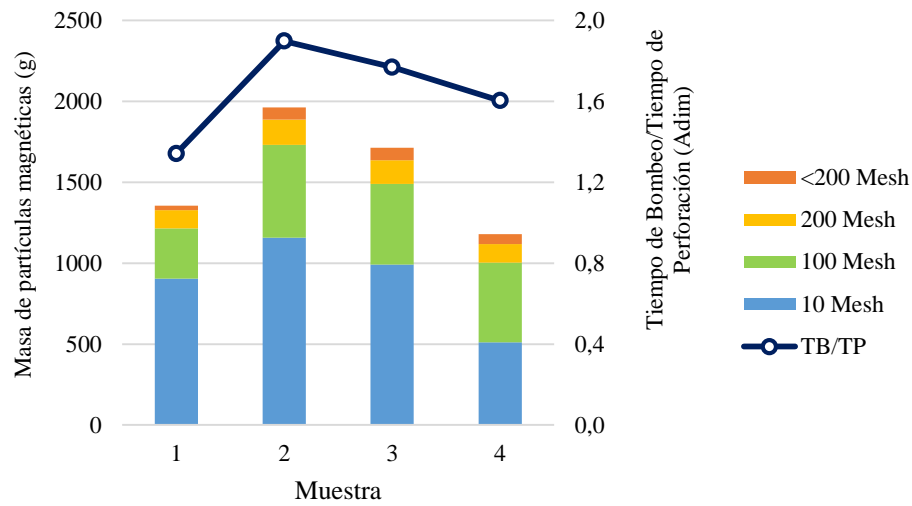


Figura N° 23: Masa de partículas magnéticas y relación entre el tiempo de bombeo y el tiempo de perforación de la prueba 1

Para los resultados de la prueba 1, mostrados en la Figura N° 23, se evidencia una mayor recuperación de partículas en la muestra 2, debido a los efectos de limpieza de hoyo.

Del mismo modo, en la Figura N° 24 se observa el mismo comportamiento pero en una forma más leve. Esto se debe a una relación muy cercana a la unidad entre los tiempos de bombeo y perforación.

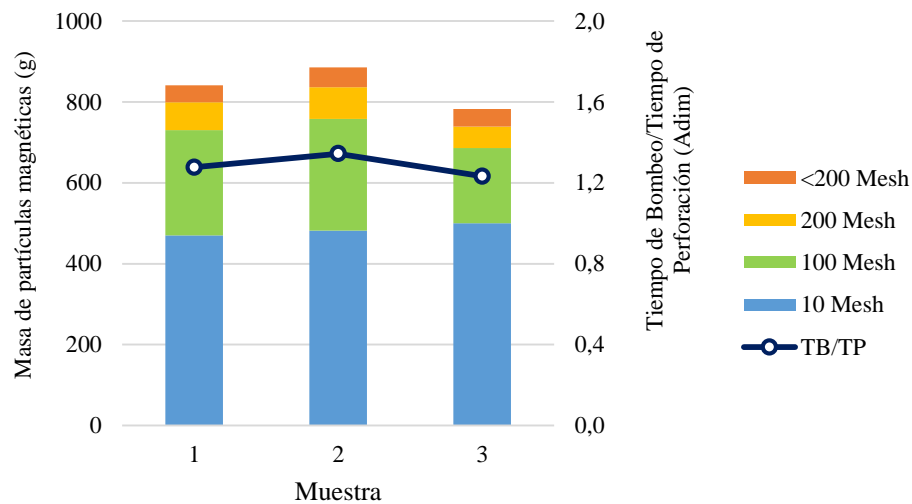


Figura N° 24: Masa de partículas magnéticas y relación entre el tiempo de bombeo y el tiempo de perforación de la prueba 4

Una diferencia más marcada se evidencia cuando esta relación es superior a 4. Esto puede observarse en la Figura N° 25 y en la Figura N° 22.

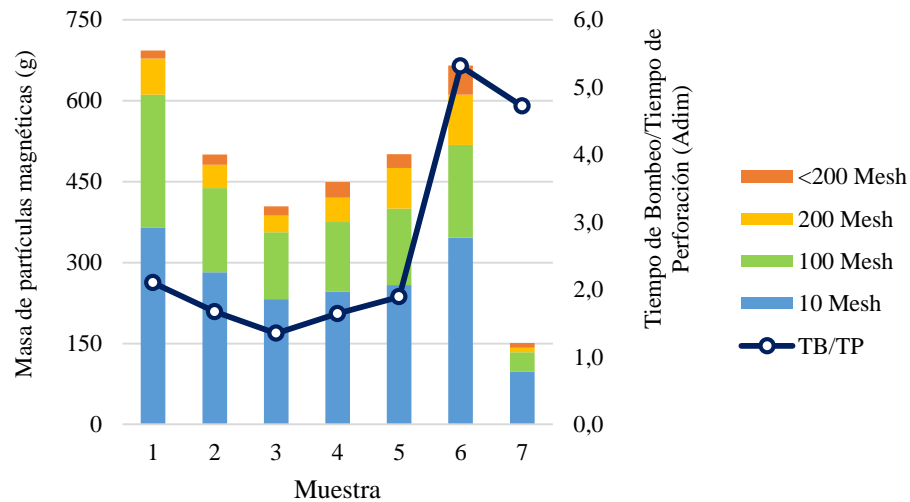


Figura N° 25: Masa de partículas magnéticas y relación entre el tiempo de bombeo y el tiempo de perforación de la prueba 6

Este análisis de la cantidad de partículas realizado antes de los equipos de control de sólidos puede extenderse a cuando el magneto es ubicado después de los mismos, ya que si salen más partículas del pozo habrá una mayor cantidad de partículas en todo el sistema, incluyendo en el canal que se dirige hacia el tanque activo.

Los resultados obtenidos de este análisis sugieren que cuando se realizan operaciones de circulación, el magneto debe ser monitoreado y limpiado con una mayor frecuencia para asegurar una remoción eficiente de las partículas magnéticas que circulan en el sistema.

Debido a que no se alcanzaron condiciones de saturación del imán en las pruebas realizadas después de los equipos de control de sólidos cada 12 horas, se puede decir que limpiar el magneto con esta frecuencia podría evitar fallas en las herramientas.

IV.4.4 Otras consideraciones

En las operaciones de perforación existen una gran cantidad de factores que inciden en la cantidad de partículas que se generan.

Durante las pruebas realizadas en los taladros no se pudo observar la influencia de muchos parámetros que pueden afectar la cantidad de partículas que salen del pozo, debido a que se requiere una gran cantidad de datos para hacer las correlaciones entre las operaciones que se estén llevando a cabo y la cantidad de partículas magnéticas que se generan en el pozo.

Sin embargo en la siguiente sección se explican las posibles tendencias que pueden ser observadas cuando se varían ciertos parámetros como: la geometría del pozo, la profundidad del último revestidor, el peso sobre la mecha y el galonaje de operación.

Geometría del pozo

En pozos tortuosos y de alta inclinación, las fuerzas laterales ejercidas por la sarta en el revestidor pueden incrementarse, ya que la sarta tiende apoyarse en las paredes del revestidor por efectos de la fuerza de gravedad, perdiendo la centralización y generando mayor fricción entre estos dos elementos.

Profundidad del último revestidor

A medida de que aumenta la superficie revestida hay una mayor área de contacto entre la sarta y el revestidor, este mayor contacto favorece la generación de viruta magnética en el sistema.

Peso sobre la mecha

Un incremento de este parámetro de perforación tiende a comprimir la sarta, generando puntos de apoyo de la misma sobre el revestidor. Al momento de girar la sarta, se produce un desgaste del revestidor en estos puntos, generando una mayor cantidad de partículas magnéticas.

Galonaje de operación

Se espera una menor eficiencia en el proceso de separación de metales cuando hay un mayor galonaje de operación. Al aumentar el caudal del fluido de perforación, incrementa en forma proporcional la velocidad y consecuentemente la turbulencia del fluido. Este aumento en la turbulencia desfavorece el contacto entre el fluido de perforación y la superficie del imán y aumenta el efecto de arrastre de las partículas.

Es por ello, que a medida que aumenta el galonaje de operación se debe monitorear el magneto con una mayor frecuencia, con la finalidad de evitar la presencia de una gran

cantidad de partículas adheridas en la superficie del imán, que puedan ser arrastradas fácilmente por el fluido.

Un sistema de circulación de fluido libre de partículas magnéticas no solo garantiza el correcto funcionamiento del PowerDrive. Este tipo de partículas también son perjudiciales en otros equipos, tales como las bombas de fluido y las herramientas que determinan la dirección del pozo en tiempo real. Por ello, es importante considerar los factores mencionados anteriormente para mejorar el proceso de separación de partículas magnéticas. Tener en cuenta bajo cuales condiciones se genera una mayor cantidad de partículas magnéticas, podría alertar al personal de campo sobre posibles ineficiencias en la separación de las mismas.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo a los resultados expuestos en este Trabajo Especial de Grado, a continuación se presentan las conclusiones y recomendaciones.

V.1 CONCLUSIONES

- La cantidad de partículas adheridas al magneto no tiene una relación lineal con respecto al tiempo. A medida de que el tiempo transcurre, la intensidad del campo magnético disminuye debido al efecto de interferencia causado por las partículas metálicas adheridas a la superficie del imán.
- Resulta beneficioso ubicar el magneto después de los equipos de control de sólidos, ya que bajo las mismas condiciones de operación es necesario limpiarlo con menos frecuencia que un magneto instalado después de las zarandas.
- Alrededor del 56% de la muestra recolectada antes de las zarandas tiene un tamaño de partícula superior a 2000 micrones, estas partículas pueden ser descartadas fácilmente por los equipos de control de sólidos.
- Cuando el magneto es colocado después de los equipos de control de sólidos, la cantidad de partículas con un tamaño comprendido entre 150 y 2000 micrones disminuye en gran magnitud con respecto a la cantidad recolectada por el imán ubicado antes de las zarandas.
- La cantidad de partículas con un tamaño inferior a 150 micrones aumenta cuando el magneto es colocado después de los equipos de control de sólidos en relación a la cantidad recolectada antes de los mismos.

- La magnitud de la diferencia entre los resultados obtenidos cuando el magneto es colocado antes y después de los equipos de control de sólidos depende de la eficiencia, el diseño y la configuración de los mismos.
- El segundo magneto colocado en serie después de los equipos de control de sólidos optimiza el proceso de separación de partículas magnéticas en el fluido de perforación.
- En algunos taladros es imposible colocar dos magnetos en serie en el canal efluente de los equipos de control de sólidos debido a falta de espacio físico.
- Es probable que se genere una menor cantidad de partículas magnéticas con un tamaño de partícula inferior a 150 micrones cuando se opera con fluidos a base de aceite.
- Las operaciones de rotación del ensamblaje de fondo dentro del revestidor generan una gran cantidad de partículas magnéticas en el pozo.
- Una relación entre el tiempo de bombeo y el tiempo de perforación mayor a 4 garantiza una buena limpieza del hoyo, en consecuencia, cuando se hace circular el fluido de perforación por un tiempo considerable, una gran cantidad de partículas son recuperadas por el magneto.
- El aumento de la tortuosidad del hoyo, la profundidad del último revestidor y el peso sobre la mecha puede originar una mayor fricción entre la sarta y el revestidor, generando una mayor cantidad de partículas magnéticas.
- Un incremento en el galonaje de operación puede generar el arrastre de las partículas adheridas a la superficie del magneto.

V.2 RECOMENDACIONES

- Con la finalidad de determinar si el magneto se encuentra saturado puede emplearse un sensor de campo magnético.
- Reconsiderar la posibilidad de cambiar los magnetos utilizados convencionalmente por los EZ Clean, debido a que estos proporcionan una mayor área de contacto con el fluido de perforación y consecuentemente favorecen la recuperación de partículas magnéticas.
- Aumentar la frecuencia de limpieza y monitoreo del magneto cuando se opere bajo condiciones que generen una gran cantidad de partículas magnéticas.
- En vista de que el magneto no alcanzó el punto de saturación en 12 horas, se recomienda remover las partículas adheridas a la superficie en un lapso de tiempo igual o menor.
- Colocar el magneto en forma horizontal con la finalidad de aumentar el área de contacto del imán con el fluido de perforación.

BIBLIOGRAFÍA

- Baker Hughes. (1998). Fluid Facts. Engineering Handbook. Manual no publicado. Houston.
- Baroid Drilling Fluids. (1998). Baroid Fluids Handbook. Manual no publicado. Houston.
- Barrero, J. (s.f.). Geology and Drilling problems. [Página web en línea]. Disponible: <http://geologyanddrillingproblems.com/Contaminacion+lodo> [Consulta: 2015, octubre 3]
- Clarke, R. (2014). PowerDrive X6 - Operations manual.
- Cullen, M. (2012). PowerDrive lower torquer jammed with fine magnetic solids. Kazakhstan.
- Cullen, M. (2013). Flowline magnet recovery analysis in the 12¼” and 14¾” sections of a 7-well project. Kazakhstan.
- Das, A. y Roy, S. (2007). Magnetic Separation-Principles and Application in Beneficiation of Iron Ores. [Libro en línea]. Disponible: <http://eprints.nmlindia.org/5907/1/89-102.PDF>. [Consulta: 2015, agosto 19]
- Fkerin, H. (2012). Ditch Magnet Optimization. Unit Kingdom.
- Hendricks, A. (2000). Nuevos rumbos en la perforación rotativa direccional. [Revista en línea]. Disponible: https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/spanish00/sum00/p20_31.pdf [Consulta: 2015, mayo 29]
- Inerowicz, M. (2013). PowerDrive X6: Theory Of Operation & Components. Texas: D&M Learning Centers.
- M-I Swaco. (2001). Drilling Fluids Manual. Manual no publicado. Dallas.
- Norrgran, D. (2006). Magnetic Field. North America. [Revista en línea]. Disponible: <http://www.eriez.com/resources/webpages/news/Reprints/World%20Coal%20July.pdf> [Consulta: 2015, octubre 5]
- QUEST. (2015). RIR Reports.

- Ribeiro, D. (2014). Control Unit. Functional Description and Theory of Operation for Mechanics. Sugar Land, Texas: D&M Learning Centers.
- Schaaf, S., Pafitis, D., & Guichemerre, E. (2000). Application of a Point the Bit Rotary Steerable System in Directional Drilling Prototype. California.
- Schlumberger. (2011). Study for PowerDrive Torquer Jamming in Shaybah Field. Shaybah Field.
- Schlumberger. (2001). Introduction to Directional Drilling. Sugar Land.
- Schlumberger. (2012). Sidetrack from vertical whipstock with PowerDrive. Mexico.
- Schlumberger. (2013). PowerDrive X5/X6 - Quality Improvement Release - Torquer Jamming.