

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN DEL TIEMPO OPERATIVO DE LOS MOTORES DE FONDO DE SCHLUMBERGER D&M EAST VENEZUELA EN EL CAMPO ZUATA PRINCIPAL

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Morante H., Eduardo A.
Para optar al Título de
Ingeniero de Petróleo

Caracas, Octubre 2011

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN DEL TIEMPO OPERATIVO DE LOS MOTORES DE FONDO DE SCHLUMBERGER D&M EAST VENEZUELA EN EL CAMPO ZUATA PRINCIPAL

Tutor Académico: Prof. Jenny Graterol

Tutor Industrial: Ing. Kevin Hartliep

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Morante H., Eduardo A.
Para optar al Título de
Ingeniero de Petróleo

Caracas, Octubre 2011

Caracas, de Octubre de 2011

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería de Petróleo para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Morante H., Eduardo A., titulado:

**“EVALUACIÓN DEL TIEMPO OPERATIVO DE LOS MOTORES
DE FONDO DE SCHLUMBERGER D&M EAST VENEZUELA EN
EL CAMPO ZUATA PRINCIPAL”**

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

Prof. Violeta Wills

Jurado

Prof. Rene Rojas

Jurado

Prof. Jenny Graterol

Tutor

DEDICATORIA

A Dios, por la salud y oportunidades que me proporciona día tras día.

A Yajaira, por representar valor, coraje, amor y valentía en su firme e incomparable ejemplo de vida. Y que este triunfo sirva de introducción a la cadena de éxitos que gracias a su guía podré alcanzar.

A Adriana, por ser bastión incondicional en la empresa de cada objetivo que me propongo.

A mi familia, por demostrarme que la unión y el amor son la fuerza motora del mundo.

A mis amigos, por creer en mí siempre y apoyarme en cada paso.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por concederme la determinación necesaria para la obtención de este logro.

A la Universidad Central de Venezuela, por significar más que una casa de estudios, una fortaleza de conocimientos y sensaciones, la ventana a un universo de posibilidades en el cual se aprende a vivir y a valorar cada segundo. Por permitir mi formación como ingeniero de petróleo. Y por la creación de lazos de amistad y hermandad inseparables en mi vida.

Al segmento *Drilling and Measurements* de *Schlumberger* en Venezuela por darme la oportunidad de llevar a cabo las pasantías como parte de su cuerpo laboral, dando el primer paso en mi formación profesional y relación directa con la industria petrolera.

A la profesora Jenny Graterol, tutora académica del presente trabajo, por romper los esquemas de la enseñanza a través de un método de superación personal y crecimiento humano ante todo, dejando de lado la figura ortodoxa de la docencia general y centrándose en lo verdaderamente importante que es la formación integral del ingeniero, convirtiéndose más que en una guía, en una amiga invaluable.

Al ingeniero Kevin Hartliep por su experiencia y orientación como tutor industrial de este proyecto, brindándome su apoyo y supervisión en cada momento requerido.

Al personal del segmento *Drilling and Measurements* por la colaboración prestada, especialmente a mi mentor en operaciones de campo Luis Morán, por apoyarme y adiestrarme en dichas actividades con una disposición excepcional.

A mi madre Yajaira Morante, por ser la figura más importante en mi formación como persona, representando el amor sin condición que cada día me llena de vitalidad. Me siento honrado al expresar que es mi escudo y bandera en cualquier empresa debido a la insuperable admiración que siento por ella. Vivo ejemplo de determinación, valor, fuerza, humildad y sobretodo grandeza. Las lecciones que se

enseñan sin decir una palabra son las más significativas y hoy en día tengo el placer de predicar que, segundo a segundo, su ejemplo motiva mi ser y sentir. Por todo lo que significa, por ser mi orgullo y adoración, por regalarme su vida sin dudar, mi principal agradecimiento a ella, la razón de mi existencia... Yaya.

A mi abuelo Antonio Morante, quien representa mi principal motivación, mi ejemplo a seguir, mi modelo de individuo, la versión idealista de mi persona en un futuro. Su integridad y entereza me fortalecen cada día, mientras que su humildad y sensibilidad me acercan a mis sentimientos. Ejemplo del significado de la palabra “honor”, mi agradecimiento a mi héroe, a mi padre... Antonio.

A mi bisabuela Agueda Vera de Morante, la primera y única versión de “amor” que maneja mi vida, la forma más sutil y contundente de sentimiento puro, una imagen irremplazable en mi corazón de vivencias y cariño embriagador, la flor de brillo incandescente y retoño infinito, mi paz interior... Guaca.

A mi abuela Cristina Hernandez de Morante y mi tía Judith Morante, por ser las razones de mi sonrisa cada día, por ser consideradas como el motivo de mi alegría y optimismo, por consentir cada palabra y pensamiento y llenarme de ternura, amor y calidez, mis dos eternos amores, mis dos grandes sentires... Cristina y Judy.

A mi novia Adriana Camacho, por su apoyo incondicional, aliento permanente, palabras oportunas y amor sin medida que fueron factor imprescindible en el éxito alcanzado y enaltecen día a día la promesa de un futuro sin igual, mi princesa... Adri.

A mis primos, Daniel y Verónica García, que motivan mi correcto proceder para ser algún día, ejemplo de sus pasos y confidente de su éxito, mis prospectos... Dani y Coca.

A mis tíos Antonio Morante y Haydee Conde, por su guía, consejos y apoyo constante.

A mis compañeros de pasión, mi equipo de fútbol Real Ingeniería, por colaborar con la formación de mi personalidad y liderazgo, y enseñarme el concepto de “hermandad”.

Eduardo Morante

Morante H., Eduardo A.

**EVALUACION DEL TIEMPO OPERATIVO DE LOS MOTORES
DE FONDO DE SCHLUMBERGER D&M EAST VENEZUELA EN
EL CAMPO ZUATA PRINCIPAL
(PASANTIA LARGA)**

Tutor Académico: Prof. Jenny Graterol. Tutor Industrial: Ing. Kevin Hartliep
Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Petróleo.
Año 2011, 109 pp.

Descriptor: Motor de fondo, Ensamblaje de fondo, Perforación direccional, Faja
Petrólifera del Orinoco, Zuata Principal.

Resumen: El segmento D&M East de *Schlumberger* en Venezuela desarrolla productos y servicios requeridos por compañías operadoras entre los cuales se encuentra la perforación direccional, operación que enmarca el presente trabajo y que necesita de tecnología de punta para su desarrollo. Dada esta necesidad, el presente proyecto tuvo como propósito dar respuesta a los requerimientos de control de calidad de la tecnología empleada, referente a los motores de fondo de desplazamiento positivo y su desenvolvimiento en operaciones de campo; para lo cual se propuso la evaluación del tiempo operativo de dichas herramientas. Para lograr el objetivo se realizó un diagnóstico de parámetros operacionales de los motores, para luego determinar los factores incidentes en su desgaste, tomando como referencia especificaciones técnicas para la evaluación de parámetros fuera de rango. Por tal fin la investigación se contextualizó en la modalidad de proyecto documental, de campo y descriptivo, donde la población y la muestra de estudio fueron de 29 y 7 motores respectivamente, adicionalmente como técnica de recolección de datos se utilizó la observación directa de campo para obtener la data requerida de primera mano y en forma exacta, a objeto de revisar e identificar los factores causantes de la disminución de tiempo operativo de los motores. Esto se determinó mediante el análisis cuantitativo los resultados documentados, que arrojaron como principales responsables del problema a parámetros operacionales fuera de rango relacionados a la sección de rodamientos de las herramientas, que en vista de su corrida fuera de especificación evidenció daños a causa de la falta de lubricación. De este modo el presente proyecto propone una medida para mitigar el desgaste de los motores de fondo de *Schlumberger* D&M East Venezuela a través de la evaluación de dos escenarios referidos a la hidráulica del pozo y la sustitución de las herramientas empleadas.

ÍNDICE GENERAL

CONSTANCIA DE APROBACIÓN	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS	v
RESUMEN	viii
ÍNDICE GENERAL	viii
ÍNDICE DE TABLAS	xiv
ÍNDICE DE FIGURAS	xv
ÍNDICE DE GRÁFICAS	xvii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	
EL PROBLEMA	3
Planteamiento del problema	3
Objetivos	6
General	6
Específicos	6
Antecedentes de la Investigación	7
Justificación de la Investigación	8
Alcance de la Investigación	9
Limitaciones	9
CAPÍTULO II	
MARCO TEÓRICO	10
Perforación Direccional.....	10
Aplicaciones	11
Perforación en Localizaciones Inaccesibles	11
Evitar Perforacion de Domos de Sal	11
Perforación por Macolla	11
Perforación de Pozos de Alivio	11
Desviación de un Hoyo ya Perforado	11

Control de Desviación	12
Métodos de Recuperación Mejorada	12
Motivos Económicos	12
Tipos de Pozos Direccionales	12
Tipo Tangencial.....	12
Tipo “J”	12
En Forma de “S”	13
Inclinado o de Alto Ángulo.....	13
Horizontales	13
Reentradas.....	14
Multilaterales	14
Secciones de Pozos Direccionales	14
Ensamblaje de Fondo o <i>Bottom Hole Assembly</i> (BHA)	15
Componentes Posibles de Ensamblaje de Fondo	15
Arreglos de Ensamblajes de Fondo	16
Ensamblaje de Estabilizador Único.....	16
Ensamblaje de Dos Estabilizadores.....	16
Ensamblaje de Estabilizadores Múltiples	16
Ensamblaje Combinado de Construcción y Mantenimiento de Ángulo	16
Ensamblaje Tipo Péndulo	17
Problemas de Ensamblajes de Fondo	18
Efectos de la Formación	18
Mechas Desgastadas	18
<i>Sidetrack</i> Accidental.....	18
Mechas Descalibradas	19
Pega Diferencial	19
Parámetros de Perforación	19
Hidráulica	20
Motores de Fondo	20
Tipos de Motores	20

Motor Tipo Turbina	20
Motor de Desplazamiento Positivo (PDM)	21
Diseño Básico	22
<i>Top Sub</i> o <i>Float Sub</i>	22
Sección de Poder	23
Ensamblaje de Transmisión	28
<i>Bend Housing</i>	27
Sección de Rodamientos	28
Eje de Manejo	29
<i>Bit Sub</i>	29
Especificaciones	30
Especificaciones Físicas y Operativas	30
Torque de Conexiones y Armado.....	31
Curva de Poder del Motor	31
Material de Pérdida de Circulación y Aditivos del Lodo	32
Limitaciones de RPM	32
Fluidos de Perforación.....	34
Hidráulica	35
Mantenimiento	38
Niveles de Mantenimiento	39
Procedimientos Para el Mantenimiento de Motores de Fondo PDM	39
Sistema de Configuración.....	40
Evaluación de <i>Top Sub</i> Para Su Reúso.....	40
Evaluación de Sección de Poder Para Su Reúso	40
Evaluación de Sección de Transmisión Para Su Reúso.....	41
Evaluación de Sección de <i>Bend Housing</i> Ajustable Para Su Reúso	41
Evaluación de Sección de Rodamientos Para Su Reúso	41
Evaluación de Sección de Manejo Para Su Reúso	42

CAPÍTULO III

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	43
Faja Petrolífera del Orinoco	43
Bloque Junín	44
Campo Zuata Principal.....	47
Formacion La Mesa.....	48
Formacion Las Piedras	48
Formacion Freites.....	48
Formacion Oficina.....	49
Modelo de Perforación Propuesto en Zuata Principal.....	49
Información Geológica	49
Datos Petrofísicos y Reservas	50
Configuración de Pozo	50
Schlumberger Oilfield Services	51
Misión.....	52
Servicios y Productos	52
Visión	53
Segmento Drilling and Measurements	53
Misión.....	53
Visión	53

CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA	54
Tipo de Investigación	54
Diseño de la Investigación.....	54
Población y Muestra	54
Definición de Indicadores	55
Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos	57
Fases de la Investigación.....	57
Elaboración de la Revisión Bibliográfica.....	58
Estudio de Estándares de Calidad de Servicio de SLB D&M East VZE	58

Capacitación y Adiestramiento	59
Selección de la Muestra de Estudio y Elaboración de Base de Datos.....	60
Operaciones de Campo y Recolección de Datos	62
Revisión y Evaluación de Parámetros Operacionales de Motores de Fondo en el Campo Zuata Principal.....	62
Discusión de Resultados e Identificación de Factores que Inciden en el Desgaste de los Motores Estudiados	68
Definición de Plan de Acción Para Mitigar Efecto de Factores Identificados.....	69
CAPÍTULO V	
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	71
Proyecto de Estándares de Calidad de Servicio.....	71
Base de Datos de Pozos y Motores Estudiados	72
Evaluación de Parámetros Operacionales	73
Comparación Entre Valores Prácticos y Teóricos	85
Evaluación de Impacto en Motores de Fondo	88
Relación entre Tiempo Operativo y de Mantenimiento	88
CAPÍTULO VI	
LA PROPUESTA.....	90
Definición de Plan de Acción Para Mitigar Desgaste de Motores de Fondo en el Campo Zuata Principal	90
Identificación de Problemática Asociada a la Reducción del Tiempo Operativo y Desgaste de los Motores de Fondo Estudiados	90
Evaluación Hidráulica	92
Fundamentos	92
Diseño	93
Limitaciones.....	93
Cambio de Motores Empleados	94
Fundamentos	94
Limitaciones.....	94
CONCLUSIONES	95

RECOMENDACIONES	96
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97
GLOSARIO.....	99
ANEXOS	104

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Parámetros Físicos y Operativos de Motores de Fondo Estudiados	30
Tabla 2.- Torque Requerido Para Ensamblaje de Motor	31
Tabla 3.- Compañías Operadoras en Cada División de Junín	46
Tabla 4.- Ficha de Trabajo de Motor	57
Tabla 5.- Lista de Control de Estándares de Calidad Auditados	59
Tabla 6.- Formato de Recolección de Datos de Motores de Fondo	61
Tabla 7.- Formato para Evaluación de Detalles de Corrida	64
Tabla 8.- Formato para Evaluación de Detalles de Hidráulica.....	65
Tabla 9.- Formato para Evaluación de Detalles de Motor	65
Tabla 10.- Formato para Evaluación de Detalles de Mantenimiento	66
Tabla 11.- Formato para Evaluación de Detalles de la Mecha.....	67
Tabla 12.- Lista de Resultados de Estándares de Calidad Tratados	71
Tabla 13.- Datos de Motores de Fondo Corridos en Macollas A y B de Zuata Principal	72
Tabla 14.- Evaluación de Detalles de Corrida	74
Tabla 15.- Evaluación de Detalles de Hidráulica	77
Tabla 16.- Evaluación de Detalles del Motor.....	79
Tabla 17.- Evaluación de Detalles de Mantenimiento del Motor.....	81
Tabla 18.- Evaluación de Detalles de la Mecha	83
Tabla 19.- Valores Prácticos y Teóricos Comparados	85
Tabla 20.- Justificación del Diseño Hidráulico	92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Zona Difícil	11
Figura 2.- Domo de Sal	11
Figura 3.- Plataforma	11
Figura 4.- Alivio	11
Figura 5.- <i>Sidetrack</i>	11
Figura 6.- Desviación.....	12
Figura 7.- Navegación.....	12
Figura 8.- Costa Afuera.....	12
Figura 9.- Secciones de Pozos Direccionales	14
Figura 10.- Ensamblajes de Fondo Para Construcción, Mantenimiento y Disminución de Ángulo	17
Figura 11.- Principio Operacional de Motores Tipo Turbina y PDM	viii
Figura 12.- Ensamblaje de Válvula de Pistón	22
Figura 13.- Configuración de Lóbulos Rotor/Estator	23
Figura 14.- Torque y Velocidad vs Presión Diferencial	24
Figura 15.- Perfil Térmico – Histéresis del Elastómero	25
Figura 16.- Ajuste de Interferencia Rotor/Estator	26
Figura 17.- Ensamblaje de Transmisión Típico de PDM.....	27
Figura 18.- Esquema Básico Externo de Motor de Fondo	28
Figura 19.- Sección de Rodamientos	28
Figura 20.- Curva de Poder de Motor de Fondo Estudiado	31
Figura 21.- Impacto de Secciones del Pozo en Motores de Fondo.....	33
Figura 22.- Balance de Empuje en Sistema de Rodamientos.....	37
Figura 23.- Faja Petrolífera del Orinoco	43
Figura 24.- Rasgos Estructurales de la Cuenca Oriental de Venezuela	45
Figura 25.- Compañías Operadoras por Bloque	46
Figura 26.- Columna Estratigráfica del Bloque Junín	47
Figura 27.- Diagrama de Pozo Propuesto A01 en Zuata Principal.....	51

Figura 28.- Pasos Para la Selección de Muestra y Elaboración de Base de Datos.....	61
Figura 29.- Pasos Para Evaluación de Parámetros Operacionales.....	68
Figura 30.- Pasos Para Definición de Propuesta de Acción.....	69
Figura 31.- Diagrama de Formulación de Propuesta de Mitigación.....	90

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1.- Parámetros de Corrida (Profundidad y Tiempo Operativo)	75
Gráfica 2.- Parámetros de Corrida (Pata de Perro e Inclinación)	76
Gráfica 3.- Parámetros de Hidráulica	77
Gráfica 4.- Relación de Componentes Afectados en Motores Analizados	84
Gráfica 5.- Parámetros Operacionales Fuera de Rango	87
Gráfica 6.- Relación Entre Tiempo Operativo Teórico y Práctico	89



INTRODUCCIÓN

Más de 80 años de trayectoria han hecho de *Schlumberger* una empresa pionera en el desarrollo tecnológico de productos y servicios avocados a la industria petrolera y gasífera a nivel mundial. A través de la evolución de una amplia gama de servicios *Schlumberger* provee resultados de excelencia en operaciones de evaluación de formaciones, caracterización y simulación de yacimientos, perforación, monitoreo de pozos, cementación, cañoneo, completación y pruebas de pozos, estimulación de formaciones, producción y levantamiento artificial de hidrocarburo.

Todo esto gracias a una política de aseguramiento de la calidad que involucra a empleados, clientes, contratistas y terceros, relacionados al negocio. Esta política sigue una serie de estándares preestablecidos que, se deben cumplir a cabalidad, a modo de garantizar la excelencia en todas las operaciones de la empresa.

Dicha base fundamenta el conjunto de actividades que llevan a cabo cada uno de los segmentos que conforman la empresa, siendo objeto del presente estudio el segmento *Drilling and Measurements* (D&M) avocado a la fase perforación y perfilaje de pozos en tiempo real, operaciones desempeñadas con alto nivel de calidad de servicio con la colaboración de los recursos tecnológicos con los que cuenta la compañía. Actualmente, es de suma importancia para el segmento D&M *East* de *Schlumberger* en Venezuela (SLB D&M East VZE) la mejora de sus recursos tecnológicos, por lo cual requiere la revisión de cada una de sus herramientas para definir, de manera adecuada, un plan de acción que garantice el correcto desenvolvimiento de sus operaciones, cumpliendo cabalmente el riguroso control de calidad establecido y traduciendo esto en aumentos significativos de productividad y satisfacción del cliente.

Dirigido a cumplir con esa premisa, se emplean herramientas de perforación que conforman ensamblajes de fondo, de diseño particular de acuerdo a las formaciones y el tipo de pozo a perforar, con lo cual se hace referencia a motores de fondo de desplazamiento positivo en el presente trabajo con la pretensión de llevar a cabo la revisión de dicha herramienta y definir el plan de acción que garantice su correcto



desenvolvimiento en operaciones de campo. La estructura de la investigación realizada viene dada por:

✚ **Capítulo I – El Problema:**

En este capítulo se plantea el tema en estudio, problema referido a dicho tema y el contexto que lo enmarca, indicando los objetivos general y específicos de la investigación, antecedentes, justificación, alcance y limitaciones.

✚ **Capítulo II – Marco Teórico:**

Las bases teóricas que fundamentan el proyecto son presentadas en esta sección, englobando las actividades de perforación como tal y las herramientas empleadas para su desarrollo.

✚ **Capítulo III – Descripción del Área de Estudio:**

El marco territorial en el cual se lleva a cabo el estudio es descrito en este capítulo, presentando de macro a micro los ambientes y límites bajo los cuales se desarrolla el proyecto.

✚ **Capítulo IV – Metodología:**

El procedimiento realizado para llevar a cabo la investigación, se incluye en este apartado, en donde se tocan puntos como el tipo de estudio, diseño del proyecto, indicadores a tomar en cuenta, población, muestra seleccionada, técnicas de recolección y análisis de datos.

✚ **Capítulo V – Presentación y Análisis de Resultados:**

Este capítulo expone la representación de los datos recolectados en forma gráfica y escrita, otorgando una valoración a los mismos a través del análisis detallado de los instrumentos de presentación empleados.

✚ **Capítulo VI – La Propuesta**

Se presenta en esta parte el planteamiento sugerido por el investigador, de acuerdo a las valoraciones y juicios críticos referentes a las variables estudiadas, los objetivos de la investigación y los resultados obtenidos, con el fin de solucionar la problemática tratada.



CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La industria petrolera es una actividad de vital importancia en la economía mundial, desde el punto de vista tecnológico se encuentra en constante desarrollo en toda su estructura, particularmente en la zona aguas arriba, comprendida entre actividades de exploración y producción, su evolución juega un papel importante en la satisfacción de las necesidades y requerimientos del mercado actual pues representa el punto de partida de la serie de procesos y operaciones relacionadas a dichas actividades que se materializarán como productos de satisfacción al cliente. Dicho desarrollo va de la mano de una amplia gama de servicios adaptados a las condiciones ambientales en las cuales se llevan a cabo los procesos necesarios para la consecución del producto final. En Venezuela hacen vida diversas empresas de servicios que compiten en el mercado actual por la obtención de mayor número de clientes. *Schlumberger* lidera dicho rubro, ofreciendo gran variedad de productos destinados a la satisfacción de las necesidades de la industria petrolera local. Específicamente en el Segmento D&M East, componente del área latinoamericana, se desarrollan productos y servicios de uso industrial requeridos por compañías operadoras para la ejecución de diversas actividades de campo, lo cual es considerado estratégico para el Estado, en virtud de lo que económicamente representa el correcto desenvolvimiento de estas operaciones. La perforación direccional y la adquisición de data en tiempo real durante la perforación representan el principal servicio y producto demandado por empresas operadoras en vista del alcance de la actividad petrolera y aspectos geológicos referidos a los campos implicados en la misma, por esto se hace indispensable contar con el desempeño óptimo de las tecnologías empleadas en el desarrollo de cada etapa de la perforación para garantizar la satisfacción y consecuente lealtad del cliente. En contraste con lo anterior, se han presentado inconvenientes operacionales relacionados a herramientas esenciales para la prestación del servicio de perforación



direccional, traducidos en desgaste prematuro de las mismas y por consiguiente en disminución de tiempo operativo. Para efectos de control de calidad de la dicha tecnología se ha contado hasta los momentos con un equipo multidisciplinario de ingenieros mecánicos, electrónicos y de petróleo avocados a la constante revisión y análisis del desempeño de las herramientas propias del segmento antes, durante y después de las operaciones de perforación de pozos y cuyo aporte ha sido indispensable para garantizar la excelencia en productos y servicios proporcionados al cliente. El mérito referido a dicho equipo radica en el concepto de cliente interno definido como “aquellos empleados o procesos de la misma empresa” ^[1] que juegan un papel fundamental en la red del servicio que expresa la satisfacción del cliente externo o cliente final como una consecuencia de la satisfacción de los empleados y procedimientos operacionales propios del sistema de funcionamiento de cada empresa. *Schlumberger* entiende dicha relación, por lo cual solicita a cada uno de sus segmentos un control riguroso de calidad fundamentado en una serie de estándares de calidad de servicio interno que deben cumplirse a cabalidad. En consecuencia, surge la necesidad de evaluar los motivos que generan el desgaste prematuro de las herramientas mencionadas y acarrear la disminución en su disponibilidad para operaciones de campo, elementos de vital importancia que envuelven aspectos relacionados a especificaciones técnicas y tiempo del plan de mantenimiento existente.

En la actualidad, el desgaste de los motores de fondo empleados por SLB D&M East VZE para la perforación de pozos de desarrollo en el campo Zuata Principal, representa un efecto negativo directo en las operaciones a causa de la mayor necesidad de mantenimiento que presentan dichas herramientas y el aumento en la demanda de servicios prestados a compañías operadoras, demanda que se hace difícil de satisfacer al no disponer de los equipos necesarios en óptimas condiciones.

De acuerdo a lo anteriormente expuesto y considerando la filosofía de excelencia en calidad de servicios de la empresa, se hace imprescindible el incremento del tiempo operativo de los motores de fondo, lo cual implica el conocimiento geológico del campo en cuestión, la identificación de los factores involucrados en la merma del



tiempo operativo de los equipos y la evaluación del impacto que representa la disponibilidad de los mismos en las operaciones del segmento.

Por consiguiente se elaboró el presente trabajo con el propósito de estudiar los factores involucrados en la pérdida de tiempo operativo y desgaste de los motores de fondo empleados por SLB D&M East VZE para la perforación de la sección intermedia de pozos de desarrollo en el campo Zuata Principal, y de este modo plantear una solución factible que colabore al aumento de la disponibilidad de las herramientas y disminuya el impacto económico referido a costos de mantenimiento y tiempo no operativo de las mismas. Contribuyendo así a la garantía de excelencia que ha caracterizado a esta empresa en el mercado internacional.

En este contexto se consideró indispensable que la investigación se centrara en responder adecuadamente a la necesidad de incremento el tiempo operativo de los motores de fondo de SLB D&M East Venezuela en el campo Zuata Principal.



OBJETIVOS

General

- ✚ Identificar y evaluar factores que permitan incrementar el tiempo operativo de los motores de fondo de SLB D&M East Venezuela en el campo Zuata Principal.

Específicos

- ✚ Elaborar una propuesta para incrementar el tiempo operativo de los motores.
- ✚ Elaborar una base de datos con información correspondiente a pozos, litología y características del campo Zuata Principal.
- ✚ Identificar a partir de la historia de pozos perforados con herramientas de *Schlumberger* en el área, los principales problemas operativos referidos a motores de fondo durante la perforación de la sección intermedia del hoyo de perforación.



ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Se analizaron en detalle tres trabajos de investigación presentados a continuación para conocer experiencias similares, y los resultados obtenidos en las mismas, las cuales sirvieron de apoyo y orientación para la realización del proyecto.

Arévalo, Diego (2010) en la Universidad Central del Ecuador elaboró un trabajo de investigación titulado *Optimización de la Perforación Direccional y Horizontal en el Campo Auca Sur*, el cual tuvo como objetivo establecer criterios, recomendaciones y técnicas alternativas para la optimización de operaciones de perforación direccional y horizontal a través de la comparación de la planificación de proyectos con la ejecución de los mismos en el campo Auca Sur por parte de la operadora Estatal Petroproducción. La investigación fue del tipo descriptiva de campo. Los resultados de la misma indicaron que la optimización de actividades de perforación direccional recae en el aprovechamiento de la tecnología disponible y el procedimiento adecuado para llegar al objetivo de una manera eficiente y económica, conclusión considerada relevante para la investigación pues evidencia la importancia de la disposición de herramientas de óptima calidad para la ejecución de operaciones de campo.

Por su parte Almeida, D. y Cárdenas, R (2010) en la Escuela Politécnica Nacional de Ecuador desarrollaron una investigación titulada *Optimización de la Perforación de Pozos direccionales de los Principales Campos de Petroproducción en la Cuenca Oriente en Base a su Caracterización Litológica*, en la cual el principal propósito fue la optimización de parámetros de perforación de pozos direccionales empleados por la operadora Petroproducción en la Cuenca Oriente de Ecuador mediante la caracterización litológica de los campos en cuestión. La investigación tuvo carácter descriptivo. Los resultados obtenidos en el estudio evidencian la necesidad de ajustar los parámetros de perforación al atravesar algunas secciones con características litológicas particulares así como también la modificación del fluido de perforación implementado para contribuir con el ahorro de recursos de inversión a la empresa operadora. Este planteamiento representa un aporte para la investigación llevada a cabo puesto que evidencia factores que deben ser tomados en cuenta durante la perforación de pozos direccionales.



Finalmente en la Escuela Superior Politécnica del Litoral, Coloma, Mauricio (2008) realizó la *Evaluación de Ensamblajes de Fondo (BHA) Para Optimizar el Tiempo de Perforación en Pozos Direccionales en el Campo Sacha*, cuyo objetivo principal fue la determinación del ensamblaje de fondo óptimo para la perforación de pozos direccionales ejecutados por la compañía Halliburton en el campo Sacha, ubicado en el oriente ecuatoriano. La investigación se llevó a cabo en un marco descriptivo. De acuerdo al estudio de la información, se determinó que un correcto diseño de BHA contribuye a la optimización de perforación de pozos direccionales y reducción de costos asociados a tiempo de operación. Dicho planteamiento refiere una conclusión importante relacionada a un elemento clave de la presente investigación, el tiempo de operación.

Considerando estos antecedentes y los estudios previos realizados por *Schlumberger*, donde se evidencia la presente situación del mercado y de la empresa, la optimización de tecnologías y la constante actualización de los saberes prácticos son las principales estrategias para impulsar la consecución de actividades seguras y eficientes que optimicen los recursos disponibles y por ende garanticen operaciones con un nivel de riesgo mínimo y un alto grado de calidad, obteniendo así el mejor servicio posible y el valor agregado de reducción del factor tiempo que es considerado como fundamental dentro de la industria petrolera.

JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

El presente estudio busca aportar soluciones a SLB D&M East VZE referentes a las necesidades de disponibilidad de equipos adecuados para actividades de campo, que en la actualidad representan un impacto económico directo reflejado en la recurrencia del mantenimiento requerido por los mismos y por ende limitación de tiempo operacional.

Por consiguiente, se hace indispensable contar con un control de calidad efectivo para asegurar el correcto desempeño de las herramientas destinadas a operaciones competentes al segmento a modo de contribuir con el logro de los objetivos y metas planteadas de acuerdo con las condiciones de mercado y demanda actual, lo cual hace



necesaria la identificación de los factores incidentes en el desgaste de los motores de fondo estudiados con el fin de incrementar su tiempo y disponibilidad operacional.

ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

El presente Trabajo Especial de Grado (TEG) tiene como finalidad la definición de parámetros óptimos de operación de los motores de fondo de SLB D&M East VZE en el Campo Zuata Principal, involucrando aspectos relacionados a su desempeño durante perforación, especificaciones técnicas, mantenimiento y el impacto de dichas variables en la disponibilidad y eficiencia operacional de los mismos. Contribuyendo así, no solo a la optimización de la calidad del servicio prestado sino también a la disminución de costos de mantenimiento y por ende mayores beneficios económicos para la empresa.

El valor agregado de excelencia en ejecución es una premisa en todas las actividades de *Schlumberger*, en donde la satisfacción del cliente va de la mano con la preparación de cada uno de sus componentes y la reconocida calidad de los productos y servicios suministrados.

Partiendo de lo anterior, y teniendo en cuenta que el cumplimiento de requerimientos técnicos es necesario para la excelencia en ejecución de cualquier tipo de operación a cualquier nivel de la industria petrolera, serán objeto de estudio diversas corridas de las herramientas en el campo en cuestión y campos de características litológicas similares para, de este modo, determinar las fallas que conlleven al desgaste prematuro de las mismas.

LIMITACIONES

- ✚ Debido a la política de privacidad de la empresa, la información de nombres de herramientas, estudios consultados y otros particulares que la empresa considere, serán modificadas para fines de publicación del presente trabajo.
- ✚ La demanda de herramientas necesarias para brindar los servicios requeridos en el mercado actual representa una limitación a la hora de estudiar y analizar en detalle ejemplares actualmente operativos.



CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

Los parámetros contextuales y fundamentales de esta investigación, toman en consideración una serie de bases teóricas a partir de las cuales se desarrollaron los temas relacionados al desempeño de motores de fondo en operaciones de perforación direccional y mantenimiento de los mismos debido al desgaste producto de dicha actividad.

PERFORACIÓN DIRECCIONAL

Experiencias provenientes de desviaciones fortuitas de hoyos en perforación son la base de la tecnología de perforación direccional, definida como la ciencia y arte de dirigir un pozo a través de una trayectoria predefinida desde un punto de partida hasta un punto de llegada ^[6], en el contexto de la investigación el punto de inicio se encuentra localizado directamente debajo de la mesa rotaria y el punto final en un objetivo subterráneo identificado como productivo de hidrocarburo.

En la actualidad, dicha actividad se lleva a cabo a través de la técnica de perforación rotatoria, por tanto es necesario lograr un movimiento de rotación en la mecha para avanzar a través de las formaciones mediante el uso de registros electrónicos y herramientas de medición incorporadas al ensamblaje de fondo. Las modalidades de Rotación y Deslizamiento permiten conseguir ese objetivo, en la primera la totalidad de la sarta de perforación es rotada desde superficie y en la segunda solo se induce el movimiento deseado a la mecha a través del empleo de motores de fondo que permiten el direccionamiento del pozo a través de una trayectoria previamente definida en el plan de perforación.

Aplicaciones ^[6]

Los pozos direccionales tienen diversas razones de existencia y son utilizados comúnmente para los fines expuestos a continuación.

+ Perforación en Localizaciones Inaccesibles:

La exploración o desarrollo de zonas ubicadas bajo áreas en donde existan instalaciones, edificaciones, zonas urbanas, comunidades o impedimentos naturales requieren la perforación direccional.

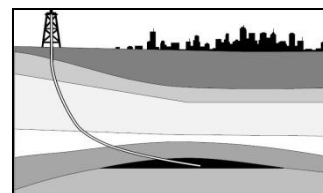


Figura 1. Zona Difícil ^[5]

+ Evitar Perforación de Domos de Sal:

Condiciones operacionales en actividades de perforación representan una limitación a la hora de atravesar domos salinos, por lo cual se recurre a pozos direccionales para bordear dicha estructura y llegar al objetivo.

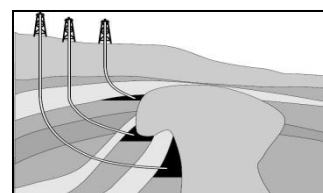


Figura 2. Domo de Sal ^[5]

+ Perforación por Macolla:

La reducción de costos operacionales y de instalaciones se puede lograr llevando a cabo la perforación de pozos múltiples desde una misma plataforma o macolla.

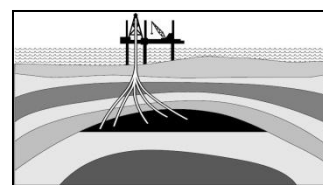


Figura 3. Plataforma ^[5]

+ Perforación de Pozos de Alivio:

La necesidad de controlar presiones referidas a un pozo en reventón fundamenta la perforación de un pozo contiguo. Se busca drenar la zona de alta presión para aliviar el pozo.

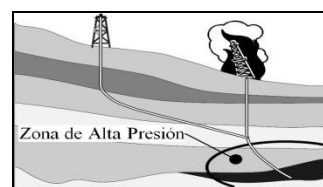


Figura 4. Alivio ^[5]

+ Desviación de un Hoyo ya Perforado:

La desviación de un hoyo previamente perforado o *sidetrack* requiere de la perforación direccional para lograr construir el ángulo determinado para la nueva sección.

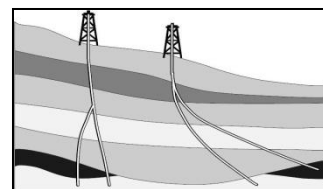


Figura 5. Sidetrack ^[5]

Control de Desviación:

En algunos casos en los cuales la trayectoria de un pozo vertical se desvía naturalmente se opta por el direccionamiento del mismo para retomar la orientación deseada.

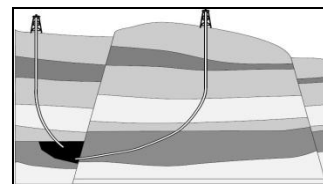


Figura 6. Desviación ^[5]

Métodos de Recuperación Mejorada:

Las técnicas de recuperación mejorada requieren, por diseño, de pozos horizontales. Generalmente son aplicadas en reservorios de crudos pesados como los presentes en la FPO

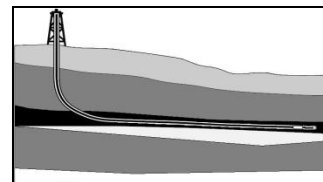


Figura 7. Navegación ^[5]

Motivos Económicos:

En yacimientos cercanos a las costas se opta por la perforación direccional con el fin de perforar desde instalaciones en tierra, esto debido a los mayores costos relacionados a la perforación costa afuera.

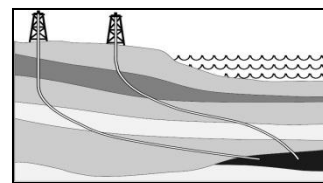


Figura 8. Costa Afuera ^[5]

Tipos de Pozos Direccionales ^[6]

Uno de los factores más importantes envueltos en la perforación direccional es el ángulo de inclinación. A continuación se expone la clasificación de pozos direccionales según dicho factor.

Tipo Tangencial:

En este tipo de pozo la desviación requerida generalmente es moderada y se alcanza a profundidades relativamente someras, manteniéndose constante hasta el objetivo. Por esto la configuración de la curva es sencilla a lo largo de un rumbo fijo, presentando la ventaja de menor riesgo de pega de la sarta de perforación.

Tipo “J”:

Los pozos tipo “J” son similares a los tipo tangencial, diferenciándose de ellos por comenzar su desviación a profundidades mayores y con ángulos



relativamente altos contruidos por incremento constante en toda la sección hasta llegar al punto final.

 En Forma de “S”:

Su nombre se debe a la trayectoria que describe el pozo que luego del KOP comienza con una zona de construcción de ángulo seguida por una de mantenimiento o tangencial y finaliza con una de disminución. Las variantes de este tipo de configuración se diferencian por la zona final del pozo en la cual el ángulo de inclinación disminuye hasta llegar a 0° (Tipo “S”) o hasta llegar a un ángulo mayor a 0° que se mantendrá hasta el objetivo (Tipo “S” Especial).

 Inclinado o de Alto Ángulo:

Son pozos perforados con taladros especiales inclinados cuya cabria puede ajustarse entre 90° y 45° respecto a la horizontal, en los cuales se inicia la operación con un ángulo determinado desde superficie que se mantiene hasta llegar al *target*.

 Horizontales ^[6]:

Se consideran pozos horizontales aquellos que son perforados paralelos a los estratos de un yacimiento o poseen un ángulo de inclinación mayor a 86° . Son los más empleados en la actualidad en la FPO y pueden ser clasificados según su radio de curvatura en 4 tipos: ultracortos, cortos, medios y largos. Cada uno con características específicas de radio de giro, tasa de construcción de ángulo y longitud de sección horizontal. Los de menor radio de curvatura (ultracortos) presentan radio de giro entre 1 y 2 pies, tasa de construcción de 45° a 60° por cada pie y una sección horizontal de hasta 200 pies. Por su parte los de mayor radio de curvatura (largos) son los más usados en el área de estudio de la investigación y poseen radio de giro de 600 a 2000 pies, tasa de construcción de ángulo de 1° a 6° por cada 100 pies y finalmente longitudes que parten desde los 1000 pies alcanzando extensiones hasta de 6000 pies de sección horizontal.

Reentradas:

Consisten en perforaciones realizadas a partir de pozos ya existentes, en las cuales se usa parte de una sección vertical o direccional previamente perforada para construir un nuevo hoyo.

Multilaterales:

Al igual que las reentradas este tipo de pozos parte de un hoyo primario, conformado en este caso por uno o más hoyos secundarios usados para reducir el número de pozos perforados y optimizar la producción de una zona prospectiva.

Secciones de Pozos Direccionales

Las configuraciones anteriormente descritas y mostradas en la Figura 9, se componen y delimitan por diversas secciones, identificando la de construcción de ángulo como aquella comprendida entre el KOP y el EOB, la sección tangencial como la caracterizada por el mantenimiento del ángulo de inclinación, la sección de caída como la delimitada por el *Start of Drop* y el EOD y finalmente la sección horizontal como la definida entre el EOB y el Target para efectos del presente proyecto.

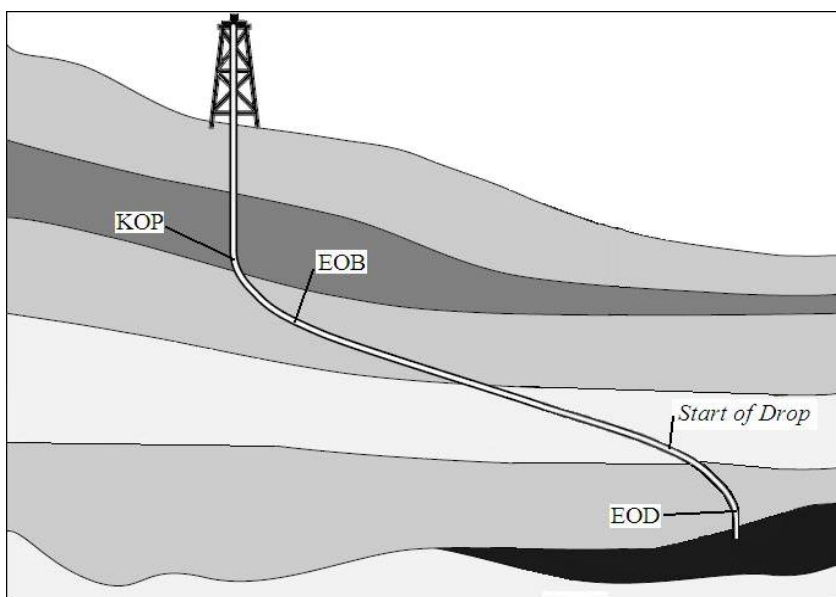


Figura 9. Secciones de Pozos Direccionales ^[5]. Modificado por Eduardo Morante



ENSAMBLAJE DE FONDO O *BOTTOM HOLE ASSEMBLY* (BHA)

Es de vital importancia para el desarrollo exitoso de la perforación direccional, el apropiado diseño del ensamblaje de fondo, por sus siglas en inglés, la elección correcta de este componente de la sarta de permitirá llevar a cabo el trabajo a una tasa de penetración óptima y con el mayor apego posible al plan de perforación.

Componentes Posibles de Ensamblaje de Fondo

Los componentes presentes en el ensamblaje de fondo son variables y dependen de los requerimientos del pozo en determinado momento de la perforación, a fin de cumplir con funciones específicas como proporcionar peso a la mecha, proteger a la tubería de pandeo y torsión, reducir las *patas de perro*, reducir daños a equipos por vibraciones y construir el pozo de acuerdo a su geometría ^[4], se cuenta con los instrumentos nombrados a continuación:

- + Tubería.
- + Tubería Compresiva.
- + Estabilizador.
- + Monel.
- + Tubería Pesada o *Heavy Weight*.
- + Martillo.
- + Unión Flexible.
- + Ensanchador de Subsuelo.
- + Turbina de Perforación.
- + Reductor de Diámetro.
- + Herramienta de Medición o *Measuring While Drilling* (MWD).
- + Herramienta de Muestreo o *Logging While Drilling* (LWD).
- + Motor de Fondo.
- + Mecha.



Arreglos de Ensamblajes de Fondo.

El diseño o arreglo de los ensamblajes de fondo varía de acuerdo a las condiciones del pozo a perforar, es por esto que se pueden presentar diversos escenarios en cuanto a los componentes requeridos para el trabajo, a continuación se describen los tipos más usados en la actualidad tomando en cuenta su función respecto a la sección del pozo en trabajo.

- ✚ **Ensamblaje de Estabilizador Único:** el punto de tangencia entre la sarta y la pared del hoyo puede ser controlado a través del uso de estabilizadores, en el caso de emplear un solo estabilizador se debe tomar en cuenta que su posición respecto a la mecha, además de cambiar el punto de tangencia, reduce la fuerza negativa resultante de la aplicación de peso sobre la sarta orientándola en sentido positivo o *high side* haciendo posible la construcción de ángulo del pozo. Si bien este arreglo no es el más usado, es importante para fines de comprensión del escenario descrito ^[5].
- ✚ **Ensamblaje de Dos Estabilizadores:** el uso de dos estabilizadores controla más efectivamente el punto de tangencia, siendo un factor clave la distancia entre ambos estabilizadores para efectos de construcción o caída de ángulo debido a la fuerza positiva o negativa generada por el peso sobre la mecha, en este caso el segundo estabilizador disminuye el efecto de construcción de ángulo aumentando la fuerza negativa ^[5].
- ✚ **Ensamblaje de Estabilizadores Múltiples:** si bien se considera un ensamblaje múltiple a todo aquel que emplee más de dos estabilizadores, trabajar con tres permite, obtener una mejor respuesta en la construcción de ángulo del pozo y control de fuerza negativa por tanto es el arreglo recomendado para secciones de construcción y de mantenimiento de ángulo. Los arreglos más comunes de este tipo constan con la presencia de un estabilizador de bajo calibre cerca de la mecha para el caso de construcción o como segundo estabilizador para el caso de mantenimiento de la tangente.
- ✚ **Ensamblaje Combinado de Construcción y Mantenimiento de Ángulo:** a la hora de minimizar los viajes referidos al cambio o ajuste del BHA, se busca

conformar el ensamblaje más versátil que opere de forma adecuada tanto en secciones de construcción de ángulo como en mantenimiento de la tangente, en estos casos se suelen emplear motores de fondo que apliquen técnicas de perforación en rotación y deslizamiento para mantener y construir ángulo respectivamente apoyados en un estabilizador integrado.

✚ **Ensamblaje Tipo Péndulo:** en algunos pozos, según lo requiera el plan de perforación es necesario disminuir el Angulo de inclinación del hoyo, por tanto se emplean ensamblajes adecuados para dicha operación, el tipo péndulo es el más común. Consiste en la ubicación de un estabilizador alejado de la mecha para generar un efecto de péndulo en la tubería y así orientarla para la reducción de la inclinación.

La Figura 10 presenta de izquierda a derecha la configuración tipo para sartas de construcción, mantenimiento y reducción de ángulo respectivamente.

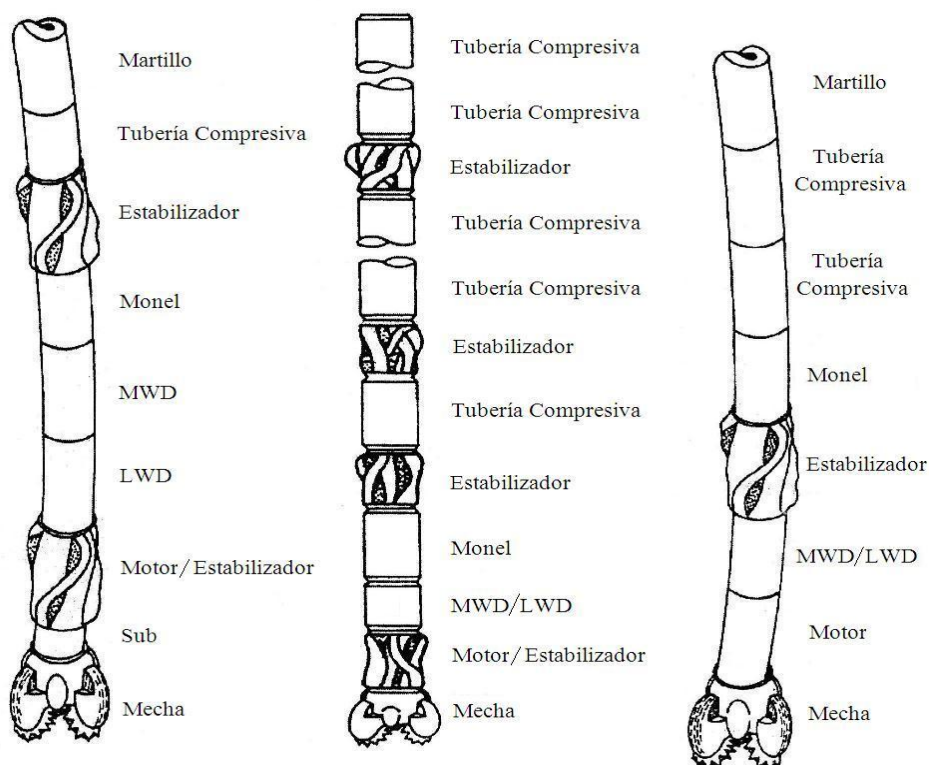


Figura 10. Ensamblajes de Fondo Para Construcción, Mantenimiento y Disminución de Ángulo ^[6]. Modificado por Eduardo Morante.



Cabe destacar que los ensamblajes de fondo descritos anteriormente son solo una muestra de la diversidad de arreglos que pueden engranarse, evidenciando con todas sus funciones la importancia de su diseño óptimo para la perforación direccional. En el caso de la perforación de secciones intermedias en el campo Suata Principal, la configuración comúnmente empleada es la de un solo estabilizador cerca de la mecha integrado en el motor de fondo para construir el ángulo requerido.

Problemas de Ensamblaje de Fondo ^{[5][6]}

+ Efectos de la Formación

A medida que avanza la perforación, la sarta va atravesando diversas formaciones con características específicas, características que pueden generar una respuesta inesperada del BHA. Estos inconvenientes asociados a cambios en la formación perforada, inclinación y buzamiento de los estratos deben ser prevenidos y mitigados a través de un estudio previo de dichos factores y la revisión del estado de los componentes del ensamblaje al terminar cada corrida, de este modo se puede generar una base de datos completa en la cual el ingeniero se apoye a la hora de diseñar el BHA a emplear en la operación.

+ Mechas Desgastadas

El uso continuo y la directa exposición de la mecha a la hora de llevar a cabo la operación de perforación es irremediable, por ende este componente es objeto de gran desgaste, debido a escenarios como intercalaciones de capas duras en formaciones suaves o la ruptura de tapones de cemento. En ciertas etapas de la operación la mecha puede sufrir embolamiento, lo cual genera problemas en la orientación del pozo que se evidencian en la inadecuada geometría de los mismos. Este tipo de problema debe ser tratado con un buen conocimiento geológico detallando las formaciones a penetrar y revisando el estado de la mecha al culminar cada corrida.

+ Sidetrack Accidental

Un inconveniente común en la perforación direccional está relacionado a formaciones suaves en las cuales se debe operar de manera cautelosa al



alcanzar el KOP del pozo, dicha precaución debe ser máxima si se continua la perforación con un BHA de estabilizadores múltiples usando una tasa de flujo alta y rotando lo menos posible la sarta, es decir, utilizando la técnica de desplazamiento al atravesar esa profundidad crítica siguiendo la trayectoria deseada y evitando incurrir en un *sidetrack* accidental perforando en la orientación inadecuada,

Mechas Descalibradas

El estrangulamiento de la mecha es un problema común en formaciones duras, esto es ocasionado al continuar una perforación con mecha nueva y tratar de llevarla a fondo sin repasar el hoyo. El repaso del hoyo es vital para que la sarta tome peso y la mecha se ajuste a las condiciones en las cuales debe operar.

Pega Diferencial

En perforaciones sobrebalance en donde la presión ejercida sobre la pared del hoyo es superior a su contraparte, es recomendado utilizar un BHA con estabilizadores múltiples, de este modo se minimiza el punto de tangencia y se evita este problema, además se debe acortar el tiempo de toma de mediciones en fondo previas a las conexiones.

Parámetros de Perforación

Es considerado el problema más crítico referido al ensamblaje de fondo, ya que está relacionado a la toma de decisiones y dirección del pozo por parte del ingeniero direccional. Parámetros como revoluciones por minuto (RPM) de la sarta, peso sobre la mecha y torque reactivo de la sarta deben ser tomados en cuenta ya que al utilizar las técnicas de perforación por rotación o deslizamiento, cada uno de ellos debe variar y en algunos casos esto puede ser perjudicial para la operación pues no se produce la respuesta esperada. Todo esto debido a efectos como el comportamiento de la sarta de perforación al alcanzar cierto peso sobre la mecha o el torque reactivo en formaciones duras.



Hidráulica

El diseño de un programa hidráulico es uno de los aspectos más importantes durante la perforación de un pozo, ya que permite lograr un equilibrio entre la presión de bombeo, la densidad equivalente de circulación, el control y limpieza del pozo y la caída de presión a través de la mecha. Al perderse dicho equilibrio pueden ocurrir problemas operativos puesto que si la potencia e impacto hidráulico son muy elevados, la dirección del pozo cambiaría drásticamente por la pérdida del ángulo construido. En caso contrario, si existe una hidráulica menor a la requerida, no será posible la limpieza del hoyo y podrían suscitarse inconvenientes como atascamiento, incremento de la torsión y el arrastre de la mecha y disminución de la tasa de penetración.

MOTORES DE FONDO

En la perforación direccional, el uso de motores de fondo es vital para la consecución del objetivo, siendo estos los principales responsables de transmitir la energía necesaria a la mecha para desarrollar dicha operación, eliminando la rotación completa de la tubería mediante fuerzas de torsión en el fondo del pozo e induciendo el movimiento de la mecha a través de un sistema impulsado por el lodo. Existen dos tipos principales de motores de fondo, los tipo turbina y los de desplazamiento positivo, en el presente trabajo se hará una breve introducción a ambos pero serán objeto de evaluación los motores de desplazamiento positivo utilizados para la perforación de la zona de construcción de ángulo en el campo Suata Principal.

Tipos de Motores

Motor Tipo Turbina ^[6]

Consiste en una unidad axial de varias etapas accionada por el fluido de perforación que en la actualidad es usado para operaciones específicas, dejando su lugar a los motores de desplazamiento positivo. Las actividades en las cuales son empleados están referidas a formaciones de elevada dureza.

✚ Motor de Desplazamiento Positivo (PDM) ^{[4][5][6]}

Consta de un motor de dos etapas, con forma helicoidal compuesto por un rotor que gira en torno a un estator fijo, de este modo se produce el desplazamiento positivo o *positive displacement* por sus siglas en inglés, que refiere su nombre. Un conjunto de bielas, cojinetes, ejes y válvula de descarga conforman el sistema usado por este tipo de motores para la perforación direccional, aportando energía a la mecha en técnicas de rotación y deslizamiento, en donde aumenta la tasa de penetración funcionando como una herramienta de desempeño de perforación vertical y orienta al pozo en una dirección definida en cada caso.

Los principios descritos anteriormente son mostrados en la Figura 11 en la cual tanto el motor tipo turbina como el de desplazamiento positivo son presentados esquemáticamente.

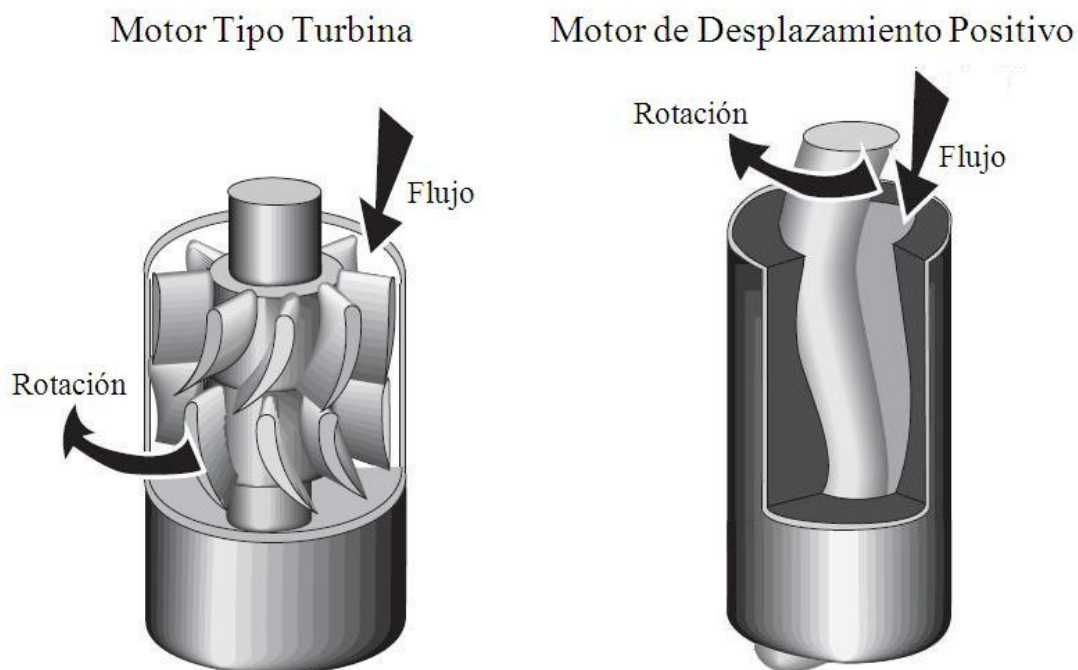


Figura 11. Principio Operacional de Motores Tipo Turbina y PDM ^[5]. Modificado
Por Eduardo Morante.

Diseño Básico ^{[7][8]}

Los PDM dirigibles tratados en la investigación constan de 6 secciones principales encargadas de transmitir del poder suficiente a la broca para la perforación y de controlar los parámetros de orientación del pozo. Describiendo en cada caso su función, las secciones mencionadas se presentan a continuación.

Top Sub o Float Sub

La existencia de esta sección se debe además del requerimiento de cambio de diámetro entre el estator y el resto del ensamblaje de fondo, al ensamblaje de un sistema de seguridad que impide el paso de fluido proveniente del pozo a la sarta. En el caso del cambio de diámetro este que puede lograrse a través de diversas opciones dependiendo de las condiciones de la perforación. En operaciones en formaciones suaves y sin complicaciones estimadas se emplea un *crossover* simple, es decir una tubería con cambio de diámetro entre sus extremos, mientras que para formaciones duras se recomienda el uso de *flex subs* que son tuberías con mayor flexibilidad diseñadas para condiciones más demandantes como perforaciones de alta tasa de construcción de ángulo. Existen además componentes denominados válvula de pistón (Figura 12) en los *top subs* y *flat valve* en los *float subs* que es incorporado en esta sección para impedir el paso de fluido del pozo a la sarta mientras la misma hace viajes de salida y bajada.

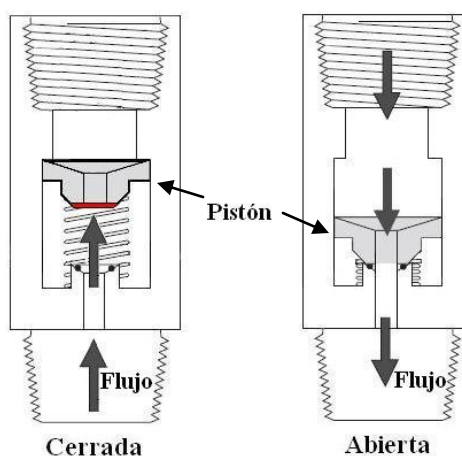


Figura 12. Ensamblaje de Válvula de Pistón ^[5]. Modificado por Eduardo Morante.

✚ Sección de Poder

La conversión de energía hidráulica proporcionada por el flujo del lodo a través de cavidades progresivas en energía mecánica suministrada a la mecha en forma de torque es llevada a cabo en esta sección. El sistema está compuesto por una aleación de cromo y acero de forma helicoidal llamada rotor y un molde de acero denominado estator cubierto por un elastómero de goma. El rotor posee un lóbulo menos que el estator, lo cual hace posible la presencia de cavidades progresivas a lo largo del motor, dichas cavidades representan el espacio a través del cual fluye el lodo accionando el movimiento del rotor en un desplazamiento positivo a través del estator (de allí el nombre de este tipo de motores), generando así el torque requerido por la mecha para la perforación

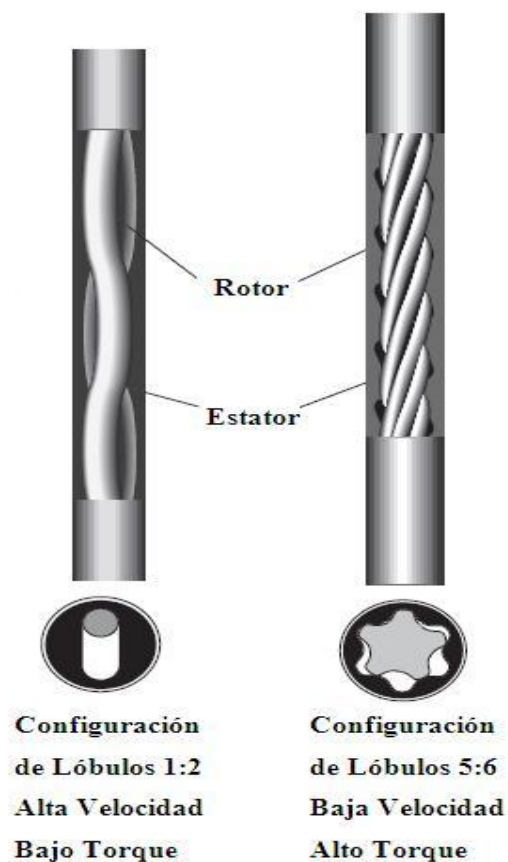


Figura 13. Configuración de Lóbulos Rotor/Estator ^[5]. Modificado por
Eduardo Morante

Cada espiral completa del rotor es denominada etapa y está relacionada al torque proporcionado por el motor y a la velocidad del mismo, en la Figura 13 se muestran dos configuraciones rotor/estator en las cuales se evidencia la mayor extensión o área que el fluido debe cubrir para accionar el rotor a medida que aumentan los lóbulos del mismo. Mientras que en la Figura 14 se establece la relación entre el número de etapas, torque suministrado a la mecha y velocidad del motor según el diferencial de presión al tocar fondo y al tener la sarta levantada, destacando que a mayor número de etapas, mayor será el área a cubrir por el fluido y por ende aumentará el torque y disminuirá la velocidad del sistema.

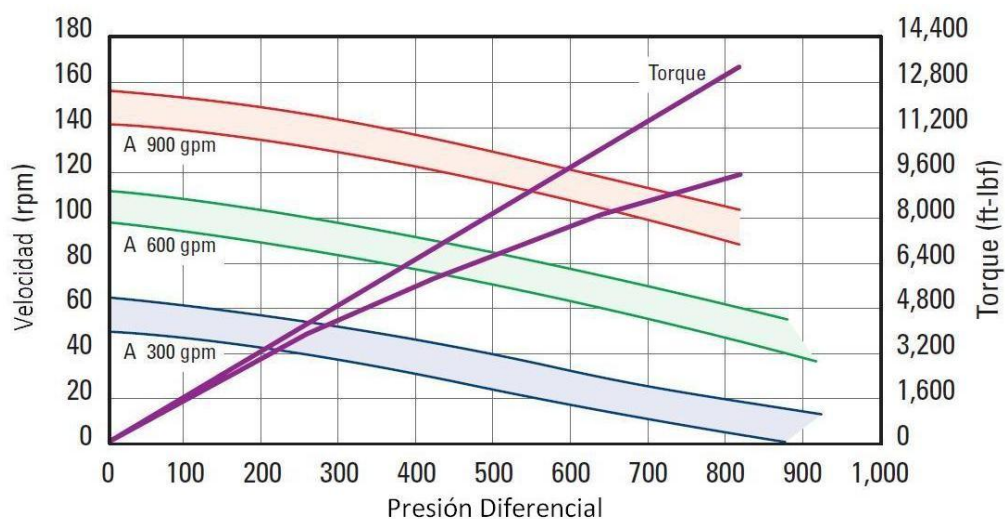


Figura 14. Torque y Velocidad vs Presión Diferencial ^[5]. Modificado por Eduardo Morante.

El diseño de la sección de poder está sujeto a diversas consideraciones, entre las cuales resaltan la temperatura de operación, características del elastómero, rotor y estator, y el ajuste de interferencia.

La temperatura de operación es factor principal en el desempeño del motor de fondo puesto que elementos que lo componen son sensibles a la misma, por lo cual debe ser tomada en cuenta a la hora de elegir el elastómero del estator, ya

que el mismo tiene una temperatura máxima de operación y es causa común de fallas en el sistema.

Por lo antes descrito, el elastómero debe ser objeto de especial atención a la hora de ser ensamblado en el motor, ya que además de fallas por temperatura relacionadas al punto de anilina (en el caso de emplear fluidos de perforación base aceite) o histéresis por la flexión constante mostrada en la Figura 15 referida a choques con los lóbulos del rotor, es propenso a sufrir fatiga por la misma causa y degradación química por la presencia de aromáticos.

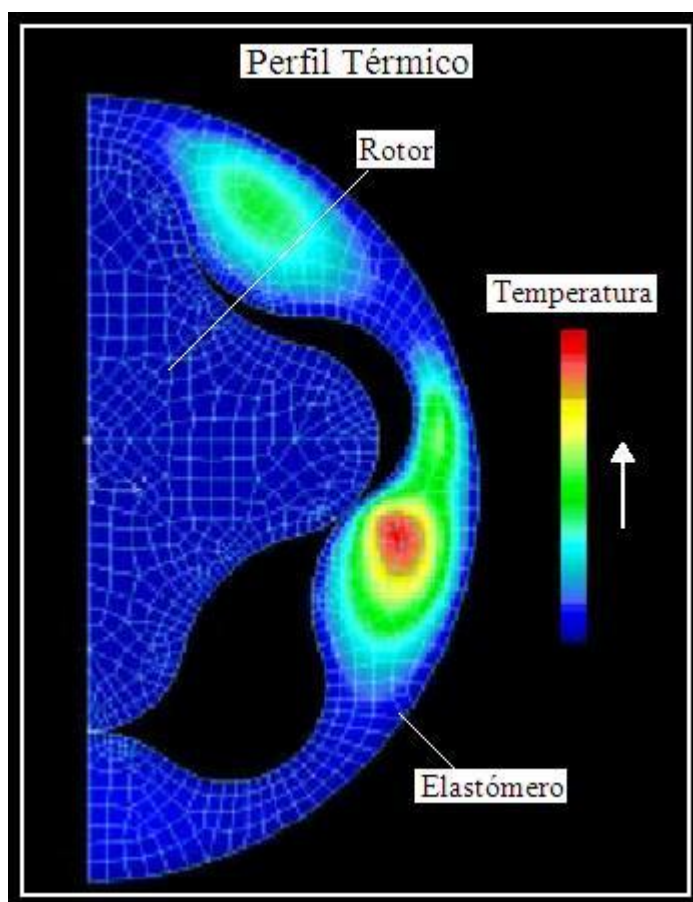


Figura 15. Perfil Térmico – Histéresis del Elastómero ^[7]. Modificado por Eduardo Morante.

En cuanto a las características del rotor, son determinadas por las condiciones de operación ya que existe una gama de revestimientos para este componente

que se ajustan a situaciones particulares de perforación. Se hace conveniente entonces tomar en cuenta la corrosión y erosión a la cual estará expuesto el equipo, la presión y temperatura de operación y las experiencias de campo recogidas en corridas anteriores, todo esto para seleccionar el material de revestimiento más conveniente.

Por su parte, la elección del estator busca prevenir daños mecánicos a la herramienta, ya que la fragmentación y el desgaste son los principales problemas referidos a la sección de poder del motor, ambos causados por la fricción producto de la rotación del rotor y fallas en el elastómero.

Aunado a los particulares anteriores, el ajuste de interferencia es un elemento importante a considerar, puesto que determina la vida óptima del estator a una temperatura específica en el fondo del pozo. Este elemento, representa la compresión o ajuste existente entre el rotor y el elastómero del estator, compresión necesaria para aislar las cavidades generadas en el sistema y asegurar el desempeño óptimo de la sección. La selección del ajuste de interferencia es realizada basándose en datos de prueba, de campo y experiencias en perforaciones, generando un valor que tome en cuenta la compresión ejercida por la presión hidrostática ejercida por el lodo y la dilatación generada por la temperatura del mismo en el elastómero. La Figura 16 presenta los escenarios posibles de ajuste de interferencia entre el rotor y el estator en superficie.

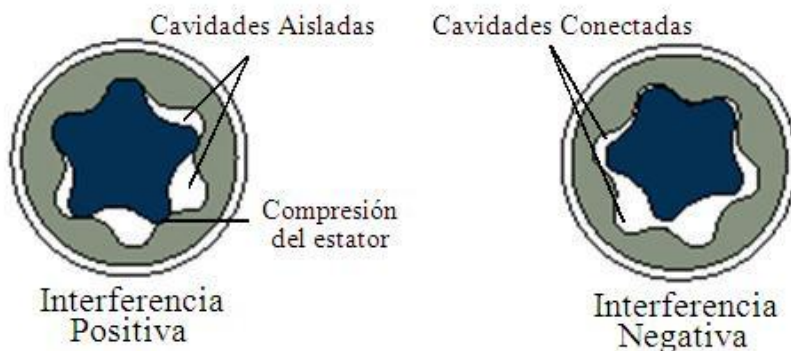


Figura 16. Ajuste de Interferencia Rotor/Estator ^[7]. Modificado por Eduardo Morante

La diferencia entre el ajuste positivo y el negativo radica en las condiciones de fondo, ya que en algunos casos la dilatación del elastómero demanda una configuración negativa para poder operar adecuadamente en la profundidad deseada.

Ensamblaje de Transmisión ^[5]

Esta sección del motor, como su nombre lo dice, es la encargada de transmitir el torque y el empuje proporcionado por la sección de poder al eje de dirección y ensamblaje de rodamientos a través de juntas universales que transforman el movimiento excéntrico del rotor en movimiento concéntrico, la Figura 17 esquematiza este proceso en forma explícita.

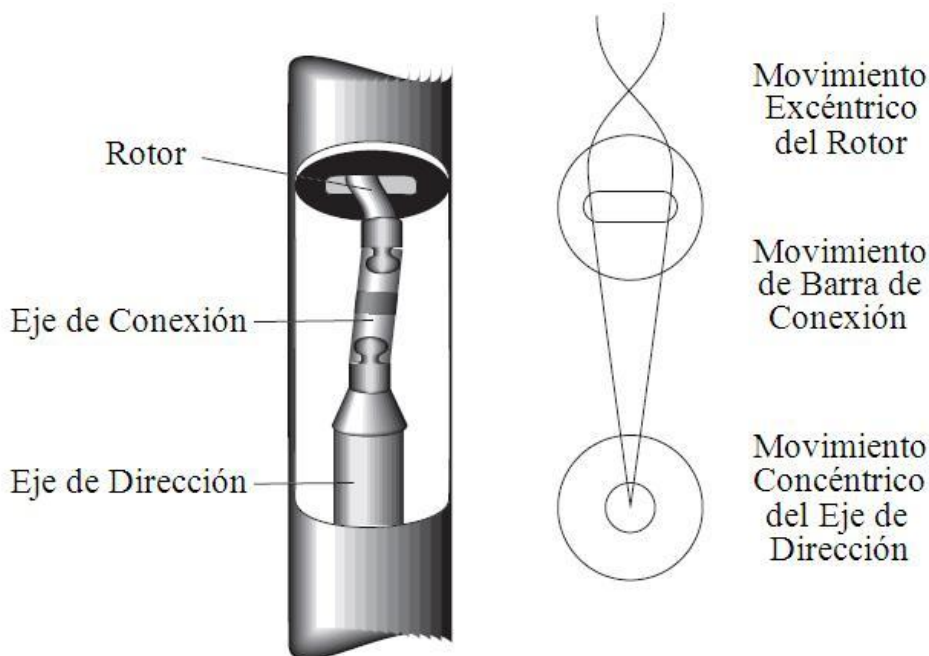


Figura 17. Ensamblaje de Transmisión Típico de PDM ^[5]. Modificado por
Eduardo Morante

Bend Housing

La perforación direccional se basa en la desviación del pozo con un ángulo y orientación determinada intencionalmente por el ingeniero a cargo de la

operación, el *Bend Housing* ajustable ensamblado en los motores de fondo es el elemento que permite llevar a cabo dicho direccionamiento de forma adecuada, una articulación que desvía la trayectoria de la tubería entre 0 y 4 grados (para el caso de los motores a evaluar) posiciona la parte inferior del motor en la dirección requerida para la operación como muestra la Figura 18.



Figura 18. Esquema Básico Externo de Motor de Fondo ^[7]. Modificado por Eduardo Morante.

✚ Sección de Rodamientos

El empuje de perforación y poder rotacional que la sección de transmisión proporciona es llevado a la mecha a través del ensamblaje de rodamientos, conformada básicamente por los elementos representados en la Figura 19.

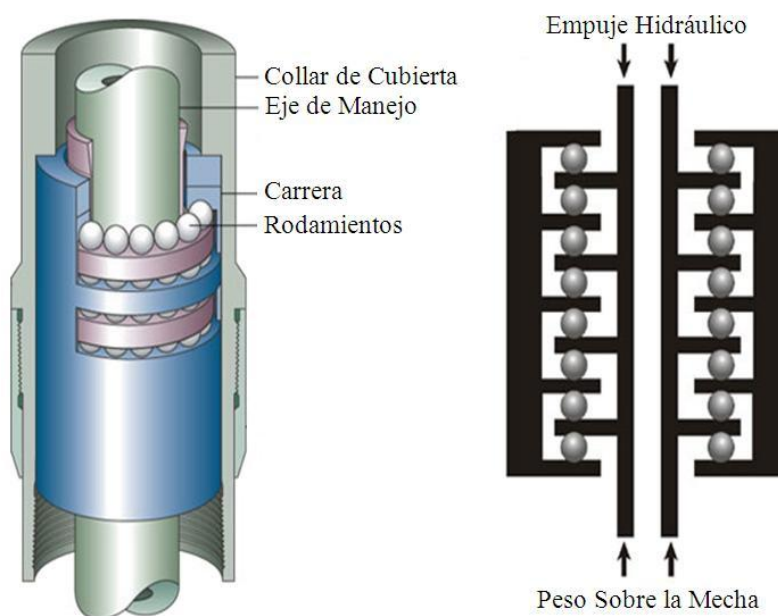


Figura 19. Sección de Rodamientos ^[7]. Modificado por Eduardo Morante.



Los rodamientos de empuje fuera de fondo generalmente presentan diseño esférico y están encargados de soportar el empuje hidráulico y peso del rotor, barra de conexión, eje de dirección y mecha cuando el motor está rotando fuera de fondo.

Por su parte los rodamientos de soporte radial tienen un diseño tipo camisa recubierta de carburo de tungsteno y están encargados de proporcionar soporte radial al eje de dirección. Además restringen el flujo de lodo a través de la sección, redireccionando un porcentaje del mismo para lubricar los rodamientos como tal, dicho porcentaje es determinado por la condición de los mismos y la caída de presión en la mecha. Existen rodamientos radiales alternativos de mayor costo con un diseño sellado que permiten prescindir de la lubricación proporcionada por el lodo a través de un sistema de llenado con aceite que mantiene el buen desempeño de los mismos. En el presente trabajo se evaluarán los descritos en primer lugar puesto que son los que conforman el ensamblaje de los motores a estudiar.

Finalmente los rodamientos de empuje en fondo son los encargados de transmitir la carga de la cubierta no rotacional de la tubería del motor a la mecha a través de su diseño esférico, tomando el peso o la carga referida mientras se perfora y transmitiéndolo al *bit box* rotacional conectado a la mecha.

Eje de Manejo

Este componente es el encargado de mantener la dirección determinada por el *bend housing* a través de su estructura de acero apoyada dentro del sistema de rodamientos descrito anteriormente.

Bit Sub

También llamado *bit box* este elemento conocido por ser el único componente externo rotacional del motor posee conexiones API (*American Petroleum Institute*) estandarizadas para las mechas a emplear en la operación de perforación y representa el final de la extensión de la herramienta.



Especificaciones

Especificaciones Físicas y Operativas

Cada modelo motor de fondo posee una serie de características que lo diferencian del resto. De acuerdo al diámetro de su cuerpo, etapas de su rotor y relación rotor/estator existen determinadas especificaciones físicas y operativas a considerar para el óptimo desempeño durante la perforación. En el TEG se tomaran en cuenta las especificaciones propias del modelo de motor estudiado presentadas en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros Físicos y Operativos de Motores de Fondo Estudiados.

Parámetro	Valor
Diámetro Externo (pulgadas)	8.25
Relación Rotor/Estator	7/8
Etapas	4
Lubricación de Rodamientos	Por Lodo
Flujo (GPM)	300 – 900
Revoluciones por Galón (RPG)	0.16
Velocidad (RPM)	45 – 145
Torque a Máxima Potencia (pies-lb)	13200
Máxima Potencia (HP)	190
Longitud (pies)	27.60
Longitud <i>Bit Box – Bend Housing</i> (pies)	7.06
Longitud Estabilizador – <i>Bit Box</i> (pies)	2.01
Peso (lbm)	4020
Diámetro del Hoyo (pulgadas)	$9^{7/8} - 14^{3/4}$
Máxima Tensión Operativa (lbf)	219500
Máxima Tensión Absoluta (lbf)	754800
Máxima Tensión en <i>Motor Catcher</i> (lbf)	246000

✚ Torque de Conexiones y Armado

El cuerpo del motor esta ensamblado por varias partes conectadas entre sí, el tipo de conexiones y la magnitud del torque necesario para asegurar dichas uniones se expone en la Tabla 2.

Tabla 2. Torque Requerido Para Ensamblaje de Motor.

Componente	Conexión	Torque (pies-lbf)
Top/Float Sub	6 ^{5/8} API Regular	48000
Articulación del Bend Housing	Sin Rosca	35000
Camisa Estabilizadora	Rosca Especial	23000
Bit Box	6 ^{5/8} API Regular	28000 – 32000

✚ Curva de Poder del Motor

Las curvas de poder representan las características o respuesta esperada de la sección de poder de motores de fondo bajo condiciones de prueba en superficie. Al momento de la operación, dichas curvas pueden variar debido a efectos de presión, temperatura, dinámica del BHA, geometría del hoyo y propiedades químicas del lodo produciendo una reducción en el torque y potencia de la herramienta para cierto diferencial de presión. La Figura 20 muestra la curva de poder de un motor de 4 etapas y relación rotor/estator 7/8.

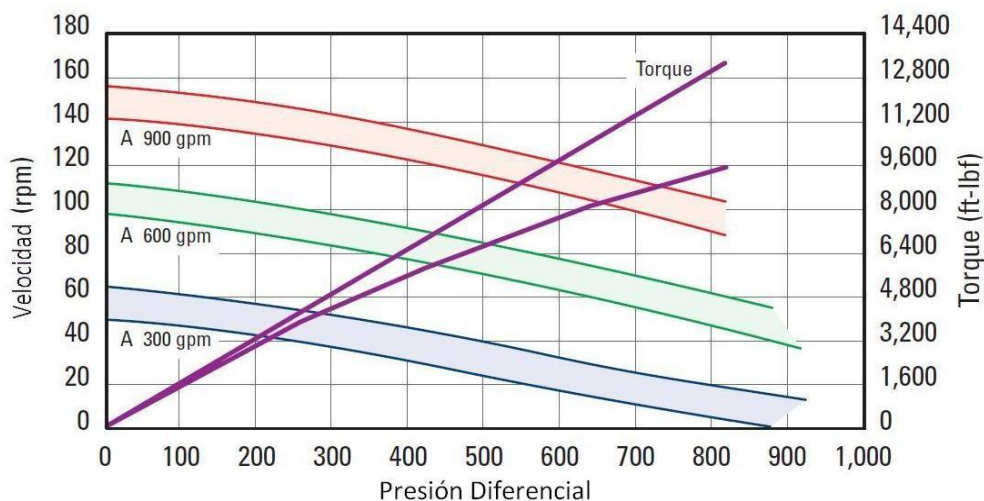


Figura 20. Curva de Poder de Motor de Fondo Estudiado.



Los parámetros envueltos en la curva de poder son el torque operacional y la velocidad de rotación, relacionados a diversas presiones diferenciales y determinados para caudales de flujo mínimo, medio y máximo según especificaciones de la herramienta. A medida que el torque operativo incrementa, la sección de poder genera una mayor caída de presión, esta relación idealmente es lineal pero en condiciones reales se produce una desviación de dicha tendencia debido a los efectos mencionados con anterioridad. Por su parte la velocidad de la mecha es determinada por el caudal de flujo a través de la herramienta, ya que mientras mayor es dicho flujo, existe una mayor energía hidráulica que finalmente se traduce en mayor potencia mecánica entregada a la mecha.

Material de Pérdida de Circulación y Aditivos del Lodo

Al recurrir al bombeo de material de pérdida de circulación se pueden generar dos problemas en el motor por el paso de dicho material a través de él, la reducción en la lubricación del sistema de rodamientos y el desgaste del estator. El primero es causado por taponamiento, generalmente en la parte superior de los rodamientos radiales y el segundo debido a la abrasión ocasionada por el material como tal. Estos efectos pueden ser reducidos, mas no eliminados, a través de la toma de precauciones tales como el bombeo progresivo del material para evitar la acumulación de un tapón del mismo y la reducción del uso de micas de cuarzo y carbonato de calcio para minimizar la abrasión del estator.

Por otra parte el fluido de perforación empleado es factor importante en el desempeño de los motores de fondo, ya que puede generar desgaste excesivo en la sección de rodamientos si contiene una concentración de arena mayor al 2% o si se usa hematita o sustancias similares para incrementar la densidad del fluido, en ambos casos se produce el desgaste por abrasión.

Limitaciones de RPM

Los límites de revoluciones del motor están relacionados a dos factores fundamentales: la curvatura del hoyo y el ángulo del *bend housing* ajustable.

Una marcada curvatura del hoyo representa altos esfuerzos cíclicos aplicados sobre el cuerpo del motor cuando está rotando, por lo cual se recomienda reducir el número de RPM para minimizar el impacto sobre la herramienta.

Por su parte, el ángulo del *bend housing* influye también en los límites de RPM ya que a mayor ángulo, mayor esfuerzo cíclico inducido al motor y menor el límite aceptable de revoluciones del mismo.

Al hablar de limitación de revoluciones de una herramienta se infiere el uso de la técnica de perforación por rotación de la sarta, lo cual hace necesario el análisis de las diversas secciones del pozo a perforar y el impacto que cada una genera. La construcción y mantenimiento de ángulo son las principales zonas a considerar, teniendo en cuenta que el cambio de perforación por deslizamiento a perforación por rotación representa la existencia de una zona denominada “de transición” la cual posee una especificación de RPM propia al igual que las secciones antes mencionadas. El impacto generado por cada una de ellas es mostrado en la Figura 21.

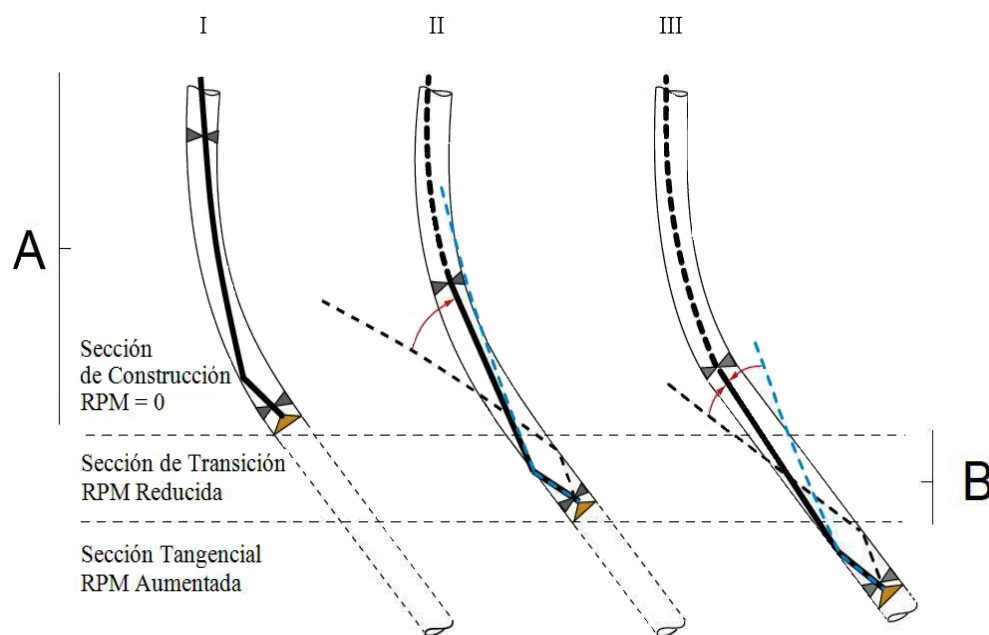


Figura 21. Impacto de Secciones del Pozo en Motores de Fondo ^[5].

Modificado por Eduardo Morante



Se considera el motor deslizando durante toda la longitud de la sección de construcción de ángulo (A) por lo cual no existen RPM del mismo y no se induce ningún esfuerzo. Al pasar a la sección de transición (B) se inicia la rotación de la herramienta y se le somete a esfuerzo por cada vuelta evidenciado por la posición supuesta del motor en línea segmentada despreciando el efecto de estabilizadores y paredes de hoyo. Dicho esfuerzo es mayor durante la transición (II) que en la sección tangencial (III) como ilustran las flechas rojas, por lo que el límite de RPM aumenta en magnitud en esta última.

El modelo de motor objeto de estudio presenta una limitación completa a la hora de perforar rotacionalmente, es decir, no se recomienda su rotación en el pozo debido al ángulo del *bend housing* que posee (1.83°) y el diámetro de hoyo en cuestión ($12^{1/4}$ "), sin embargo, existen recomendaciones operacionales para casos en los que la revolución del motor sea imperante, consideraciones como mantener el menor número de vueltas por minuto posible durante la operación, correr el motor con sensores de choques en tiempo real, monitorear el número de horas acumuladas para cada componente de la herramienta, incorporar un *top sub* flexible para reducir el impacto producido por la inclinación del *bend housing* y asegurar la presencia de un *motor catcher* en el ensamblaje deben ser tomadas en cuenta para mitigar los problemas relacionados a limitaciones de RPM.

Fluidos de Perforación

Los motores de fondo de desplazamiento positivo pueden ser operados con fluidos base agua o base aceite, sin embargo existen limitaciones relacionadas a su peso, contenido de arena, temperatura y contenido de sólidos.

Debido a la configuración interna del motor, el peso del lodo recomendado es menor a 17 lpg, ya que si este valor es excedido existe mayor probabilidad de taponamiento del sistema de rodamientos y de la sección de poder.



Por su parte, el contenido de arena y sólidos debe ser mantenido en el mínimo valor posible ya que producen problemas de abrasión y desgaste en la herramienta reduciendo hasta en un 50% su vida operativa.

Finalmente, el efecto de la temperatura debe ser tomado en cuenta ya que el elastómero del estator se expande a medida que esta aumenta, volviéndose crítico también el punto de anilina del fluido pues este podría generar desgaste de igual manera al elastómero.

Hidráulica

Al momento de diseñar el programa hidráulico para la perforación se deben realizar ciertas consideraciones referidas al ensamblaje de fondo empleado, específicamente en el caso de motores de fondo lubricados por lodo. Los aspectos claves a tomar en cuenta son el diferencial de presión, la caída de presión en la mecha, el balance del empuje y la capacidad del sistema de rodamientos.

La diferencia existente entre la presión operativa cuando la sarta está apoyada en fondo y cuando está fuera de fondo es definida como el diferencial de presión, factor generado por la aplicación de peso sobre la mecha que hace que la sección de poder genere cierta diferencia de presión traducida en torque del motor. Todo esto influye en la tasa de penetración o ROP (*Rate Of Penetration*), por sus siglas en inglés, por lo cual debe ser determinada la caída de presión específica para generar una ROP óptima sin obviar la limitante que representa la vida operativa de los componentes de la sección de poder del motor puesto que al generar un diferencial de presión muy alto por cada etapa del rotor se induce un esfuerzo sobre el elastómero que puede generar la histéresis del mismo.

Por otra parte, la caída de presión en la mecha es fundamental no solo para la perforación como tal sino para la lubricación de los rodamientos del motor. Esta diferencia de presión es originada por el área de flujo de las boquillas de la mecha y se determina a través de la siguiente expresión.

$$\Delta P_m = \frac{8,311 \cdot 10^{-5} \cdot \rho \cdot \text{GPM}^2}{C_d^2 \cdot \text{TFA}^2} \quad \text{Ecuación 1}$$

Como se puede notar en la Ecuación 1, la caída de presión en la mecha depende de la densidad del fluido de perforación en libras por galón (ρ), del flujo a través de la herramienta medido en galones por minuto (GPM), de un coeficiente de descarga adimensional (C_d) generalmente aproximado a 0,95 y del área de flujo de los chorros de la mecha en pulgadas cuadradas (TFA).

El programa de hidráulica se diseña principalmente para limpiar el hoyo y obtener una tasa de penetración máxima pero necesaria también para permitir el paso de lodo a través de la sección de rodamientos a una tasa lo suficientemente alta para enfriarlos y lubricarlos. La mínima caída de presión en la mecha para rodamientos de motores de desplazamiento positivo es 250 lpc, un diferencial menor al indicado puede recalentar la sección rápidamente y reducir la vida operativa de la misma, es por esto que el área de flujo debe ser adecuada a las necesidades del programa. La Ecuación 2 muestra la relación existente entre dicha área y los diámetros de los chorros de la mecha, determinados por los requerimientos hidráulicos de la operación.

$$\text{TFA} = \frac{\pi}{4} \cdot N \cdot \left(\frac{X}{32} \right)^2 \quad \text{Ecuación 2}$$

La configuración de los chorros de la mecha es parámetro importante en el programa hidráulico puesto determina el TFA y por ende la caída de presión necesaria en la mecha para la lubricación de los rodamientos, la expresión anterior es la base del procedimiento para el diseño de los chorros de la mecha en pulgadas (x), calculando las dimensiones para cada uno de ellos referidos por el número adimensional N que relaciona el área atribuida a cada diámetro. Es precisamente la sección de rodamientos la que requiere el balance del empuje hidráulico y el peso sobre la mecha, equilibrio necesario para el

correcto desempeño del sistema. La Figura 22 evidencia la importancia del balance del empuje sobre la sección tratada. El fluido que pasa a través del ensamblaje de rodamientos radiales y axiales genera carga hacia abajo, mientras que el peso sobre la mecha reacciona creando un empuje en sentido contrario, ambas fuerzas deben estar balanceadas para optimizar el desempeño del motor.

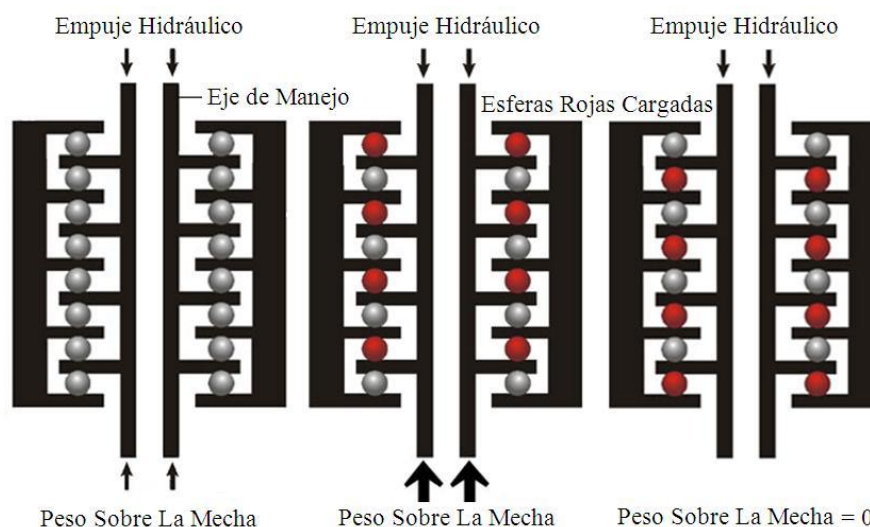


Figura 22. Balance de Empuje en Sistema de Rodamientos [5]. Modificado por Eduardo Morante.

Al igualarse las fuerzas el ensamblaje de rodamientos opera de forma óptima ilustrando esferas con cargas igualmente distribuidas de color gris, mientras que al ser mayor el peso sobre la mecha mientras se perfora o el empuje hidráulico al tener la sarta fuera de fondo, el sistema pierde el equilibrio evidenciado por las esferas rojas sobrecargadas en comparación con el resto. Las cargas máximas soportadas por el motor vienen dadas por la capacidad del sistema de rodamientos que, en el modelo de motor estudiado en el TEG, es de 45400 lbs.



Mantenimiento

Se entiende por mantenimiento la combinación de actividades técnicas y administrativas destinadas a la restauración o extensión de vida útil de un artículo o herramienta, en base a esto se hace indispensable el mantenimiento de los motores de fondo no solo para el correcto desempeño de los mismos sino para la prolongación de su tiempo operativo. Se debe tomar en cuenta que son las herramientas corridas en la perforación aquellas que hacen posible el logro de los objetivos planteados y recuperan la información necesaria para la entrega del producto al cliente. Por lo tanto, el sistema interno de gestión de calidad de SLB define los requerimientos mínimos de mantenimiento que deben cumplir las herramientas destinadas a operaciones de campo para asegurar la implementación uniforme de los procesos de esta fase a nivel mundial.

Los costos asociados a esta fase son totalmente fundamentados en las ganancias que proporcionan con su aporte en la perforación direccional, por ende la evaluación y monitoreo de estas herramientas antes, durante y después de la operación es clave para las actividades que conforman a la empresa que los emplea.

El mantenimiento en sitio, es decir, en la localización de la operación requiere la revisión de la configuración del motor presentada previa y posterior a la corrida, configuración conformada por los siguientes elementos: dimensiones de la herramienta, número de serial, relación rotor/estator, tipo de elastómero del estator, ángulo de *bend housing*, conexiones superior e inferior, *top/float sub*, *play* de sección de rodamientos.

Definiendo “*play*” como las diferencias de longitudes entre el cuerpo de la sección de rodamientos y la *bit box* (*play* axial), y entre el collar de la sección de rodamientos y el eje de manejo. Medidas tomadas antes y después de la corrida para evaluar el desgaste sufrido por los rodamientos durante la operación.

Mientras que el mantenimiento en el taller destinado para dicha actividad es mucho más complejo pues examina minuciosamente la herramienta una vez que llega del sitio de operaciones, documentando además su tiempo operativo. Debido a esto se presenta especial atención a este punto en la investigación.



Niveles de Mantenimiento

Existen solo 2 niveles de mantenimiento para motores de fondo, el nivel 0 referido a motores que no fueron usados en operaciones y el nivel 1 relacionado a motores que si fueron empleados en las actividades de campo.

Procedimientos Para el Mantenimiento de Motores de Fondo PDM

El proceso de mantenimiento de los motores de fondo está diseñado para garantizar su máxima confiabilidad y correcto desempeño en el campo, iniciando el programa con una verificación en el taller previa a su partida a la operación en la cual se definen las condiciones que debe cumplir el motor según el trabajo y ambiente en el cual vaya a ser corrido. Posteriormente se evalúan los requerimientos necesarios de las secciones que lo componen, revisando el tipo de elastómero de acuerdo al lodo a utilizar, el ajuste de interferencia entre el rotor y el estator, dimensiones, ángulo ajustable del *bend housing* y correcto ensamblaje de rodamientos para la caída de presión esperada. Al terminar la evaluación de requerimientos se pasa al ensamblaje del motor como tal, llevando una documentación detallada de todas las partes utilizadas para una fase final de control de calidad en la cual es asegurado que el motor cumpla con las especificaciones solicitadas para el trabajo.

Una vez cerrado ese ciclo, el motor es enviado a campo en donde se le aplica el mantenimiento sencillo descrito con anterioridad después de cada corrida hasta que sea necesaria su vuelta al taller.

Al recibir una herramienta que retorna de campo, el taller revisa si fue o no empleada en alguna operación para darle el trato adecuado, en el caso de haber sido usada la herramienta es almacenada apropiadamente en lugares especiales para su disposición y en caso de haber sido empleada, se revisa el documento proveniente de campo para descartar alguna falla reportada y se procede al desensamblaje de la misma para cumplir de nuevo el ciclo inicial de mantenimiento. Cabe destacar que si existió algún problema durante la operación el motor, el ciclo de mantenimiento se encarga de asegurar su corrección y garantizar así la confiabilidad del equipo.



✚ Sistema de Configuración

La configuración de la herramienta consiste en una fase del ciclo de mantenimiento descrito, en la cual se ajustan los parámetros necesarios en el motor para la ejecución de la operación pautada tomando en cuenta las condiciones bajo las cuales será llevada a cabo. Los requerimientos evaluados en esta sección están referidos a la identificación y caracterización de cada componente del motor, específicamente a las dimensiones de la herramienta, el tipo de rodamientos, rotor, estator y elastómero, el número de etapas del rotor, la interferencia ajustable entre el rotor y el estator, el tipo de *bend housing* y finalmente el tipo de estabilizador. Al determinar esta serie de parámetros se garantiza la máxima confiabilidad en el motor ensamblado.

✚ Evaluación de *Top Sub* Para Su Reúso

La evaluación de los componentes del motor se lleva a cabo una vez que se desensambla el mismo al llegar de campo. En el caso de los *top subs* el procedimiento para evaluar su posible reúso comienza con la medición del espesor de la tubería en 4 puntos diferentes del diámetro de su conexión superior, la lectura menor y promedio de dichas mediciones se compara con valores límites tabulados por debajo de los cuales se considera el *top sub* como inútil. Existe un rango de diámetro interno y externo que también es revisado en el mantenimiento de este componente.

✚ Evaluación de Sección de Poder Para Su Reúso

La sección de poder es evaluada con el mantenimiento de cada uno de sus componentes, en primer lugar se revisa el estado del rotor, de forma visual y con mediciones para determinar su estado basándose en impedimentos relacionados a presentar un daño visible en su cuerpo mayor a un cuarto de pulgada y evidenciar diferencias de diámetros a lo largo de su cuerpo mayor a 0.015 pulgadas. Posteriormente se hace una inspección del estator y su elastómero, teniendo en cuenta que es el componente que más sufre desgaste por la carga cíclica a la que es sometido, por tal motivo presenta indicadores



de daños relacionados principalmente a condiciones de temperatura y dureza, límites que de ser excedidos representan la necesidad de descarte de la pieza.

Evaluación de Sección de Transmisión Para Su Reúso

El mantenimiento de esta sección incluye obligatoriamente el cambio de los sellos de conexiones, una vez realizado esto se evalúa la posibilidad de reúso del resto de los componentes. El eje de conexión es revisado para descartar pandeo, corrosión y hundimientos, mientras que las uniones con el rotor y el eje de manejo deben ser revisadas en busca de desgaste o deformación, al existir cualquier de dichas condiciones el componente se debe reemplazar.

Evaluación de *Bend Housing* Ajustable Para Su Reúso

En el collar del *bend housing* se deben revisar las conexiones y sellos de goma, además de medir los diámetros y espesor para comparar los valores con los límites tabulados para cada motor. En el caso del anillo que presenta los ángulos correspondientes al valor del ajuste se evalúa visualmente el cuerpo del mismo en busca de desgaste que imposibilite la determinación de la inclinación deseada. Si los parámetros mencionados están fuera de límite o el daño del anillo es considerable se debe reemplazar la sección.

Evaluación de Sección de Rodamientos Para Su Reúso

La sección de rodamientos presenta dos factores de desgaste, la carga aplicada en forma axial y radial, y la hidráulica del pozo. En el caso del desgaste originado por la carga aplicada sobre los rodamientos, es mitigada con el reemplazo de los mismos en cada revisión, cambio obligado para esta sección, mientras que la hidráulica del pozo es el factor de mayor importancia en el mantenimiento puesto que escapa de las manos de los ingenieros de campo debido a que es un programa determinado por el cliente o empresa operadora. La sección de rodamientos radiales está compuesta por una serie de esferas en carreras superpuestas que soportan las cargas inducidas por la sarta de perforación y el fluido, esta configuración presenta una luz que deja pasar el lodo a través de los rodamientos para lubricarlos y enfriarlos de acuerdo a la caída de presión en la mecha, si esa lubricación no es efectiva además de



impedir el óptimo desempeño durante la operación, pueden originarse daños en las carreras descritas por la fricción y altas temperaturas del sistema. En caso de encontrar este tipo de daños en la revisión debe ser reemplazada la sección.

Evaluación de Sección de Manejo Para Su Reúso

El eje de manejo es el principal componente de la sección de manejo, únicamente acompañado por el collar que lo cubre, debido a esto el mantenimiento requerido para el sistema tiene que ver con la revisión del collar en busca de daños por abrasión y la revisión de la conexión del eje de manejo con el de transmisión, si es observado algún daño se debe reemplazar el componente.

CAPÍTULO III

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

FAJA PETROLÍFERA DEL ORINOCO ^{[9][10][11]}

La Faja Petrolífera del Orinoco (FPO) es la acumulación de hidrocarburos más grande a nivel mundial, ocupando el flanco sur de la Cuenca Oriental de Venezuela, paralela al río Orinoco y al sur de Guárico, Anzoátegui, Monagas y Delta Amacuro. Abarca un área de 55.314 Km² y posee un total de 258.329 MMBls de reservas probadas relacionadas a un petróleo original en sitio (POES) de 1360MMMBls. Las arenas de la formación Oficina y Merecure representan las principales fuentes de hidrocarburos de la faja, con altos valores de porosidad y permeabilidad en donde se encuentran acumulados crudos pesados y extrapesados de gravedades que oscilan entre los 6° y los 16° API.

Su extensión fue dividida en cuatro bloques de estudio como se muestra en la Figura 23, ordenándose de este a oeste como Carabobo, Ayacucho, Junín y Boyacá. Bloques que a su vez se subdividen en 31 partes de aproximadamente 500 Km² cada una.



Figura 23. Faja Petrolífera del Orinoco ^[9].



Entrando en materia geológica, la Cuenca Oriental de Venezuela culminó su desarrollo con la ocurrencia de movimientos orogénicos y epirogénicos durante el periodo comprendido entre el Mioceno y Plioceno, movimientos que transformaron la cuenca sedimentaria oriental en una estructural, dividida por el levantamiento de Anaco en las subcuencas de Maturín y Guárico ubicadas al este y oeste del mismo respectivamente. Posterior a esto se produjo una reversión marina en dirección este generada por la inclinación inducida por los levantamientos y de este modo la cuenca Oriental de Venezuela pasó a ser parte fundamental del continente suramericano ^[14]. Será objeto de estudio de la presente investigación el campo Zuata Principal ubicado en el bloque Junín, cuya geología estructural se rige por el mismo patrón que el resto de la Cuenca Oriental. A continuación se amplía el contexto expresado a fin de tener el conocimiento necesario del área en donde se ubica el problema a tratar.

Bloque Junín

El bloque Junín se encuentra ubicado en la zona central de la FPO, bordeado por los bloques Ayacucho y Boyacá al este y oeste respectivamente y por el distrito operacional de Petróleos de Venezuela (PDVSA) San Tomé y la rivera del río Orinoco al norte y sur en cada caso, se extiende en un área de 14.580 Km² en la jurisdicción de los municipios Santa María de Ipire en el estado Guárico y Francisco de Miranda y José Gregorio Monagas en el estado Anzoátegui. Particularmente en Junín, el rasgo estructural resaltante es el sistema de fallas de Hato Viejo que representa el mecanismo principal de entrapamiento de crudo y corta al monoclinal formado por la parte sur elevada y la parte norte deprimida del bloque. En la Figura 24 se muestran los rasgos estructurales de la Cuenca Oriental de Venezuela y su relación con la Faja Petrolífera del Orinoco.

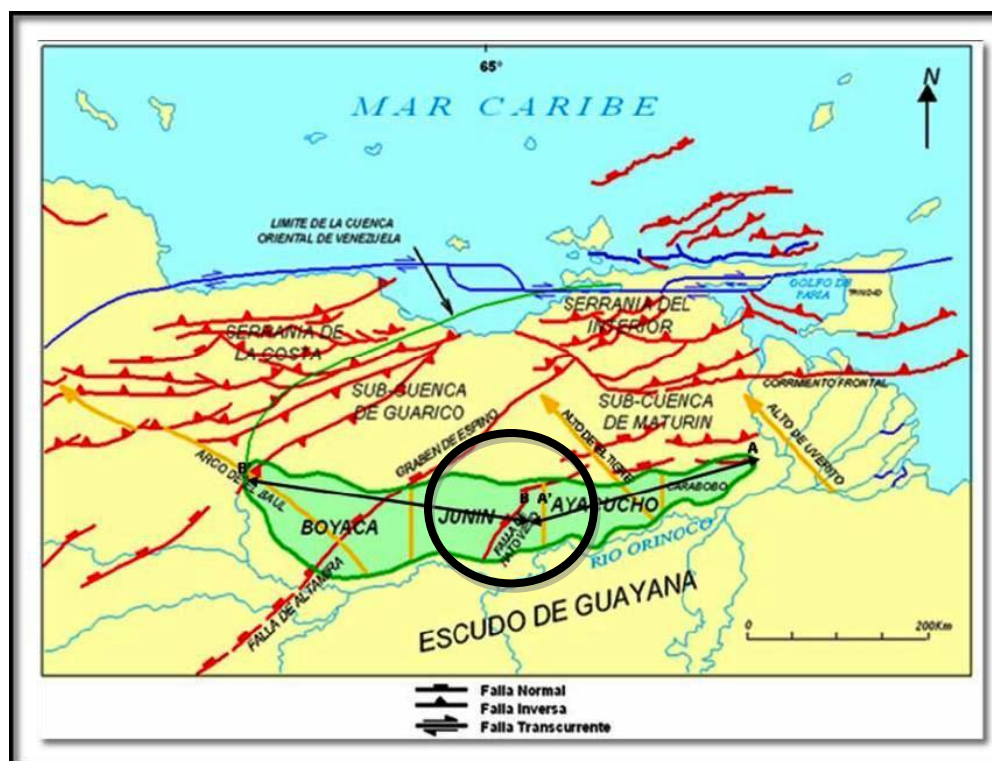


Figura 24. Rasgos Estructurales de la Cuenca Oriental de Venezuela ^[13] Modificado por Eduardo Morante.

Los yacimientos en Junín describen una serie de redes interconectadas de cuerpos de arena generados por procesos de migración, erosión, re trabajo y aluviones de canal, la formación Oficina es el principal cuerpo productivo de crudo extrapesado presentando una gravedad API promedio de 9° y viscosidades que se encuentran en el rango de 5000 cp a 50000 cp aumentando la resistencia al flujo en dirección sur del bloque, sin embargo se sabe que en principio el crudo de Junín migró como liviano degradándose entre este proceso y el entrampamiento en los reservorios someros de la formación. Se atribuye dicho fenómeno al efecto de lavado que produce el agua que circula por la cuenca, agua que cambia las propiedades químicas del hidrocarburo removiendo compuestos aromáticos presentes en el crudo original y aumentando su viscosidad efectiva.

Junín cuenta actualmente con reservas probadas que ascienden a los 15MMMBls y tienen un POES asociado de 244MMMBls, por lo cual es un punto de interés para

diversas compañías operadoras que desempeñan sus actividades en las subdivisiones presentes.

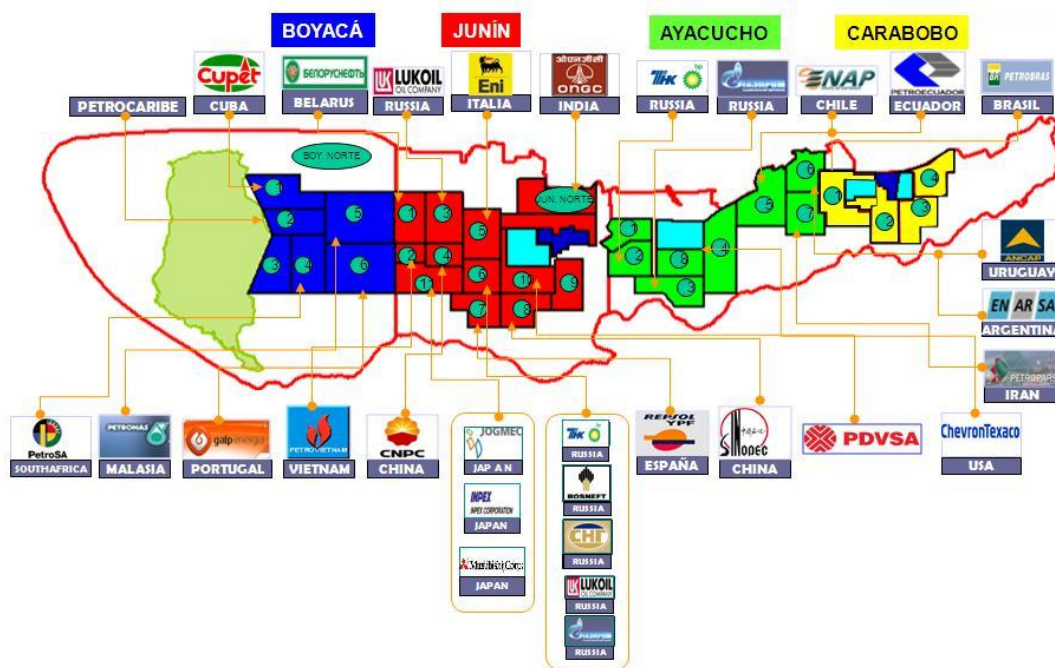


Figura 25. Compañías Operadoras por Bloque ^[14] Modificado por Eduardo Morante.

La Figura 25 muestra las compañías que desarrollan las divisiones de la FPO las cuales se describen en la Tabla 3.

Tabla 3. Compañías Operadoras en Cada División de Junín.

División	Compañía
Junín 1	Belarusneft
Junín 2	PDVSA Petromacareo
Junín 3	LangepasUraiKogalymneft (LUKOIL)
Junín 4	PDVSA, China National Petroleum Corporation (CNPC)
Junín 5	Ente Nazionale Idrocarburi (ENI)
Junín 6	PDVSA Petromiranda
Junín 7	REPSOL
Junín 8	China Petrochemical Corporation (SINOPEC)

Junín 9	Pendiente Licitación
Junín 10	PDVSA Distrito Cabrutica
Junín 11	Consorcio Japonés
Junín 12	PDVSA
Junín 13	PDVSA
Junín Norte	<i>Oil and Natural Gas Corporation Limited (ONGC)</i>
Petrocedeño	PDVSA Petrocedeño
Distrito Cabrutica	PDVSA Distrito Cabrutica

La Presente investigación, se centrará en el campo Zuata Principal, ubicado en Junín 10 y operado por la compañía PDVSA bajo la figura de Distrito Cabrutica.

Campo Zuata Principal

El campo Suata Principal está ubicado al este del bloque Junín, específicamente en el municipio Monagas, estado Anzoátegui. Debe su nombre a la previa denominación del bloque en cuestión (Zuata) y pertenece en la actualidad a la división Junín 10.

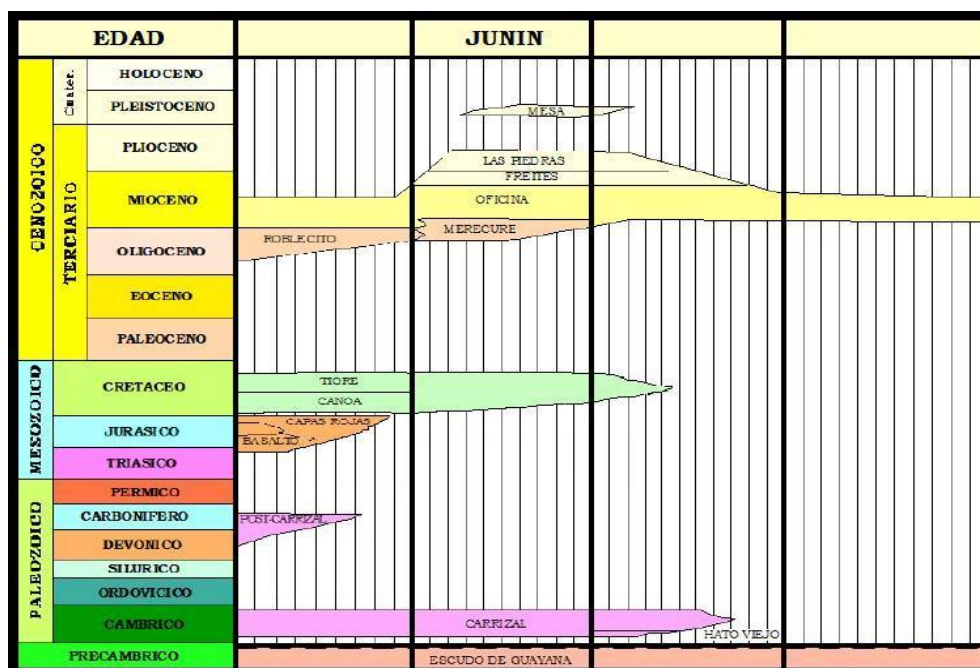


Figura 26. Columna Estratigráfica del Bloque Junín ^[13].



La estratigrafía local mostrada en la Figura 26 está compuesta por las formaciones Mesa, Las Piedras, Freites y Oficina, siendo esta última la roca reservorio y por ende la formación de mayor interés económico.

A pesar de ser la formación Oficina la roca reservorio y por ende la de mayor importancia económica, a la hora de perforar se deben tomar en cuenta todas y cada una de las formaciones a atravesar puesto que se deben ajustar los parámetros operacionales y equipos necesarios para llevar a cabo la actividad de forma exitosa. Por esta razón se detallan seguidamente las formaciones antes mencionadas.

Formación Mesa

Es una formación de origen fluvial a marino somero que tiene como tope la superficie, se extiende por los llanos centro – occidentales, orientales y es de edad reciente, específicamente del Pleistoceno. Posee una estratificación cruzada constituida por arenas de grano grueso y gravas de elevada dureza, conglomerados rojos y arenas blanco – amarillentas, además es conocida la presencia de lentes discontinuos de arcilla fina y de limolita. La importancia económica que refiere esta formación está relacionada a la gran cantidad de agua dulce para uso domestico que contiene.

Formación Las Piedras

Al igual que la formación La Mesa, es de origen fluvial a marino somero, su ubicación geográfica corresponde a los estados Anzoátegui, Monagas y Delta Amacuro, extendiéndose también hasta el Golfo de Paria con una edad geológica comprendida entre el Plioceno y el Mioceno Superior. Las Piedras está constituida por areniscas micáceas de grano fino y colores claros, intercaladas con lutitas y lignitos pudiendo presentar calizas arenosas duras. La importancia económica adjudicada a la formación viene dada por su característica de productora de petróleo pesado en algunos campos al norte de Monagas.

Formación Freites

De origen marino somero la formación Freites se extiende a lo largo de la subcuenca de Maturín llegando hasta las cercanías del río Orinoco, con tope



aproximadamente a los 900 pies de profundidad y coincidiendo en forma suprayacente con la formación Oficina. Su edad corresponde al Mioceno Medio y la litología estudiada evidencia capas delgadas superior e inferior de areniscas arcillosas de grano fino con un intervalo predominante de lutitas. Freites es de suma importancia económica puesto que representa el sello de los principales yacimientos petrolíferos de la formación Oficina y además contiene en su parte inferior arenas de menor espesor productoras de hidrocarburo.

Formación Oficina

La formación productora por excelencia de la Cuenca Oriental del país se ubica en el subsuelo de los estados Anzoátegui y Monagas. De edad geológica correspondiente al intervalo entre el Oligoceno y el Mioceno, Oficina presenta un origen fluvio – deltaico y su tope se encuentra a los 1900 pies de profundidad. La litología existente se divide en una porción superior de lutitas con capas de lignitos intercalados y una inferior arenosa con intervalos de lutitas. La importancia económica de esta formación recae en sus arenas productoras que representan los principales yacimientos petrolíferos del oriente de Venezuela, además las lutitas presentes se consideran rocas generadoras de hidrocarburo.

Modelo de Perforación Propuesto en Zuata Principal

Una vez analizada la información del campo Zuata principal, se presenta el modelo de perforación relacionado a las operaciones desarrolladas, tomando en cuenta datos generales del campo, estimado de reservas recuperables en la zona, características del crudo y configuración de los pozos de desarrollo, información obtenida gracias a la nota técnica proporcionada por la Gerencia de Yacimientos del Distrito Cabrutica de PDVSA en su División Junín.

 **Información Geología:** las formaciones perforadas presentan topes conocidos, iniciando desde superficie las formaciones Mesa y Las Piedras, seguidas por Freites a 500 pies de profundidad y finalmente Oficina a 1139



pies. El objetivo principal es la arena OFIA, específicamente el yacimiento OFIA01 limitado al norte, este y sureste por planos arbitrarios asignados por la extinta asociación estratégica Petrozuata, mientras que al oeste y suroeste presenta un límite de concesión con Petrocedeno (antigua SINCOR).

En el plano sedimentológico, el yacimiento OFIA01 forma parte de un cuerpo sedimentario formado en un ambiente fluvial dominado por corrientes entrelazadas, ambiente representado por el cinturón de canales.

✚ **Datos Petrofísicos y Reservas:** el análisis petrofísico del yacimiento OFIA01 de la arena OFIA arrojó un promedio de 33% de porosidad, 3145 mD de permeabilidad y 15% de saturación de agua. Por su parte el valor correspondiente a la gravedad API del crudo fue tomado de pozos en producción del yacimiento, obteniendo como resultado 9° API. Las reservas recuperables totales de petróleo alcanzan los 2744 MMBN de las cuales se han recuperado 459,4MMBN dejando un total de reservas remanentes de 2284,6 MMBN.

✚ **Configuración de Pozo:** la propuesta de perforación se basa en el concepto de un pozo horizontal, compuesto 3 secciones, una vertical, seguida de una sección de construcción de ángulo y finalmente una lateral u horizontal. Como se aprecia en la Figura 27, la sección vertical se propone hasta 400 pies en MD en donde se debe asentar un revestidor J-55 de 13^{3/8}” de diámetro, luego de esto se profundiza hasta el KOP para comenzar la sección de construcción de ángulo y asentar el revestidor de 9^{5/8}” N-80 a 3382 pies en MD. Finalmente se penetra 5618 pies en la arena OFIA alcanzando una profundidad de 9000 pies en MD en donde asienta un sistema de *liner* ranurado de 7” de diámetro para completación a hoyo abierto con tubería de 4^{1/2}” aproximadamente a 200 pies por encima del colgador el *liner*.

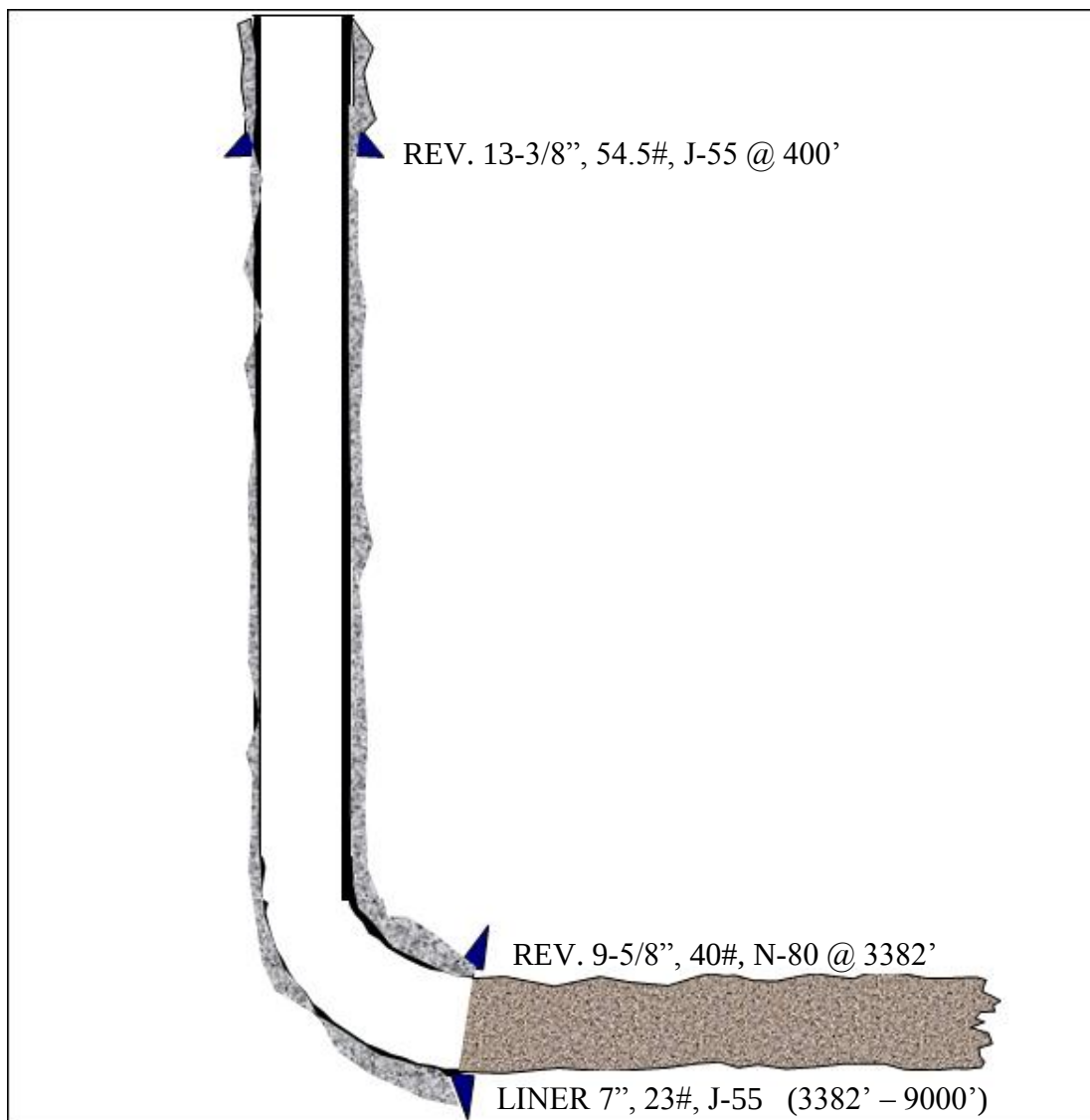


Figura 27. Diagrama de Pozo Propuesto A01

SCHLUMBERGER OILFIELD SERVICES

Schlumberger es una compañía de tecnología global de campos petroleros, manejo de proyectos y desarrollo de soluciones, comprometida con el suministro de servicios que optimicen el desempeño operativo del cliente. Por tanto, es el cliente el elemento sobre el cual se centra la mayor atención en cuanto a la cultura desarrollada para el entendimiento de los procesos y normas de trabajo que permitan proporcionar un servicio de calidad.



Misión ^[15]

La misión principal de la empresa se traduce en suministrar el apoyo necesario al cliente para optimizar el desempeño de reservorios con una producción eficiente y recobro optimo sin incrementar costos de levantamiento.

Servicios y Productos ^[15]

- + Cañoneo.
- + Caracterización e Interpretación de Yacimientos.
- + Cementación.
- + *Coiled Tubing*.
- + Completación.
- + Consultoría de Negocio.
- + Control de Arena.
- + Estimulación.
- + Evaluación de Formaciones y Registro con Guaya.
- + Levantamiento Artificial.
- + Monitoreo de Producción.
- + Perforación.
- + Pruebas de Pozos.
- + Servicios de Carbón.
- + Servicios Geofísicos.
- + Servicio de Mechas y Tecnologías de Avanzada.
- + Servicios de Software.
- + Servicios Subacuáticos.

Los servicios y productos de los que dispone la compañía son desarrollados y proporcionados bajo la premisa de excelencia en calidad y mejor valor agregado posible, velando por la satisfacción del cliente y contando con la tecnología más avanzada en el campo y la experticia requerida para identificar, desarrollar y manejar hidrocarburos efectivamente.



Visión ^[15]

Ser la empresa líder en el desarrollo de tecnologías y soluciones de valor agregado para optimizar el desempeño de reservorios, alcanzando así la excelencia en servicios. Para ello es necesario apuntalar todas las operaciones desarrolladas en tres valores establecidos como personas, tecnología y ganancia, manteniendo una de sus mayores virtudes en la diversidad de la fuerza laboral, con hombres y mujeres de diferentes nacionalidades trabajando en conjunto por objetivos comunes.

SEGMENTO DRILLING AND MEASUREMENTS

Schlumberger gerencia sus negocios a través de treinta y tres geomercados agrupados geográficamente en cuatro áreas. El manejo de operaciones en Venezuela se desempeña mediante el geomercado que comprende además a Trinidad y Tobago, perteneciente al Área de Latinoamérica, en donde se desenvuelven Segmentos referidos a la industria petrolera, siendo *Drilling and Measurements* (D&M) el encargado de brindar soporte en operaciones de perforación y registros, velando por la consecución del objetivo planteado y minimizando el impacto ambiental.

El Segmento se maneja en dos divisiones dispuestas en el oriente y el occidente del país, representando el caso de estudio la división *D&M East* ubicada en el estado Anzoátegui, específicamente en el sector 6003 Carretera Negra, Vía HP de la ciudad de Anaco. Sus características son presentadas a continuación.

Misión ^[16]

Proporcionar productos y servicios para operaciones de perforación que garanticen la reducción de riesgos y costos, el posicionamiento de pozos que resulte en producción óptima y el incremento de comprensión del comportamiento de reservorios.

Visión ^[16]

Ser la compañía de productos y servicios en el área de perforación, reconocida como la indiscutible número uno por la industria y empleados que la componen.



CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA

TIPO DE INVESTIGACIÓN

La investigación llevada a cabo fue del tipo descriptiva ya que puso de manifiesto la estructura y comportamiento de los fenómenos en estudio, caracterizando las variables envueltas en el problema y proporcionando de esta manera una propuesta para solucionarlo. La investigación descriptiva “mide de forma independiente las variables, y aun cuando no se formulen hipótesis, las primeras aparecerán enunciadas en los objetivos de la investigación” [3]. Dicha premisa evidencia la concordancia entre el proyecto realizado y la investigación descriptiva, debido a que las variables fueron expuestas en los objetivos del estudio.

DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación se consideró de diseño documental, de campo y descriptivo dado que los datos se obtuvieron a través de las vías descritas en cada uno de dichos renglones. En primer lugar, se considera documental ya que se llevó a cabo la recolección de datos provenientes de manuales impresos, libros y otros documentos considerados de interés para la investigación. Además algunos datos fueron obtenidos directamente del contexto operativo por lo cual, es catalogada como investigación de campo dicha recolección sin modificar las variables envueltas en ella. Finalmente el carácter descriptivo es adjudicado al proyecto por haber caracterizado la estructura y comportamiento de los motores objetos de estudio en un tiempo determinado.

POBLACIÓN Y MUESTRA

El estudio realizado quedó constituido por una población de 29 motores de fondo que forman parte de la flota de herramientas empleadas en operaciones de perforación direccional por SLB D&M East VZE. Dicha población consiste en la totalidad de las herramientas que desarrollan la sección de construcción de ángulo del pozo y se caracterizan por ser PDM y presentar un diámetro de collar de 8^{1/4}” y un estabilizador



integrado cercano a la mecha. Al tratarse de una población finita, es decir, “aquella cuyos elementos en su totalidad son identificables por el investigador, por lo menos desde el punto de vista del conocimiento que se tiene sobre su cantidad total”^[17], el investigador tuvo la potestad de extraer una muestra representativa del universo estudiado, utilizando un instrumento de recolección de datos adecuado.

Para que una muestra sea significativa y por lo tanto útil, debe evidenciar tanto las diferencias como las similitudes de la población y ejemplificar sus características. Por tal motivo se seleccionó una muestra de 7 motores de fondo basándose en el criterio muestral intencional^[3], debido a la necesidad de enmarcar dicha muestra en el contexto del problema tratado. Los motores seleccionados fueron empleados en 15 trabajos, distribuidos en 2 macollas (A y B) del campo Zuata Principal, lo que hace representativa la muestra al abarcar un número considerable de operaciones.

DEFINICIÓN DE INDICADORES

Los indicadores referidos a la investigación representan instrumentos usados para informar el estado de la muestra estudiada, dando una clara visión al investigador acerca del problema tratado^[19]. En el T.E.G. se tomaron en cuenta indicadores expuestos en los objetivos del proyecto como indica la investigación descriptiva, siendo el tiempo de mantenimiento, tiempo operativo y costo asociado las variables tomadas en cuenta a la hora de la evaluación de los motores de fondo que conforman la muestra representativa.

El tiempo de mantenimiento se refiere a las horas fuera de operación en las cuales la herramienta fue sometida a algún tipo de procedimiento preventivo o restaurador, dejando de producir ganancias para la empresa y representando esfuerzo de personal y/o económico para la recuperación su óptimo estado. Este indicador toma en consideración el tiempo de transporte de la herramienta desde el campo al centro de mantenimiento y viceversa, por lo cual la salida y la entrada de la herramienta a la localización delimitan el indicador en cuestión. Al obtener los reportes de ingreso y egreso, que fue el medio a través del cual se registraron los tiempos de mantenimiento, se obtuvo un valor común para la muestra analizada de 24 horas, ya



que si bien las horas de mantenimiento en la base no fueron constantes, debido a la política de transporte empleada por la empresa los tiempos coincidieron para los límites especificados.

Las horas reportadas por los ingenieros de campo en las cuales los equipos se encontraban activos operacionalmente en corridas se define como tiempo operativo, y es indicador principal del desenvolvimiento de las herramientas en los trabajos asignados. La medición de este indicador inicia desde que se bombea fluido al pozo a través de la herramienta luego del armado del BHA para comenzar la corrida, finalizando y reactivándose cada vez que dicho bombeo sea detenido e iniciado de nuevo. Ambos límites fueron registrados en base a los reportes por hora llevados por la empresa durante la totalidad del trabajo desarrollado, en los cuales se pueden obtener con exactitud los valores descritos.

Cabe destacar que el tiempo que pasaron los motores en la localización sin estar en hoyo es considerado como tiempo no operativo y no pertenece a ninguna de las categorías evaluadas en la investigación.

La relación entre el tiempo de mantenimiento y el tiempo operativo incide directamente en el aspecto económico puesto que el costo de mantenimiento de equipos y las ganancias obtenidas por su corrida definen el indicador de costo asociado a las operaciones de perforación en función de la relación de tiempos. Es por esto que a la hora de evaluar los costos se utilizó la proporción entre las horas operativas y de mantenimiento en lugar de llevar a cabo un análisis económico profundo que, para fines del proyecto, no era necesario. Empleando así el indicador de relación entre el tiempo en el cual el motor generó ganancias para la empresa y aquel en el que ocasionó pérdidas debido a su inoperatividad relacionada al mantenimiento de sus componentes.



TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCION DE DATOS

Las técnicas e instrumentos de recolección de datos representan el punto de partida de la estrategia implementada para lograr los objetivos planteados. Para el desarrollo de la investigación la técnica utilizada para la recolección de los datos fue la observación directa de campo, estructurada, no participante e individual. Considerada de campo puesto que los datos fueron captados tal y como se presentaron en el lugar de la operación, ya que el investigador estuvo envuelto en las actividades de perforación y monitoreo de los motores estudiados.

El modelo estructurado es una técnica atribuida al proyecto debido a que la información que se deseaba recolectar fue establecida previa a la observación de la misma. Finalmente según el número de investigadores y su papel, la investigación es catalogada como individual no participante por ser llevada a cabo por una sola persona que permanece ajeno a la muestra estudiada.

La técnica descrita es desarrollada a través del uso de instrumentos de recolección de datos que representan los medios o recursos empleados para implementar la técnica deseada. La lista de control o de cotejo y fichas de trabajo fueron los instrumentos seleccionados en el estudio realizado, obteniendo así parámetros relevantes e información completa de cada trabajo evaluado y de la muestra representativa.

A continuación se presenta el formato de ficha de trabajo en la cual se obtienen datos relacionados a cada motor considerado en la muestra representativa estudiada.

Tabla 4. Ficha de Trabajo de Motor

Campo	
Macolla	
Tipo de Pozo	
Trabajo	
Tiempo Operativo	
BHA	
Tipo de Mecha	
Target	



FASES DE LA INVESTIGACIÓN

La ejecución de la investigación fue llevada a cabo de acuerdo a las fases presentadas a continuación en orden cronológico.

Elaboración de la Revisión Bibliográfica

Se llevó a cabo una recopilación de material teórico y técnico que permitió la familiarización y comprensión del tema tratado, revisando informes técnicos de estudios similares e incluyendo en el material recolectado de revistas técnicas, publicaciones, libros y trabajos especiales de grado relacionados a la investigación. Este paso fundamenta desde el punto de vista teórico el proyecto desarrollado, quedando reseñado en la sección de referencias bibliográficas del T.E.G.

Estudio de Estándares de Calidad de Servicio de SLB D&M East VZE

Fue realizada la recopilación y revisión de los estándares de calidad de servicio del segmento que enmarca el proyecto con el fin de conocer a fondo la política de servicio de la compañía y el control de calidad que rige sus operaciones. Para esto se evaluaron los resultados obtenidos en la última auditoría interna llevada a cabo y se cotejó el nivel de cumplimiento de los estándares de calidad presentado con el requerido.

Al no ser satisfactoria la respuesta obtenida en la auditoría, se procedió a la identificación de los puntos en incumplimiento relacionados a los estándares internos y se les jerarquizó de acuerdo a su importancia para finalmente aplicar las medidas correctivas pertinentes y lograr el nivel de cumplimiento deseado.

El procedimiento detallado consistió en la revisión de la lista de control presentada como resultado de la auditoría mencionada en la Tabla 5 y la organización de las fallas obtenidas de acuerdo a un valor preestablecido por la empresa a nivel mundial, de acuerdo a la importancia y riesgo que cada una representa. De este modo se logró la jerarquización de los aspectos en



incumplimiento y se procedió a solucionarlos con un plan de trabajo conjunto entre el investigador y los representantes directos de cada sector con niveles de cumplimiento de estándares bajos. Al revisar las opciones de mitigación se seleccionó la más adecuada en cada caso basándose en el criterio del cuerpo gerencial y se implementó a la brevedad posible con la ayuda de los actores competentes.

Tabla 5. Lista de Control de Estándares de Calidad Auditados

Estándar	Cumplimiento	
Posicionamiento de Pozos	Si (X)	No ()
Mantenimiento	Si ()	No (X)
Ciclo de Trabajo	Si ()	No (X)
Ingeniería de Perforación	Si ()	No (X)
Reportes de Fallas	Si ()	No (X)
Presión	Si (X)	No ()
Control de Herramientas	Si ()	No (X)

Capacitación y Adiestramiento

Se llevó a cabo la capacitación intelectual y práctica del investigador a través de la instrucción por parte de especialistas acerca al funcionamiento de los motores de fondo estudiados, proporcionando información referente a los componentes de los mismos, la función de cada sección de la herramienta y su importancia dentro de la perforación direccional, y por ende del segmento que contextualiza el proyecto.

La relación entre cada una de las partes del motor fue presentada a través del ensamblaje y desensamblaje del equipo, formando a su vez al investigador en el ámbito de mantenimiento.

El entrenamiento integral en cuanto a especificaciones y procedimientos preventivos y regenerativos de los PDM fue implementado con la revisión y



explicación de manuales operativos y de mantenimiento, complementando esto con la práctica en el taller de la metodología empleada para dicho fin y logrando la capacitación y el adiestramiento del individuo en operaciones de taller.

Previo a lo antes descrito y con el fin de llevar a cabo la investigación bajo un concepto fundamental de seguridad personal en operaciones industriales, se participó en un curso de seguridad enfocado a las actividades de campo y a la prevención de cualquier tipo de inconvenientes en localizaciones, tomando en cuenta aspectos relacionados a las actividades cotidianas en campo, comportamiento ante el trabajo y haciendo hincapié en la identificación y prevención de situaciones de riesgo como el principal instrumento de seguridad individual y colectiva. De este modo no solo se aseguró el correcto proceder del individuo en operaciones de taller y campo, sino también el adiestramiento del mismo como observador refiriéndose a la validez de las técnicas de recolección de datos empleadas en la investigación.

Selección de la Muestra de Estudio y Elaboración de Base de Datos

Tal como se mencionó anteriormente, se llevó a cabo la selección de la muestra a través de un sistema intencional basado en juicios del investigador y fundamentado en el adiestramiento recibido en las fases previas del proyecto. Se tomaron en cuenta los 29 motores de 8^{1/4}” con los que cuenta SLB para perforar la sección construcción de pozos de 12^{1/4}”. De ese universo fueron elegidos aquellos motores que habían desarrollado trabajos previos en Zuata Principal, mediante el uso de reportes de corrida para cada motor disponibles en la base de datos de la empresa, es decir, un total de 11 equipos a considerar. Posteriormente se determinó, a través de los mismos informes, cuáles herramientas habían tenido la mayor frecuencia de operaciones en el campo en estudio, reduciendo a 9 la población que operó en al menos 10 corridas en el pasado año y que finalmente fue limitada a 7 motores por un criterio de tiempo, seleccionando los últimos PDM en operar en el campo de los 9 evaluados.

De este modo fueron estudiados los 7 motores de fondo como muestra representativa de la población, corridos en 15 trabajos en el campo Zuata Principal, a partir de los cuales se elaboró una base de datos con información referente a macolla en la cual operó, trabajos realizados, horas operativas, relación rotor/estator (R:E) en la sección de poder, tipo de lubricación, secciones y componentes desgastados, hidráulica empleada y parámetros de la mecha asociada. Datos recolectados en formatos como el presentado en la Tabla 6.

Tabla 6. Formato de Recolección de Datos de Motores de Fondo

Motor	Trabajo	Macolla	Hoyo	OD	BHA	R:E	Lubricación

La Figura 27 presenta los pasos seguidos para la ejecución de la fase descrita.

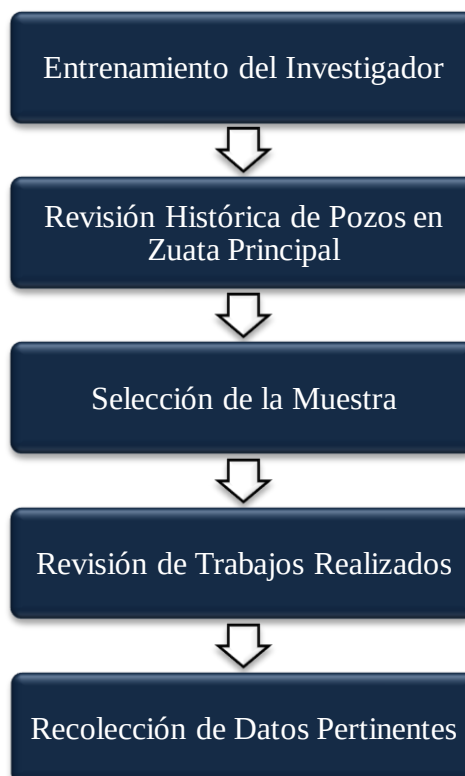


Figura 28. Pasos Para Selección de Muestra y Elaboración de Base de Datos



La información correspondiente al campo en estudio fue presentada en el Capítulo III referente a Descripción del Área de Estudio del T.E.G. por ende solo es referenciado en esta sección la selección del campo Zuata Principal.

Operaciones de Campo y Recolección de Datos

Uno de los puntos más importantes de la investigación es el referido a las operaciones de campo, puesto que permitió la total comprensión del desempeño de las herramientas objeto de estudio y la importancia que las mismas representan en la perforación direccional. Esta fase fundamenta la técnica e instrumento de recolección de datos, ya que la investigación de campo demanda la obtención de datos en el lugar y momento del acontecimiento, por lo cual se tuvo la oportunidad de cumplir a cabalidad con dicha premisa a través de la participación en los trabajos llevados a cabo por la muestra de estudio.

Revisión y Evaluación de Parámetros Operacionales de Motores de Fondo en el Campo Zuata Principal

Se llevó a cabo la revisión de los parámetros bajo los cuales fueron corridos los motores de fondo seleccionados como muestra en los trabajos estudiados para el campo Zuata Principal a partir de los datos recolectados en la investigación, utilizando los reportes finales en dichas corridas con el objetivo de cotejarlos con las especificaciones del modelo de herramienta reseñado en el Capítulo II de la investigación. Cabe destacar que el BHA evaluado era del tipo construcción de ángulo con un estabilizador cerca de la mecha incorporado al motor de fondo empleado, acompañado de herramientas de medición y perfilaje eléctrico separadas del resto de la sarta de perforación por una barra antimagnética o monel.

La Figura 29 describe paso a paso la ejecución de la revisión planteada, basándose la recolección de datos realizada para la elaboración de la base descrita anteriormente, datos que fueron categorizados y tabulados para cada



motor por corrida, hidráulica, especificaciones del motor, mantenimiento de la herramienta e información de la mecha empleada.

A la hora de estudiar la información de las corridas se consideraron parámetros referentes a profundidad medida (MD) inicial y final, tiempo operativo (t_{op}), azimuth (Az) inicial y final, inclinación (Inc) inicial y final, promedio de revoluciones por minuto (RPM), promedio de tasa de penetración (ROP), promedio de diferencial de presión (ΔP), tasa de flujo, temperatura de circulación (T_{circ}) y severidad de pata de perro (DLS). El formato empleado para la evaluación y estudio de los elementos mencionados se presenta en la Tabla 7.



Tabla 7. Formato para Evaluación de Detalles de Corrida

Detalles de Corrida															
Parámetros	Motor		Motor		Motor		Motor		Motor		Motor		Motor		
	A01	A02	A03	A04	A05	A06	A07	A08	B01	B02	B03	B04	B05	B06	B07
MD Inicial (pies)															
MD Final (pies)															
t op (h)															
Az. Inicial (grados)															
Inc. Inicial (grados)															
Az. Final (grados)															
Inc. Final (grados)															
RPM Prom.															
ROP Prom. (pies/h)															
ΔP Prom. (lpc)															
Flujo (GPM)															
T circ. (°F)															
DLS Máximo															



En cuanto a la hidráulica se listó para cada trabajo el tipo de lodo empleado, su densidad (ρ), la densidad equivalente de circulación, y el porcentaje de arena y sólidos. El formato utilizado se presenta en la Tabla 8.

Tabla 8. Formato para Evaluación de Detalles de Hidráulica

Detalles de Hidráulica						
Motor	Trabajo	Tipo de Lodo	ρ Máxima del Lodo (lpg)	ρ Equivalente de Circulación (lpg)	%Arena	%Sólidos

Adicionalmente, se proporcionaron especificaciones de la sección de *bend housing*, poder y rodamientos, datos empleados en conjunto con la base de datos inicial para la evaluación del funcionamiento de la herramienta y listados en un formato evidenciado por la Tabla 9.

Tabla 9. Formato para Evaluación de Detalles de Motor

Detalles del Motor						
Motor	Trabajo	<i>Bend Housing</i>	Nº Etapas	γ Reactivo	γ Promedio	<i>Play Axial</i>

El aspecto de mantenimiento fue tomado en cuenta con detalles de cada sección del motor, presentando el estado en el cual inició y culminó el trabajo estudiado. El formato empleado para la recolección y evaluación de los parámetros de mantenimiento se muestra a continuación en la Tabla 10.



Tabla 10. Formato para Evaluación de Detalles de Mantenimiento del Motor

Detalles de Mantenimiento del Motor													
Motor	Trabajo	Top Sub		Sección de Poder		Transmisión		Bend Housing		Rodamientos		Sección de Manejo	
		Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final



Y Finalmente, como muestra la Tabla 11. Se listaron parámetros operacionales de la mecha en base a su tipo, peso aplicado a la misma (WOB), configuración de chorros, área total de flujo (TFA) y caída de presión en la mecha (ΔP_m).

Tabla 11. Formato para Evaluación de Detalles de la Mecha

Detalles de la Mecha						
Motor	Trabajo	Tipo de Mecha	WOB (Klb)	Chorros	TFA (pulg ²)	ΔP_m (lpc)

La información categorizada fue jerarquizada y evaluada en base a los valores más resaltantes de cada conjunto, y la proporción de componentes desgastados obtenida a través de un gráfico que resume los daños en cada sección del motor, la relación entre ambos grupos de datos arrojó los principales parámetros a considerar en el cotejo de valores operacionales y teóricos. Seguidamente la comparación se realizó mediante la tabulación de los parámetros obtenidos de la jerarquización y sus homólogos teóricos presentados en el Capítulo II del proyecto, de esta forma se lograron identificar mediante el uso de una lista de verificación los parámetros operacionales fuera de rango teórico para evaluar el impacto que tienen en el desempeño de los motores de fondo estudiados.

Posterior a la identificación de parámetros fuera de rango se hizo una comparación entre el tiempo operativo teórico y el tiempo operativo practico para cada uno de los motores, usando datos de horas de trabajo presentes en la base estructurada por el investigador y el dato teórico que, según el manual de

operaciones, para los motores estudiados es de 200 horas, información empleada para graficar los tiempos referidos. Con los parámetros operacionales fuera de rango y los resultados mostrados en las gráficas descritas se llevó a cabo la evaluación del impacto dichos factores en los motores de fondo estudiados.

A continuación, la Figura 29 muestra el procedimiento descrito para la evaluación del impacto en los motores estudiados.

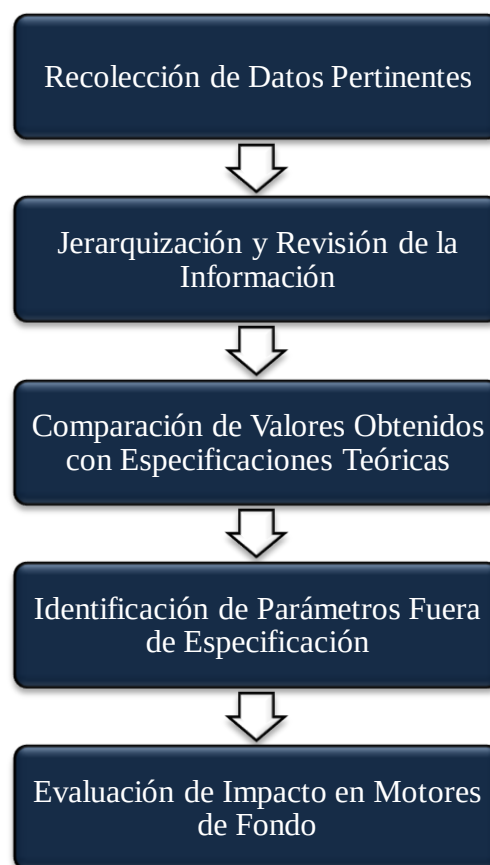


Figura 29. Pasos Para Evaluación de Parámetros Operacionales

Discusión de Resultados e Identificación de Factores que Inciden en el Desgaste de los Motores Estudiados

Al obtener la información necesaria se analizaron los resultados obtenidos en la experiencia de tiempo real en las localizaciones visitadas y se determinaron los elementos involucrados en la merma del desempeño operativo de los

motores de fondo de desplazamiento positivo en el campo Zuata Principal mediante un estudio comparativo de los parámetros evaluados. El Capítulo V de la investigación, detalla a fondo la sección de análisis de resultados concluyendo cuáles son los factores que inciden en el desgaste de la muestra.

Definición de Plan de Acción Para Mitigar Efecto de Factores Identificados

Contando con los factores asociados a la reducción del tiempo operativo y desgaste de motores de fondo, se evaluaron las diversas opciones de mitigación en base a los resultados de obtenidos en el impacto sobre los motores de fondo estudiado en la sección anterior de la metodología y la revisión de alternativas para las actividades de perforación, desde el cambio de herramientas hasta el cambio de componentes de las usadas en la actualidad.

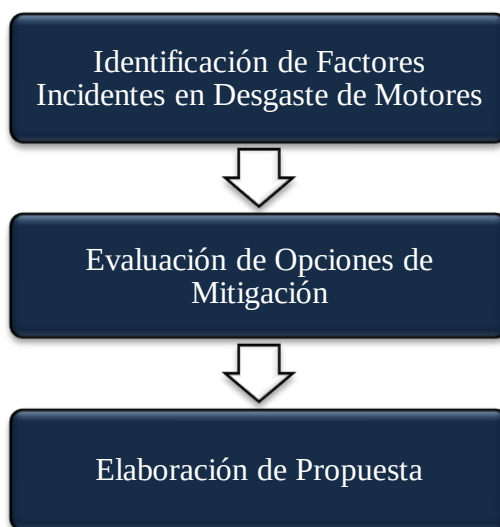


Figura 30. Pasos Para Definición de Propuesta de Acción

Teniendo en cuenta los elementos que inciden en el problema tratado se plantean las medidas para contrarrestar dichos factores conociendo la raíz del inconveniente estudiado en la investigación realizada. La elaboración de la propuesta se fundamentó en presentar opciones mas no en la implementación de las mismas pues no es el fin del proyecto desarrollado. En la Figura 30 se

muestran los pasos para el diseño del planteamiento para incrementar el tiempo útil de los equipos de acuerdo a las necesidades y condiciones del segmento y el cumplimiento de la demanda actual y la política de calidad de la empresa. La propuesta consistió en dos planteamientos, el primero referido a la configuración de chorros de la mecha en el cual se utilizaron conceptos y expresiones hidráulicas para rediseñar dicho aspecto y el segundo al cambio de herramienta empleada.

El rediseño de los chorros de la mecha conllevó al cálculo del área total de flujo necesaria para generar una caída de presión en la zona de 250 lpc y de los diámetros asociados a este parámetro, dicha operación se realizó a través del uso de las Ecuaciones 1 y 2:

$$\Delta P_m = \frac{8,311 \cdot 10^{-5} \cdot \rho \cdot \text{GPM}^2}{C_d^2 \cdot \text{TFA}^2} = \frac{8,311 \cdot 10^{-5} \cdot 9,15 \cdot 600^2}{0,95^2 \cdot \text{TFA}^2} = 250$$

El resultado obtenido del TFA es usado para determinar los diámetros de los chorros de la mecha, relacionando el TFA total con un $N = 4$ por representar la cantidad en la cual se distribuirá dicha área y calculando el TFA remanente para los chorros restantes, iterando el procedimiento hasta $N = 1$.

$$\text{TFA} = \frac{\pi}{4} \cdot N \cdot \left(\frac{X}{32}\right)^2 = \frac{\pi}{4} \cdot N \cdot \left(\frac{X}{32}\right)^2 = \frac{\pi}{4} \cdot 4 \cdot \left(\frac{X}{32}\right)^2$$

Por su parte el cambio de herramienta empleada en las operaciones de perforación de sección de construcción de ángulo contempló la opción del uso de motores de fondo con lubricación integrada, es decir, sin requerimientos de hidráulica para la lubricación de la sección de rodamientos de su estructura.

Ambas propuestas son ampliadas a continuación en el Capítulo V referente al análisis de los resultados obtenidos en la presente investigación.



CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con el fin de dar respuesta al problema tratado y alcanzar los objetivos planteados en el estudio de campo se hizo necesaria la recolección de datos a través de la observación directa estructurada de las operaciones de perforación desarrolladas con motores de fondo PDM en 2 macollas del campo Zuata Principal.

Luego de llevar a cabo dicha recolección se realizó el proceso de tabulación, para facilitar la presentación de los datos obtenidos y el análisis lógico y estadístico de los mismos. Análisis presentado a continuación en consonancia con la metodología descrita en el Capítulo IV del T.E.G.

PROYECTO DE ESTÁNDARES DE CALIDAD DE SERVICIO

A través del estudio de los estándares de calidad de servicio de la empresa y la identificación de los rubros en incumplimiento presentados en el Capítulo IV referente a la metodología de la presente investigación se implementaron las medidas correctivas competentes para llegar a la solución de este problema, presentado como valor agregado al proyecto actual y relacionándose en el ámbito de mantenimiento y control de herramientas, reflejando los resultados en la Tabla 12 que representa una nueva lista del avance obtenido en el tiempo de ejecución del proyecto de pasantías.

Tabla 12. Lista de Resultados de Estándares de Calidad Tratados

Estándar	Cumplimiento Inicial		Cumplimiento Final	
Posicionamiento de Pozos	Si (X)	No ()	Si (X)	No ()
Mantenimiento	Si ()	No (X)	Si (X)	No ()
Ciclo de Trabajo	Si ()	No (X)	Si ()	No (X)
Ingeniería de Perforación	Si ()	No (X)	Si (X)	No ()
Reportes de Fallas	Si ()	No (X)	Si (X)	No ()
Presión	Si (X)	No ()	Si (X)	No ()
Control de Herramientas	Si ()	No (X)	Si (X)	No ()



Como se puede notar, el avance obtenido es significativo, por lo cual se considera exitoso el proyecto realizado, sin embargo el punto referido a ciclo de trabajo debe ser tomado en cuenta para la continuación de la empresa puesta en marcha y de este modo lograr el cumplimiento total de la calidad de servicio solicitada por la empresa. En el ámbito referente a las operaciones llevadas a cabo por los motores de fondo, el mejoramiento del sistema de calidad representa un aporte significativo para la compañía pues como refleja la Tabla 12, el mantenimiento, las actividades de perforación, los reportes de fallas y el control de herramientas cumplen actualmente con los requerimientos establecidos por *Schlumberger* para garantizar la calidad de servicios prestados, premisa fundamental de la empresa a nivel mundial.

BASE DE DATOS DE POZOS Y MOTORES ESTUDIADOS

A continuación se presentan los datos de los motores seleccionados y los trabajos en los que fueron utilizados.

Tabla 13. Datos de Motores de Fondo Corridos en Macollas A y B de Zuata Principal.

Motor	Trabajo	Macolla	Hoyo [pulg]	OD [pulg]	BHA	R:E	Tipo de Lubricación
EM01	A01	A	12 ^{1/4}	8 ^{1/4}	Construcción de Ángulo	7:8	Por Lodo
	A02						
EM02	A03	A	12 ^{1/4}	8 ^{1/4}	Construcción de Ángulo	7:8	Por Lodo
	A04						
EM03	A05	A	12 ^{1/4}	8 ^{1/4}	Construcción de Ángulo	7:8	Por Lodo
	A06						
EM04	A07	A	12 ^{1/4}	8 ^{1/4}	Construcción de Ángulo	7:8	Por Lodo
	A08						
EM05	B01	B	12 ^{1/4}	8 ^{1/4}	Construcción de Ángulo	7:8	Por Lodo
	B02						
EM06	B03	B	12 ^{1/4}	8 ^{1/4}	Construcción de Ángulo	7:8	Por Lodo
	B04						
EM07	B05	B	12 ^{1/4}	8 ^{1/4}	Construcción de Ángulo	7:8	Por Lodo
	B06						
	B07						

Como se puede apreciar en la Tabla 13 existen características comunes en los motores seleccionados, el diámetro del hoyo, diámetro externo de la herramienta (OD), diseño



del BHA empleado, la relación entre el rotor y el estator (R:E) y el tipo de lubricación de los motores son rasgos que presentan afinidad debido a la geometría del pozo a perforar, afinidad que colabora en la discriminación el universo estudiado y la selección la muestra representativa

EVALUACIÓN DE PARÁMETROS OPERACIONALES

La revisión y jerarquización de la información se llevó a cabo para cada uno de los motores, evaluando los trabajos realizados y los datos operacionales referidos a ellos. A continuación se evaluó la información recolectada resumiendo los detalles de trabajos, hidráulica, mecha, información del motor y mantenimiento del mismo.

En primer lugar, la Tabla 14 resume los trabajos en los cuales se emplearon los motores estudiados, presentando parámetros relevantes como profundidad medida inicial y final, tiempo operativo, azimuth inicial y final, inclinación inicial y final, promedio de revoluciones por minuto, promedio de tasa de penetración, promedio de diferencial de presión, tasa de flujo y temperatura de circulación.

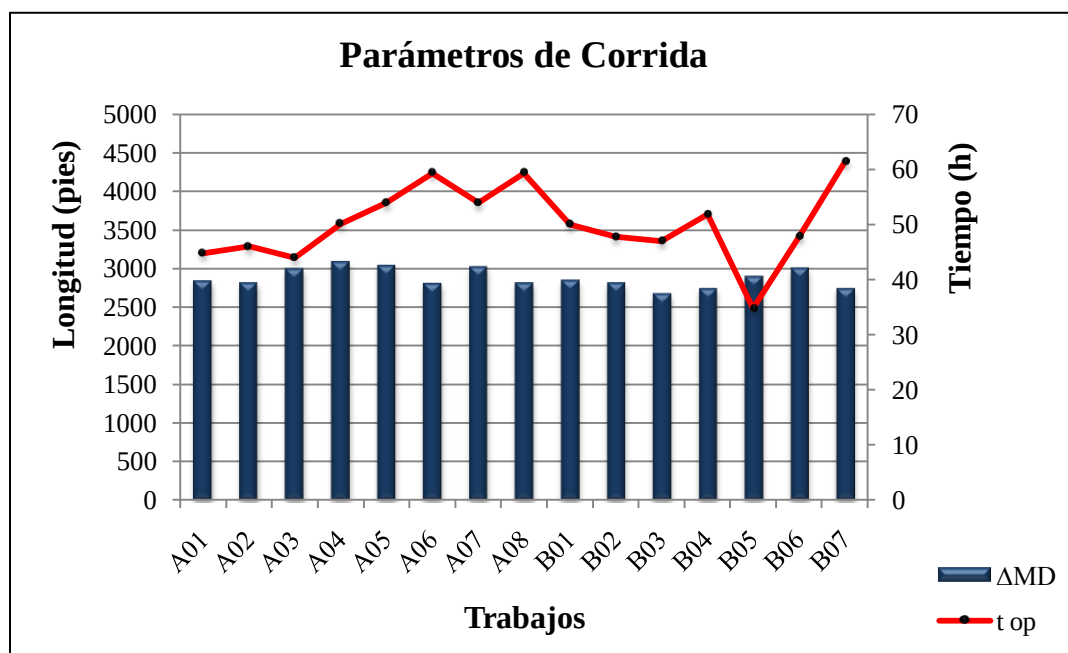


Tabla 14. Evaluación de Detalles de Corrida

Detalles de Corrida															
Parámetros	Motor EM01		Motor EM02		Motor EM03		Motor EM04		Motor EM05		Motor EM06		Motor EM07		
	A01	A02	A03	A04	A05	A06	A07	A08	B01	B02	B03	B04	B05	B06	B07
MD Inicial (pies)	440	410	400	422	390	434	395	432	527	527	510	510	521	512	685
MD Final (pies)	3275	3222	3395	3506	3428	3236	3418	3246	3369	3338	3183	3245	3414	3517	3421
t op (h)	44,80	46,00	44,00	50,16	53,90	59,30	53,90	59,30	50,00	47,75	47,00	51,82	34,80	47,82	61,30
Az. Inicial (grados)	136,2	77,43	85,15	274,9	118,7	229,1	118,7	229,1	281,7	233,2	97,44	153,3	358,6	254,4	240,2
Inc. Inicial (grados)	0,30	4,00	1,40	2,36	0,15	0,22	0,15	0,22	0,03	0,13	0,12	0,07	0,32	0,18	1,44
Az. Final (grados)	16,17	32,89	93,42	278,3	238,0	150,0	238,0	150,0	158,5	158,3	106,0	161,7	68,50	39,80	10,00
Inc. Final (grados)	82,98	80,98	81,73	80,37	81,40	82,50	81,40	82,50	80,00	79,00	79,50	83,02	80,50	80,30	79,50
RPM Prom.	40	40	40	40	44	40	44	40	40	40	40	42	40	40	40
ROP Prom. (pies/h)	210,3	193,9	168,6	141,9	145,9	280,8	145,9	280,8	144,3	139,8	284,7	187,3	133,1	113,2	148,0
ΔP Prom. (lpc)	125,3	108,2	110,0	100,5	105,0	142,2	105,0	142,2	107,1	80,00	135,0	125,0	111,0	100,0	108,0
Flujo (GPM)	555,5	550,3	550,3	550,3	536,2	550,3	536,2	550,3	511,2	560,8	576,0	557,5	515,0	580,0	564,0
T circ. (°F)	150	150	115	115	113	120	113	120	120	118	121	119	120	130	123
DLS Máximo (grados/100 pies)	5,17	5,90	5,95	6,13	4,81	7,21	6,07	5,43	4,74	5,31	5,21	6,72	5,77	5,70	4,96



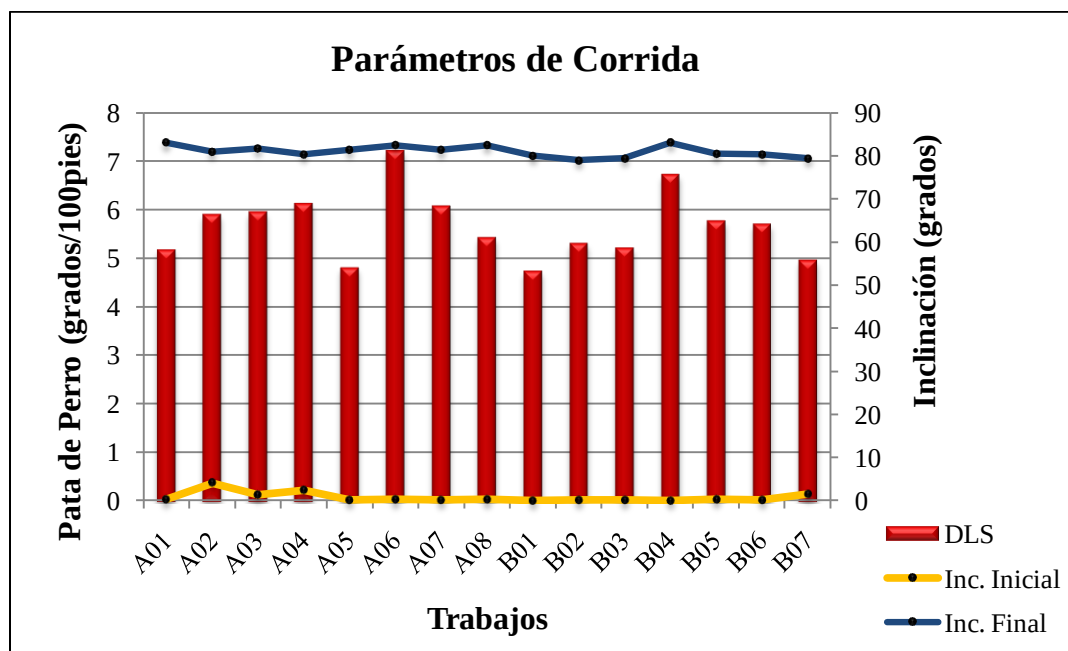
Los datos tabulados referentes a profundidad y tiempo operativo fueron graficados tal como se aprecia en la Gráfica 1, con el fin de obtener una mejor interpretación de la información recolectada y dar mayor validez a los resultados de la investigación, empleando barras para representar la longitud total perforada en cada trabajo y líneas marcadas en el caso del tiempo operativo.



Gráfica 1. Parámetros de Corrida (Profundidad y Tiempo Operativo)

En los trabajos realizados cada PDM estudiado perforó alrededor de 2800 pies en tiempos variables, siendo el promedio 50 horas. El acumulado en cada caso fue de 5600 pies perforados en 100 horas de operación aproximadamente, exceptuando el motor EM07 que por llevar a cabo un trabajo más que el resto de la muestra acumuló un total de 8600 pies perforados en 140 horas.

Por su parte los detalles de las corridas realizadas en cuanto a inclinación y severidad de *pata de perro* obtenida son representados en la Gráfica 2, usando barras y líneas marcadas para identificar las variables expresadas.



Gráfica 2. Parámetros de Corrida (*Pata de Perro* e *Inclinación*)

Tomando en cuenta los datos de inclinación obtenida, se puede notar que las operaciones corresponden a la sección de construcción de ángulo de pozos horizontales puesto que el valor inicial es inferior a los 3 grados, evidenciado por la línea amarilla lo cual indica la partida de la perforación desde una sección vertical, mientras que la inclinación final se mantuvo alrededor de los 80 grados, como expresa la línea azul, valor que representa el arranque de la sección horizontal final del pozo. Por su parte, la severidad de pata de perro complementa lo antes expuesto puesto que el pozo se considera de radio largo por presentar valores entre 1 y 6 grados de construcción de ángulo por cada 100 pies perforados.

El resto de parámetros operacionales obtenidos están dentro del rango especificado para la herramienta con un promedio de 40 RPM, ROP promedio de 180 pies por hora, caída de presión en el fondo y fuera de fondo superior a las 100 lpc, tasa de flujo alrededor de los 500 GPM y temperatura de circulación relativamente baja rondando los 120 °F.

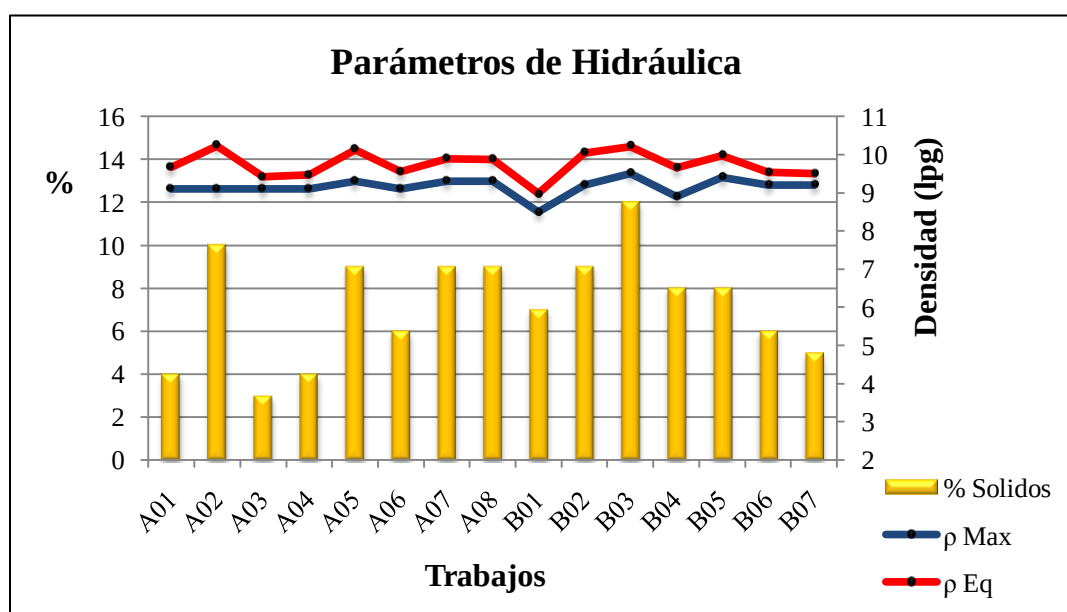
A continuación los detalles hidráulicos de los pozos perforados son tabulados como parte de la recolección de datos necesarios para la solución del problema, presentando entre otros, valores de densidad (ρ Max) máxima y equivalente (ρ Eq) del lodo en circulación.



Tabla 15. Evaluación de Detalles de Hidráulica

Detalles de Hidráulica						
Motor	Trabajo	Tipo de Lodo	ρ Máxima del Lodo (lpg)	ρ Equivalente de Circulación (lpg)	% Arena	% Sólidos
EM01	A01	Base Agua	9,10	9,67	0,25	4
	A02	Base Agua	9,10	10,23	0,25	10
EM02	A03	Base Agua	9,10	9,42	0,25	3
	A04	Base Agua	9,10	9,47	0,25	4
EM03	A05	Base Agua	9,30	9,77	0,25	9
	A06	Base Agua	9,10	9,55	0,25	6
EM04	A07	Base Agua	9,30	9,59	0,25	9
	A08	Base Agua	9,30	9,87	0,25	9
EM05	B01	Base Agua	8,50	8,99	0,25	7
	B02	Base Agua	9,20	10,05	0,25	9
EM06	B03	Base Agua	9,50	9,97	0,25	12
	B04	Base Agua	8,90	9,65	0,25	8
EM07	B05	Base Agua	9,40	9,98	0,25	8
	B06	Base Agua	9,20	9,54	0,25	6
	B07	Base Agua	9,20	9,50	0,25	5

En todos los pozos perforados por los PDM estudiados se empleó un fluido base agua con un máximo de 0,25% de arena y valores de densidad graficados a seguir en la Gráfica 3.



Gráfica 3. Parámetros de Hidráulica



Además de los datos del fluido inicial cuya densidad máxima promedio fue de 9,15 lpg, se presentan en la Tabla 15 los valores correspondientes a la densidad equivalente de circulación y el porcentaje de sólidos en el fluido circulante, parámetros que van de la mano pues dan una clara idea de la medida de limpieza de hoyo y ripios suspendidos en el lodo, apreciándose en la Gráfica 3 el aumento del peso asociado a dichos cortes representado por la curva roja. De este modo, resaltan los valores obtenidos para los motores EM03, EM04, EM05, EM06 y EM07, que evidencian un índice alto de contenido de sólidos mostrado en las barras amarillas, lo cual representa un riesgo potencial de daños a la herramienta por abrasión y taponamiento, además de fallas en la operación por el aumento del peso de la columna hidrostática en el hoyo y la falta de limpieza en el fondo.

Información adicional respecto al motor como tal es considerada en la Tabla 16 en donde se presentan parámetros tomados en cuenta a la hora de analizar los factores que inciden en el desgaste de los mismos.

Son de interés datos relacionados al ángulo del *bend housing* del motor, el número de etapas del rotor, el torque (7) reactivo, el torque (7) generado en la sección de poder y el *play* axial en los trabajos realizado, por lo cual se listan los datos obtenidos a cada categoría para cada motor y trabajo realizado. Evaluando cada uno de estos parámetros se puede encaminar el proceso jerarquización de la información recolectada a fin de obtener los puntos críticos a comparar con las especificaciones teóricas de la herramienta.

Cabe destacar que los grados reportados en la categoría de *bend housing* son los relacionados a la inclinación ajustada de la sección, es decir, al cambio de ángulo que se induce en el motor durante la etapa de preparación y mantenimiento de la herramienta según los requerimientos de campo y el plan de perforación diseñado.

Por su parte el *play* axial está vinculado al desgaste de la sección de rodamientos a causa de los esfuerzos soportados por el motor y es medido una vez se culmina el trabajo para la comparación con el valor límite permisible y la evaluación referente a una nueva corrida del motor sin necesidad de pasar por la fase de mantenimiento.



Tabla 16. Evaluación de Detalles del Motor

Detalles del Motor						
Motor	Trabajo	Bend Housing (grados)	Nº Etapas	7 Reactivo (grados)	7 Promedio (pie/Klb)	Play Axial (mm)
EM01	A01	1,83	4	60	1,60	2
	A02	1,83	4	60	2,80	3
EM02	A03	1,83	4	60	9,60	4
	A04	1,83	4	60	10,40	5
EM03	A05	1,83	4	80	6,40	3
	A06	1,83	4	80	8,60	4
EM04	A07	1,83	4	40	7,00	2
	A08	1,83	4	80	6,20	1
EM05	B01	1,83	4	30	4,80	3
	B02	1,83	4	50	4,20	5
EM06	B03	1,83	4	70	3,40	3
	B04	1,83	4	60	3,87	2
EM07	B05	1,83	4	110	7,00	1
	B06	1,83	4	120	6,20	4
	B07	1,83	4	80	6,50	3

Como se puede observar, el ajuste del *bend housing* y número de etapas del rotor son comunes para todos los motores de la muestra, hecho que concuerda con las condiciones del campo y sección de pozo perforada.

Por su parte el torque reactivo depende de los parámetros que se estén empleando en la perforación, es decir, el peso aplicado a la mecha, el diferencial de presión y la técnica desarrollada (rotación o deslizamiento), por lo cual es variable en cada trabajo ejecutado por la herramienta. Mientras que el torque evidenciado en la sección de poder va de la mano de factores como la tasa de flujo y el diferencial de presión empleado en la perforación, por lo cual los valores presentados en la Tabla 16. dependen de dichos parámetros de corrida.



Es importante el análisis de los datos referidos al *play* axial pues refleja directamente el desgaste del motor por el empuje hidráulico y la mecha. Se puede notar que en los motores EM02, EM05 y EM07 el valor acumulado es elevado, alcanzando y superando en cada caso el valor límite por especificación de 8 mm, mientras que en el caso del motor EM03 el dato no supera el límite pero se acerca con un valor de 7 mm.

El mantenimiento de motor es considerado una fase vital en el desarrollo de las operaciones de campo, por ende el estado en el cual el motor de fondo salió del centro de mantenimiento (Inicial) y terminó el trabajo (Final) es presentado en la Tabla 17. Se evalúa cada una de las partes de la herramienta para los pozos construidos, tomando en cuenta los resultados para la evaluación de la fase de mantenimiento y su impacto en el problema investigado.

Teniendo en cuenta que para cada sección existen especificaciones de mantenimiento que deben ser revisadas en campo para la evaluación de la herramienta que permitirá decidir a priori si puede o no realizar otro trabajo en condiciones que garanticen la calidad del mismo.

En el caso del *top sub* debe revisarse el estado del collar y los diámetros externo e interno del mismo, la sección de poder es evaluada con los datos de torque arrojados durante la corrida, evaluando la existencia de algún valor irregular durante la perforación, para la transmisión se observa durante la operación el peso registrado en la mecha y el diferencial de presión con el objetivo de cotejar la concordancia de los dichos elementos, el *bend housing* se revisa mediante la inspección del ángulo ajustado y el estado del collar, y finalmente la sección de rodamientos y manejo es evaluada a través de los datos de *play* presentado.



Tabla 17. Evaluación de Detalles de Mantenimiento del Motor

Detalles de Mantenimiento del Motor													
Motor	Trabajo	Top Sub		Sección de Poder		Transmisión		Bend Housing		Rodamientos		Sección de Manejo	
		Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
EM01	A01	Usado	Bueno	Usado	Bueno	Usado	Bueno	Usado	Bueno	Usado	Bueno	Usado	Bueno
	A02	Usado	Bueno	Usado	Bueno	Usado	Bueno	Usado	Bueno	Usado	Bueno	Usado	Bueno
EM02	A03	Usado	Bueno	Usado	Bueno	Nuevo	Bueno	Usado	Bueno	Usado	Bueno	Usado	Bueno
	A04	Usado	Bueno	Usado	Estator Desgastado	Usado	Bueno	Usado	Bueno	Usado	Carreras Desgastadas	Usado	Bueno
EM03	A05	Usado	Bueno	Usado	Bueno	Nuevo	Bueno	Usado	Bueno	Usado	Bueno	Usado	Bueno
	A06	Usado	Bueno	Usado	Bueno	Usado	Bueno	Usado	Bueno	Usado	Collar y Carreras Desgastados	Usado	Eje de Manejo Desgastado
EM04	A07	Usado	Bueno	Nuevo	Bueno	Usado	Bueno	Usado	Bueno	Usado	Bueno	Usado	Bueno
	A08	Usado	Bueno	Usado	Bueno	Usado	Bueno	Usado	Anillo Desgastado	Usado	Collar Desgastado	Usado	Bueno
EM05	B01	Usado	Bueno	Nuevo	Bueno	Usado	Bueno	Usado	Bueno	Usado	Bueno	Usado	Bueno
	B02	Usado	Bueno	Usado	Bueno	Usado	Bueno	Usado	Bueno	Usado	Carreras Desgastadas	Usado	Bueno
EM06	B03	Usado	Bueno	Nuevo	Bueno	Usado	Bueno	Usado	Bueno	Usado	Bueno	Nuevo	Bueno
	B04	Usado	Bueno	Usado	Bueno	Usado	Bueno	Usado	Bueno	Usado	Collar Desgastado	Usado	Bueno
EM07	B05	Usado	Bueno	Usado	Bueno	Nuevo	Bueno	Nuevo	Bueno	Usado	Bueno	Usado	Bueno
	B06	Usado	Bueno	Usado	Bueno	Usado	Bueno	Usado	Bueno	Usado	Bueno	Usado	Bueno
	B07	Usado	Bueno	Usado	Bueno	Usado	Bueno	Usado	Bueno	Usado	Collar y Carreras Desgastados	Usado	Eje de Manejo Desgastado



El estado inicial y final de las secciones del motor se evidencia en la Tabla 17 resaltando los aspectos principales asociados al desgaste de los mismos. De acuerdo a esto se puede observar que exceptuando al motor EM01, todos los equipos sufrieron desgaste. A continuación se analiza cada motor y la sección afectada.

El EM02 contaba solo con la sección de transmisión nueva o recién tratada en mantenimiento, mientras que las demás partes que lo conformaban eran usadas. En este caso la evaluación en el centro de mantenimiento evidenció un desgaste en el cuerpo del estator y en las carreras de la sección de rodamientos, coincidiendo con lo evaluado anteriormente en donde el *play* medido luego del trabajo arrojó un valor de 9 mm.

Por su parte la herramienta EM03 también contaba con una sección de transmisión nueva y demás partes usadas, presentando un desgaste en la parte interna del collar y carreras de la sección de rodamientos, además de un evidente desgaste en el eje de manejo, destacando que en los trabajos realizados por el motor se obtuvo porcentaje alto de sólidos.

Con sección de poder nueva y demás partes usadas, el motor EM04 sufrió daños en la sección de *bend housing* y rodamientos, evidenciados en desajuste del anillo de grados y desgaste interno del collar respectivamente, daños que se unen a un alto porcentaje de sólidos en el lodo durante las corridas de la herramienta.

El EM05 corrido en la macolla B contaba con una sección de poder nueva y el resto de sus partes usadas, secciones que llevaron a cabo la perforación de dos secciones de construcción de ángulo con desgaste únicamente en las carreras de los rodamientos, destacando además que el *play* acumulado para este motor fue de 8 mm.

El segundo motor evaluado en la macolla B, el EM06, fue empleado con secciones de poder y manejo nuevas, sufriendo desgaste en los trabajos realizados el interior del collar de la sección de rodamientos.

Finalmente el motor EM07, herramienta corrida 3 trabajos, contaba con secciones de transmisión y *bend housing* nuevas, evidenciando al finalizar las corridas daños en el interior del collar y en carreras de la sección de rodamientos y en el eje de la sección de manejo. Teniendo en cuenta que el *play* acumulado por este motor fue de 8 mm.



El resumen de los detalles de la mecha corrida con los motores de fondo estudiados es mostrado a continuación en la Tabla 18 destacando parámetros como tipo de mecha, peso aplicado a la misma (WOB), configuración de chorros, área total de flujo (TFA) y caída de presión en la mecha (ΔP_m).

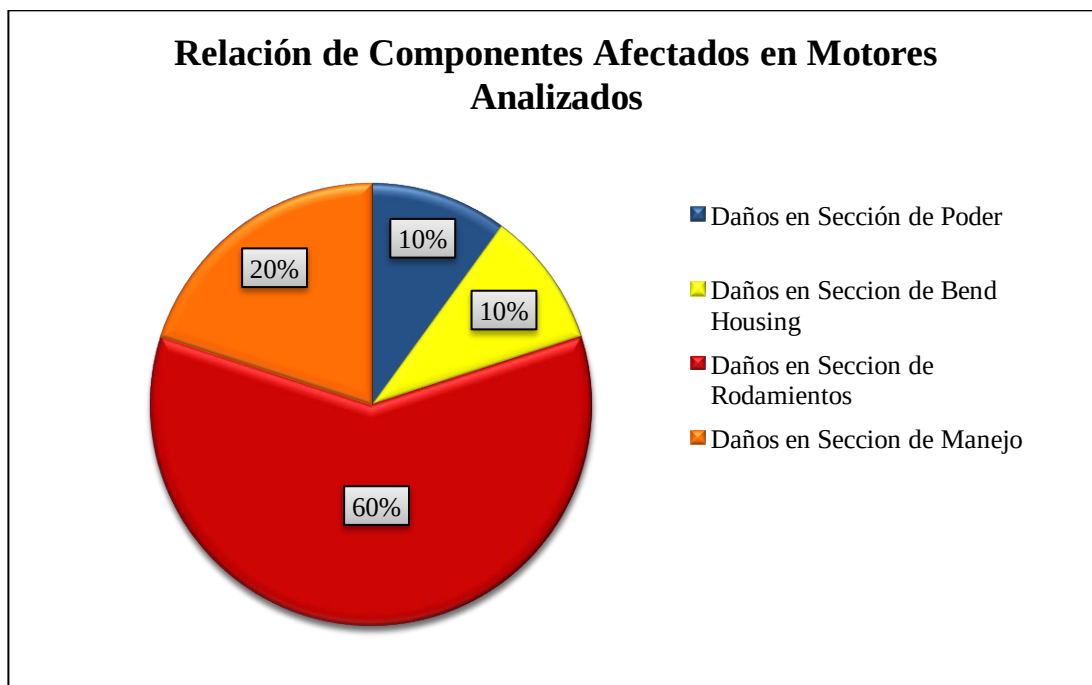
Tabla 18. Evaluación de Detalles de la Mecha

Detalles de la Mecha						
Motor	Trabajo	Tipo de Mecha	WOB (Klb)	Chorros	TFA (pulg ²)	ΔP_m (lpc)
EM01	A01	Tricónica	16,7	3 x (20/32)" 1 x (22/32)"	1,29	147,36
	A02	Tricónica	18,4	3 x (20/32)" 1 x (22/32)"	1,29	147,36
EM02	A03	Tricónica	16,4	3 x (20/32)" 1 x (22/32)"	1,29	152,33
	A04	Tricónica	18,6	3 x (20/32)" 1 x (22/32)"	1,29	152,33
EM03	A05	Tricónica	15,70	3 x (20/32)" 1 x (22/32)"	1,29	147,85
	A06	Tricónica	22,00	3 x (20/32)" 1 x (22/32)"	1,29	152,33
EM04	A07	Tricónica	20,00	3 x (20/32)" 1 x (22/32)"	1,29	155,68
	A08	Tricónica	20,50	3 x (20/32)" 1 x (22/32)"	1,29	132,80
EM05	B01	Tricónica	20,00	3 x (20/32)" 1 x (22/32)"	1,29	122,94
	B02	Tricónica	10,80	3 x (20/32)" 1 x (22/32)"	1,29	160,11
EM06	B03	Tricónica	18,50	3 x (20/32)" 1 x (22/32)"	1,29	174,42
	B04	Tricónica	17,30	3 x (20/32)" 1 x (22/32)"	1,29	130,23
EM07	B05	Tricónica	15,30	3 x (20/32)" 1 x (22/32)"	1,29	137,96
	B06	Tricónica	20,50	3 x (20/32)" 1 x (22/32)"	1,29	171,26
	B07	Tricónica	23,60	3 x (20/32)" 1 x (22/32)"	1,29	158,03

En los trabajos realizados, la mecha fue de tipo tricónica, con un peso aplicado sobre ella similar en todos los casos y configuración de 3 chorros de 20/32 pulg y 1 de 22/32 pulg, representando un área de flujo de 1,29 pulg², lo cual genera una caída de presión de 174,42 lpc en el mejor escenario, valor que se encuentra por debajo del mínimo requerido para la correcta operación de los PDM en cuestión.

La caída de presión en la mecha depende de la tasa de flujo, la densidad del lodo y el área de flujo configurada. Teniendo en cuenta que la densidad es un factor que principalmente depende de la profundidad y presiones del hoyo lo cual dificulta su manipulación para fines de operativos, y considerando que la tasa de flujo depende de la potencia de las bombas disponibles en la locación, el TFA resalta como el principal parámetro a tomar en cuenta para una manipulación en pro de la operación de PDM.

La serie de resultados analizados en el ámbito de secciones o componentes dañados son graficados para obtener una representación valida del problema tratado.



Gráfica 4. Relación de Componentes Afectados en Motores Analizados.

La Gráfica 4 divide en porcentajes las secciones que resultaron dañadas luego de los trabajos realizados por los motores, siendo la de rodamientos la de mayor desgaste



con un total de 60% de los daños sufridos por los componentes de la herramienta, seguida por la sección de manejo con 20% y solo 10% de las fallas se vincularon con las secciones de poder y *bend housing*. Cabe acotar que el *top sub* y la sección de transmisión operaron en todos los trabajos sin presentar problemas o desgaste severo.

COMPARACIÓN ENTRE VALORES PRÁCTICOS Y TEÓRICOS

Una vez obtenida la información de la serie de corridas desempeñadas por los motores de fondo estudiados se procede a la comparación entre los datos operacionales referidos y las especificaciones teóricas que las herramientas demandan. Con el fin de cotejar la data obtenida se presenta la siguiente tabla para identificar aquellos parámetros que estén fuera del rango operativo y posteriormente analizar el impacto que esto representa en las operaciones desarrolladas por los PDM.

Tabla 19. Valores Prácticos y Teóricos Comparados

Parámetros	Motores						
	EM01	EM02	EM03	EM04	EM05	EM06	EM07
γ Máximo (pies /Klb)	13,20	13,20	13,20	13,20	13,20	13,20	13,20
γ Práctico (pies /Klb)	2,20	10,00	7,50	6,60	4,50	3,64	6,57
Play Máximo (mm)	8	8	8	8	8	8	8
Play Acumulado (mm)	5	9	7	3	8	5	8
ΔPm Mínima (lpc)	250	250	250	250	250	250	250
ΔPm Práctica (lpc)	147,36	152,33	150,09	144,24	136,53	152,33	155,75
Rango de TFA (pulg²)	0,55 1,09	0,55 1,09	0,55 1,09	0,56 1,11	0,54 1,08	0,55 1,10	0,56 1,10
TFA Práctica (pulg²)	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29	1,29
RPM Máxima	40	40	40	40	40	40	40
RPM Práctica	40	40	42	40	40	41	40
Rango de GPM	300 900	300 900	300 900	300 900	300 900	300 900	300 900
GPM Práctico	555,40	550,30	543,27	529,21	536,03	566,75	553,00
T circ. Máxima (°F)	157,00	157,00	157,00	157,00	157,00	157,00	157,00
T circ. Práctica (°F)	150,00	115,00	116,50	119,00	116,00	120,00	124,33
% de Arena Máximo	1	1	1	1	1	1	1
%de Arena Práctico	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
ρ Máxima (lpg)	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00
ρ Práctica (lpg)	9,10	9,10	9,10	9,30	8,85	9,20	9,27



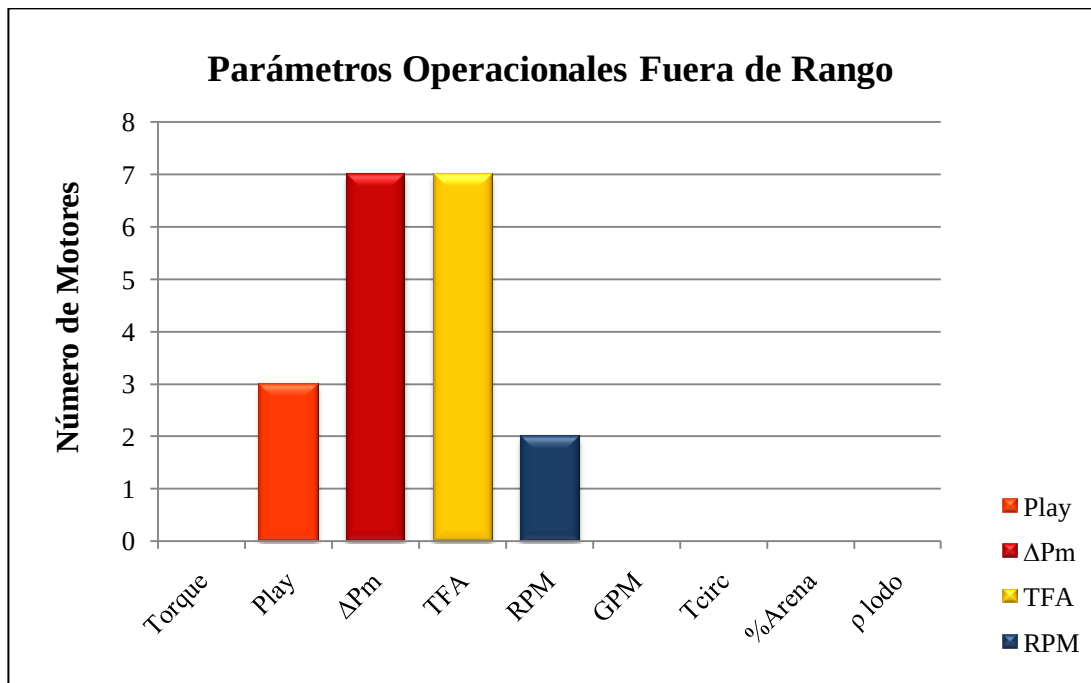
La Tabla 19 compara valores teóricos de los motores de fondo objeto de estudio como torque (7) máximo, *play* máximo, caída de presión en la mecha (ΔP_m) mínima, rango de TFA, RPM máxima permisible, rango de GPM, temperatura de circulación máxima, porcentajes máximos de arena y sólidos y densidad del lodo máxima permisible con parámetros prácticos de las operaciones desarrolladas por los mismos obtenidos en la previa jerarquización de la información como torque práctico, *play* acumulado, caída de presión en la mecha práctica, TFA práctica, RPM práctica, GPM práctica, temperatura de circulación práctica, porcentajes prácticos de arena y sólidos y densidad del lodo práctica.

Cabe destacar que debido a la sección del pozo perforada (sección de construcción de ángulo) los datos teóricos observados en la tabla son idénticos para torque máximo en la sección de poder, *play* axial limite, mínima caída de presión en la mecha, revoluciones por minuto limite, la máxima temperatura de circulación para el correcto proceder del elastómero y el máximo porcentaje de arena permitido. Evidenciando similitud además en la densidad del lodo máxima, valor que refiere únicamente el parámetro bajo el cual puede operar en forma adecuada el motor de fondo, sin tener relación alguna con la densidad de fractura de la formación perforada.

Se debe señalar también que el rango del área de flujo de los chorros de la mecha está referido a la mínima caída de presión requerida teórica (250 lpc) y se toma en cuenta respecto al valor de flujo mínimo operativo del motor y al máximo aportado por las bombas de los taladros en los que fueron desarrolladas las actividades de observación, puesto que esta última variante se encontraba por debajo del máximo valor operativo del motor, significando un máximo de 600 galones por minuto, lo cual redefine el rango mostrado en la tabla a (300 – 600) GPM para fines de su relación con el rango de TFA.

Los valores prácticos listados en la comparación, a excepción del *play* acumulado, son datos promediados de los trabajos llevados a cabo por cada uno de los motores, trabajos presentados en la sección de Evaluación de Parámetros Operacionales del presente capítulo.

La tabla 19 es representada en un gráfico de barras para adjudicar mayor validez a su análisis y obtener una respuesta clara de los factores incidentes en el desgaste de las herramientas.



Gráfica 5. Parámetros Operacionales Fuera de Rango

Como se puede notar en la Gráfica 5 los parámetros fuera de especificación en los motores de la muestra están vinculados en un alto porcentaje a la caída de presión de la mecha. El TFA influye directamente en este factor por lo cual se considera parte del mismo problema que, en conjunto con el valor de *play* axial, deben ser tomados en cuenta para identificar la causa del desgaste que dichos indicadores evidencian, considerando también el porcentaje estudiado en la relación de los componentes del motor afectados. En segundo plano queda la salida de especificación de las revoluciones por minuto puesto que el daño que puede causar este parámetro en la herramienta está relacionado al cuerpo externo del motor, problema que solo se presentó en el motor EM04 en el cual además el porcentaje de sólidos en el lodo era alto. Por su parte el torque, la temperatura de circulación, el peso del lodo y el contenido de arena en el mismo no son etiquetados como elementos directamente



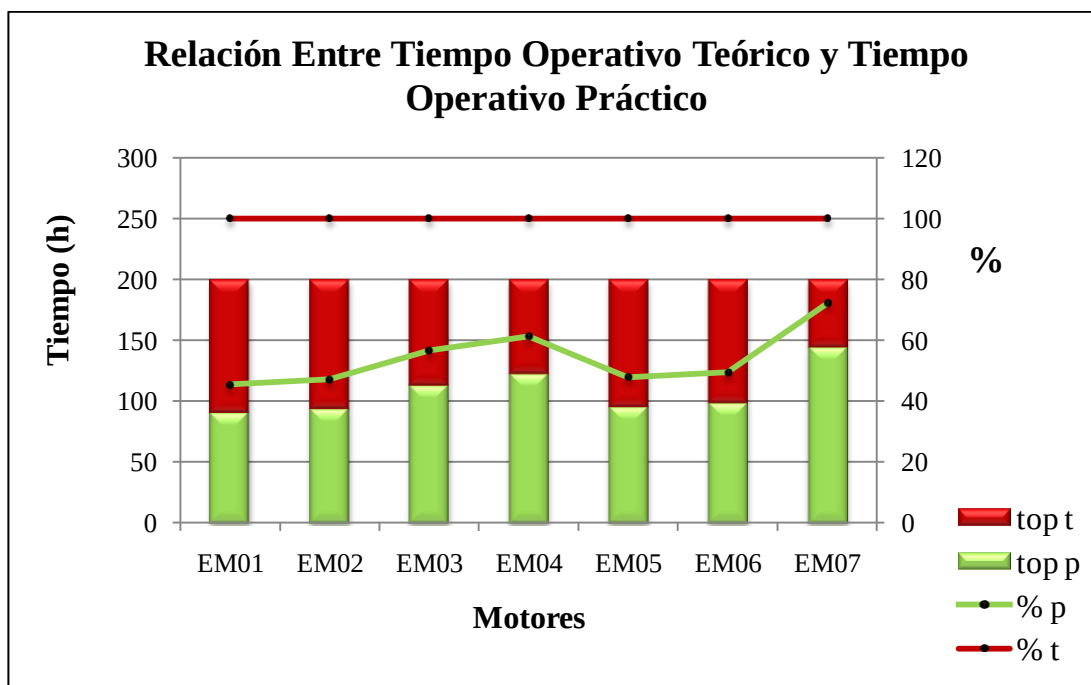
relacionados con el problema en estudio al no presentar valores fuera del rango teórico especificado para los equipos.

EVALUACIÓN DE IMPACTO EN MOTORES DE FONDO

De acuerdo a los resultados mostrados y los indicadores definidos, se evaluó el impacto del desgaste de los componentes de los motores de fondo en las actividades desarrolladas por ellos. Tal como se observa en las gráficas presentadas el principal desgaste de las herramientas está relacionado a la sección de rodamientos, viéndose afectadas tanto las carreras como la cubierta del collar de la sección. Al relacionar esto con los datos obtenidos en las tablas de la evaluación de parámetros, se observa que los valores más resaltantes en la mayoría de los motores están referidos al *play* axial y a la pérdida de presión en la mecha, factores vinculados directamente al daño en los rodamientos puesto que el desgaste de las carreras lo define en el aspecto práctico el *play* axial y por su parte el desgaste de interno del collar se debe al *play* radial, presentando como factor común la falta de lubricación en la zona debido a la ausencia de la diferencia de presión necesaria en la mecha para que el lodo pase a dicha área. Las fallas en el eje de manejo están relacionadas de igual forma al desgaste de los rodamientos, debido a que por la falta de lubricación se produce el incremento del *play* radial que induce el choque entre las carreras y dicho componente de manejo debilitándolo y ocasionando su desgaste prematuro.

RELACION ENTRE TIEMPO OPERATIVO Y DE MANTENIMIENTO

Dos indicadores empleados en la investigación para identificar el impacto de los factores fuera de especificación en los motores de fondo estudiados y las operaciones que ellos desarrollan son el tiempo operativo y el tiempo de mantenimiento de las herramientas, indicadores vinculados directamente con los costos en los que incurre la compañía, puesto que en la industria las ganancias dependen en gran medida del tiempo. A continuación se relacionan dichos indicadores presentando en primer lugar la comparación entre el tiempo operativo que deberían cumplir los motores estudiados y el observado en la experiencia de campo.



Gráfica 6. Relación Entre Tiempo Operativo Teórico y Práctico

La Gráfica 6 muestra el tiempo operativo teórico (top t) que deben cumplir los motores de fondo estudiados que, como denotan las barras rojas, es el mismo en todos los casos por tener características similares debido a la sección del pozo construida, esto es comparado con el tiempo observado en la experiencia de campo (top p) tabulado en el segmento de Evaluación de Parámetros Operacionales del presente capítulo y mostrado como barras verdes en la gráfica. En la totalidad de las herramientas el tiempo real es menor que el teórico y ese porcentaje (% p) se representa en la curva verde, en donde se puede notar la diferencia existente con respecto al tiempo esperado (% t). Dicha diferencia supone pérdidas económicas por la excesiva demanda de mantenimiento que evidencian estos equipos, destacando que es dicha recurrencia el factor que influye en el problema estudiado ya que por políticas internas de transporte el tiempo de mantenimiento para motores de fondo es constante fijado en 24 horas, valor que al ser comparado con el tiempo operativo evidencia el mismo comportamiento en términos teóricos y prácticos que la gráfica descrita anteriormente.

CAPÍTULO VI

LA PROPUESTA

DEFINICION DE PLAN DE ACCION PARA MITIGAR DESGASTE DE MOTORES DE FONDO EN EL CAMPO ZUATA PRINCIPAL

La elaboración de una propuesta para contrarrestar el problema presentado debe partir de los factores identificados como incidentes en el mismo, al conocerlos gracias a la investigación realizada y análisis de los resultados obtenidos, se hizo posible la evaluación de las diversas opciones que se pueden adoptar para mitigar el impacto de dichos factores sobre los motores de fondo. El diagrama expuesto en la Figura 31 evidencia los pasos seguidos para el planteamiento de dichas opciones,



Figura 31. Diagrama de Formulación de Propuesta de Mitigación

Identificación de Problemática Asociada a la Reducción del Tiempo Operativo y Desgaste de los Motores de Fondo Estudiados

Según los resultados obtenidos, los principales factores asociados al problema planteado son los parámetros operacionales fuera de rango, es decir, aquellos elementos fuera de especificación que están relacionados a las corridas llevadas a cabo por los motores de la muestra. De acuerdo a la comparación entre datos teóricos y prácticos, los parámetros asociados a la reducción de tiempo operativo y desgaste



de los PDM son el *play* axial, la caída de presión en la mecha, el área de flujo de los chorros de la mecha y las revoluciones por minuto a las cuales fueron sometidas las herramientas. Esta identificación se realizó mediante el análisis y jerarquización de los datos fuera de rango en tablas y gráficas para obtener el orden de recurrencia de fallas de los motores tratados, factor que permitió establecer el orden de importancia de los parámetros mencionados. De este modo se pudo determinar su relación con las secciones afectadas de los motores, concluyendo que el mayor numero de daños los sufrió la seccion de rodamientos, destacando como puntos de interés el *play* axial del motor, la caída de presión en la mecha y el área de flujo de los chorros de la misma puesto que son factores vinculados a la sección en cuestión.

Cabe destacar que el *play* axial es una medición realizada posterior a la corrida, siendo un indicador del desgaste sufrido por los rodamientos pero presentando la imposibilidad de ser manipulado a conveniencia de los requerimientos de la corrida a diferencia del área de flujo y caída de presión en la mecha que son factores relacionados entre sí y que pueden ser determinados según lo demande la operación. En el caso de la sección de manejo, los daños sufridos están relacionados a los rodamientos afectados, puesto que en todos los casos de fallas referentes a esta sección, el componente involucrado fue el eje de manejo, desgastado por el choque del collar interno con su estructura debido a la falta de estabilidad radial, factor proporcionado por la sección de rodamientos.

Finalmente, los daños relacionados a las secciones de poder y *bend housing* se consideran hechos aislados por solo afectar a un motor de la muestra y no vincularse con parámetros fuera de rango para las corridas realizadas, ya que los motores EM02 y EM04, herramientas asociadas a las fallas descritas, únicamente evidenciaron problemas con la caída de presión de la mecha y el TFA de la misma.

Como se puede notar, las revoluciones por minuto, factor identificado por estar fuera del rango teórico, no presenta ninguna relación con el problema principal planteado.



Evaluación de Hidráulica

Como se estudio previamente el componente más afectado en las herramientas de la muestra es la sección de rodamientos y la causa principal es la falta de lubricación de los mismos por el bajo diferencial de presión generado en la mecha, en base a esto se analizan las opciones disponibles. En primer lugar se plantea la posibilidad de atacar directamente la falta de lubricación de la sección a través del diseño de un programa hidráulico que contemple el aumento de diferencial de presión en la mecha y así mitigar el problema asociado a ello. Para esto se deben considerar los principales parámetros para el diseño un programa hidráulico optimo en el tipo de operación a realizar, siendo la velocidad de los chorros de la mecha, la máxima potencia hidráulica y el máximo impacto hidráulico algunos de los factores más importantes en dicho diseño, tomando en cuenta que en cada uno de ellos el área de flujo de los chorros de la mecha y por ende la caída de presión en ella es fundamental, se propone un planteamiento inicial para la elaboración de dicho estudio.

Tabla 20. Justificación de Diseño Hidráulico

Parametros	Fundamentos	Limitaciones	Diseño
ΔP_m (lpc)	250	Valor mínimo para lubricación de rodamientos	250 o mayor
GPM	600	Valor máximo aportado por las bombas en los trabajos estudiados	(300 – 600)
TFA (pulg ²)	Dato en diseño	Valor máximo para generar caída de presión de 250 lpc en la mecha	1,1015
ρ Max (lpg)	9,15	Valor promedio de las corridas evaluadas	9,15
Configuración de Chorros	Dato en diseño	Configuración óptima para generar caída de presión de 250 lpc en la mecha	3x(18/32)'' 1x(20/32)''

 **Fundamentos:** Teniendo en cuenta que la mínima caída de presión necesaria en la mecha para la lubricación de la sección desgastada de los motores estudiados es 250 lpc y que en los trabajos documentados las bombas



aportaron un máximo de 600 GPM, se redefine el límite máximo de flujo a dicho valor y por ende su TFA asociado. Este último parámetro es obtenido a partir de la Ecuación 1. Fijando el valor requerido de ΔP_m (250 lpc), asumiendo un coeficiente de descarga de 0,95 y tomando en cuenta el promedio de ρ Max (9,15 lpg) se obtiene el dato de TFA asociado al valor límite de 600 GPM.

- ✚ Diseño:** Al llevar a cabo los cálculos pertinentes mediante el procedimiento indicado, el valor propuesto de TFA es 1,1015 pulg², puesto que representa el máximo valor permisible en el diseño del programa hidráulico para garantizar la caída de presión mínima en la mecha que a su vez asegure la lubricación de los rodamientos del motor y por ende la solución del problema evaluado. Dicho TFA presenta una configuración de chorros asociada de 3x(18/32)” y 1x(20/32)” obtenida a través de la Ecuación 2, que permite la obtención del diámetro de los chorros para un TFA definido mediante la iteración del método de cálculo del parámetro deseado variando de 4 a 1 el valor del número de chorros (N) relacionados al TFA restante. De este modo, el planteamiento queda definido por el rediseño del área de flujo de la mecha a un valor de 1,1015 pulg², obtenido gracias a una configuración de 3 chorros de 18/32” y 1 chorro de 20/32”.
- ✚ Limitaciones:** El diseño del programa hidráulico es llevado a cabo por parte de la compañía operadora, es decir, el cliente, esto es considerado como limitación debido a que representa una actividad ajena a *Schlumberger*, lo cual impide la implementación inmediata del planteamiento expuesto, sin embargo, la propuesta significa el punto de partida para la solicitud del rediseño indicado basándose en el interés común y correcto desenvolvimiento de las operaciones desarrolladas.



Cambio De Motores Empleados

En segundo lugar se pone sobre la mesa eliminar la lubricación como tal de la sección de rodamientos con la implementación de un modelo de motores de fondo que no requieran del lodo para dichos efectos.

✚ **Fundamento:** Contemplando el estudio económico y operativo de motores de fondo de desplazamiento positivo de lubricación autónoma en el campo Zuata Principal como una propuesta alternativa, investigación en la cual se tomen en cuenta factores como disponibilidad de los motores referidos, beneficios económicos para la compañía, costos asociados al mantenimiento de la tecnología y aceptación del cliente.

✚ **Limitaciones:** Este tipo de motores presenta dos principales desventajas relacionadas a la economía y su mantenimiento, ambas motivadas al sistema de lubricación integrado que posee. En primer lugar por la complejidad de su estructura es una herramienta más costosa en su fase de desarrollo, y en cuanto al ámbito de mantenimiento demanda mayor tiempo de restauración y presenta problemas con el sello de la sección de lubricación

Para ambos casos se debe realizar un estudio detallado y profundo a fin de presentar una propuesta con fundamentos teóricos y experimentales que arrojen beneficios tanto para la empresa operadora como para *Schlumberger*, velando por los intereses de ambas compañías y resaltando la importancia que supone para las operaciones futuras en el campo Zuata Principal.



CONCLUSIONES

- ✚ La corrida fuera de especificación de los motores de fondo de SLB D&M East Venezuela es el principal factor de desgaste y reducción de tiempo operativo en el campo Zuata Principal, identificando parámetros operacionales fuera de rango como insuficiente caída de presión en la mecha y amplia área de flujo de los chorros de la misma como elementos a modificar para mitigar el problema planteado.
- ✚ La reducción del tiempo operativo, asociada a la alta demanda de mantenimiento de los PDM corridos en Zuata Principal, se debe al desgaste prematuro por concepto de la falta de lubricación de la sección de rodamientos, falla atribuida a la insuficiente caída de presión en la mecha.
- ✚ Los principales problemas identificados en los PDM estudiados, se relacionaron a las secciones de poder, *bend housing*, rodamientos y manejo, evidenciando de acuerdo a la base de datos elaborada desgaste en estatores, anillos graduados, carreras y collares de rodamientos y ejes de manejo.
- ✚ El tiempo de mantenimiento de los PDM carece de impacto en la economía de la empresa por ser un factor constante motivado a la política interna de seguridad y transporte, sin embargo el tiempo operativo incide en dicho ámbito pues se relaciona directamente con la disponibilidad de las herramientas.
- ✚ La propuesta para incrementar el tiempo operativo de los PDM en la perforación de la sección de construcción de ángulo debe someter a estudio dos escenarios basados en el rediseño hidráulico y el cambio de herramientas para determinar cuál es el más apropiado para mitigar el efecto del desgaste prematuro de los equipos.



RECOMENDACIONES

- ✚ Se recomienda evaluar técnica y económicamente las dos opciones presentadas en la propuesta para el incremento del tiempo operativo y la disminución de la demanda de mantenimiento de los PDM.
- ✚ Elaborar una base de datos completa tomando en cuenta parámetros teóricos, operacionales y de mantenimiento de las herramientas estudiadas.
- ✚ Definir indicadores de rendimiento de acuerdo a las variables seleccionadas.
- ✚ Considerar y valorar la calidad de servicio como marco primordial en cualquier investigación relacionada al área de operaciones de campo.
- ✚ Considerar la posibilidad de realizar estudios posteriores con PDM que cuenten con componentes totalmente nuevos.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Cedeño M. y Pirela L. (2003). Relación entre compromiso organizacional y calidad de servicio en procesos de fusión en una empresa del sector bancario. Universidad Católica Andrés Bello.

- [2] Méndez, C. (1999). Metodología, diseño y desarrollo del proceso de investigación. Colombia. McGraw Hill Interamericana S.A.

- [3] Arias, F. (2006). El proyecto de investigación. Guía para su elaboración. Orial Ediciones. Editorial Episteme.

- [4] Arévalos F., Diego V. (2010). Optimización de la perforación direccional y horizontal en el campo Auca Sur. Universidad Central de Ecuador.

- [5] Schlumberger. (1996). Directional Drilling Training Manual.

- [6] Universidad Central de Venezuela. Escuela de Petróleo. Pozos I: Perforacion vertical, horizontal y direccional controlada. Caracas: Pedro Diaz.

- [7] Alemi, H. *Mud Motors*. United Kingdom: Schlumberger.

- [8] Figueredo, C. *Motor Preparation*. Schlumberger.

- [9] Zambrano y otros. (2009). *Mega integrated reservoir study for assesing reserves in Orinoco Oil Belt* (Faja Petrolífera del Orinoco). PDVSA.

- [10] Figueroa C., Yovanny A. (2008). Estudio de aplicación y simulación numérica de la tecnología VAPEX en un área seleccionada del bloque Carabobo 1, área Carabobo, Faja Petrolífera del Orinoco. Universidad Central de Venezuela.



- [11] Espinoza G., Rosa V. (2008). Estudio del comportamiento del proceso HASD en arenas delgadas del área San Diego, bloque Junín. Universidad Central de Venezuela.
- [12] González de J. Clemente. (1980). Geología de Venezuela y de sus cuencas petrolíferas. Caracas. Editorial Foninves. 1031p.
- [13] Acuña B., Alberto D. (2008). Estudio comparativo de fuentes de energía sísmica sobre la Faja Petrolífera del Orinoco. Universidad Simón Bolívar.
- [14] (2010). Desarrollo integral del bloque Junín Faja Petrolífera del Orinoco. Ponencia presentada en el 2do Congreso Internacional de Crudos Pesados. Maturín: PDVSA, División Junín.
- [15] Schlumberger. (2010). Backgrounder. Obtenida el 28 de Mayo de 2011, de <http://www.slb.com/about/who/backgrounder.aspx>.
- [16] Schlumberger. Segmento D&M. (2011). Estándares de calidad de servicio. Houston: Cross, B. y otros.
- [17] Universidad Pedagógica Experimental Libertador. Vicerrectorado de Investigación y Postgrado. (2002). Manual de trabajos de grado de especialización y maestría y tesis doctorales. Caracas.
- [18] Castro, F. (2003). El proyecto de investigación y su esquema de elaboración. Caracas. Editorial Uyapar.
- [19] Morante Hernández, Y. del C. (2008). Propuesta de un modelo de gestión de la calidad para la mejora de las competencias del recurso humano de la División de Producción de Vacunas Virales del Instituto Nacional de Higiene “Rafael Rangel”.



GLOSARIO

Azimuth:

En conjunto con la inclinación, el azimut es vital a la hora de orientar el pozo en la trayectoria deseada. Se define como el Angulo de desviación del hoyo medido en sentido horario desde el norte verdadero.

Crossover:

Para fines del presente trabajo, se denomina *crossover* a la tubería empleada para el cambio de diámetro entre componentes de la sarta de perforación.

Desvío:

Es la distancia medida en una línea imaginaria horizontal desde cualquier punto del hoyo al eje vertical de referencia.

Dirección:

La orientación o dirección del pozo es medida en un plano horizontal hacia el este u oeste para determinar el desplazamiento del mismo.

End of Build Up (EOB):

Es la profundidad en la cual finaliza el incremento de ángulo del pozo.

End of Drop (EOD):

Es la profundidad en la cual la reducción de ángulo del pozo se detiene.

Giro:

Refiere el movimiento necesario desde superficie para concretar un cambio en la dirección del pozo.



Inclinación:

La inclinación del pozo es uno de los factores más importantes en la perforación direccional y se resume como el ángulo de desviación de la trayectoria del pozo respecto a la vertical.

Máxima Carga Absoluta:

En caso de atascamiento de la mecha, representa la carga máxima que puede ser aplicada al motor para liberarla antes de generar la ruptura de la herramienta.

Máxima Carga en *Motor Catcher*:

En caso de activación del sistema *Motor Catcher*, representa la carga máxima que puede ser aplicada al cuerpo del mismo para el correcto desenvolvimiento de la tecnología.

Máxima Tensión Operativa:

En caso de atascamiento de la mecha, representa la carga máxima que puede ser aplicada al motor para liberarla y continuar con las operaciones.

Meridiano Verdadero Universal:

Es el círculo máximo que describe la esfera terrestre pasando por los polos geográficos norte y sur.

***Motor Catcher*:**

El *Motor Catcher* es una tecnología diseñada para asegurar el ensamblaje interno del motor al momento de algún problema de hoyo que ocurra por debajo de la sección de poder del motor. Este elemento se enrosca en el rotor que a su vez asegura el estator a la hora de recuperar el sistema interno del collar dañado.



Movimientos Epirogénicos:

Son desplazamientos verticales de las placas tectónicas que pueden o no, producir plegamientos en la superficie terrestre, movimientos evidenciados en la transgresión o regresión de los mares de algunas regiones.

Movimientos Orogénicos:

Son desplazamientos horizontales de las placas tectónicas que producen cambios en la superficie de terrestre a causa de la convergencia, divergencia o movimiento lateral de las mismas, produciendo plegamiento o deformaciones de estratos evidenciados en la formación de relieves como montañas.

Norte de Cuadrícula ^[5]:

La dirección desde cualquier locación geográfica, dentro de un sistema de red paralelo al Meridiano Verdadero Universal definido por observación de Polaris.

Norte Magnético ^[5]:

Se habla de norte magnético al referir la dirección desde cualquier punto en la superficie terrestre al polo norte magnético.

Norte Verdadero:

Es la dirección del polo norte geográficamente hablando, ubicado sobre el eje de rotación de la Tierra.

Objetivo o Target:

El *Target* representa el objetivo geológico requerido representado como profundidad, dicho objetivo refiere la ubicación de una zona de interés identificada como yacimiento de hidrocarburo para fines de la presente investigación.



Polaris:

Polaris es el nombre de la estrella más brillante del sistema Osa Menor, denominada también estrella polar, es la masa incandescente más cercana al polo norte geográfico.

Polo Norte Magnético:

Es el punto del globo terráqueo en el cual convergen las líneas de campo magnético de la tierra en el hemisferio norte, se mueve constantemente por lo cual no es un punto de referencia geográfica fijo.

Profundidad Medida (MD) ^[4]:

La distancia relacionada a la trayectoria del pozo medida desde la mesa rotaria hasta su profundidad actual o final siguiendo la dirección del mismo es denominada Profundidad Medida o *Measure Depth* por su traducción al inglés.

Profundidad Vertical Verdadera (TVD):

La Profundidad Vertical Verdadera o TVD (*True Vertical Depth*) por sus siglas en inglés representa la distancia medida en una línea vertical imaginaria desde la mesa rotaria hasta la profundidad actual o final del pozo.

Punto de Arranque (KOP):

Es la profundidad en la cual se inicia la desviación intencional del pozo en una dirección determinada. También llamado *Kick Off Point*, representa el inicio de la sección de construcción de ángulo.

Radio de Curvatura:

Existe una relación entre la tasa de ganancia o pérdida de ángulo en la perforación direccional y el radio de curvatura del pozo, definiendo este último como la longitud de la línea curva descrita por la trayectoria del pozo desde la KOP hasta el EOB o EOD según sea el caso.



Rodamientos:

Son elementos mecánicos encargados de reducir la fricción entre un eje y los componentes unidos a él, soportando cargas radiales y axiales inducidas por esfuerzos del mismo corte.

Start of Drop:

Es el nombre otorgado a la profundidad en la cual se inicia la reducción de ángulo del pozo. Algunos autores se refieren a ella como un KOP secundario.

Torque Reactivo:

El concepto de torque reactivo está asociado al sistema motor – mecha – formación y no es más que la resistencia que presenta la formación a la rotación de la mecha hacia la derecha inducida por el motor de fondo, generando una reacción del BHA evidenciada por su giro en sentido contrario (hacia la izquierda). El torque reactivo es un término asociado al motor y no a la formación aunque esta tenga mucha influencia en el movimiento de la sarta de acuerdo a su dureza.



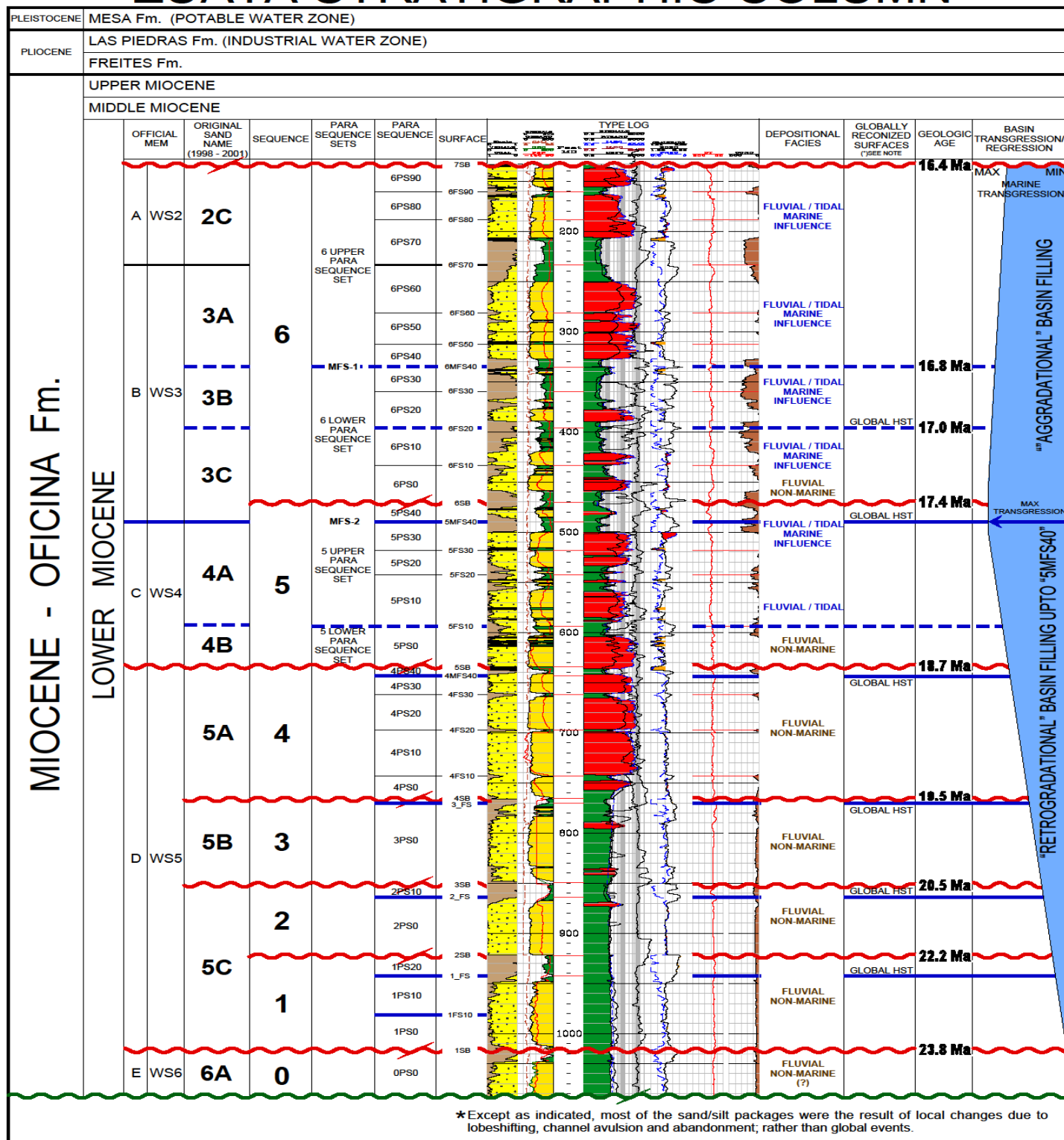
ANEXOS



ANEXO 1
COLUMNA ESTRATIGRÁFICA DEL CAMPO ZUATA PRINCIPAL
FORMACIÓN OFICINA AMPLIADA
PDVSA



ZUATA STRATIGRAPHIC COLUMN



SEPTEMBER 03, 2003



ANEXO 2

**POSTER IMPLEMENTADO COMO CAMPAÑA DE CONCIENTIZACION
CALIDAD DE SERVICIO, RESGUARDO DE AMBIENTE Y SEGURIDAD
SCHLUMBERGER**

