



**EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO DEL USO DE LA VARILLA CONTINUA EN  
SISTEMAS DE BOMBEO POR CAVIDADES PROGRESIVAS EN CAMPO  
CASABE.**

**DANIEL FERNANDO CARREÑO DIAZ**

**JUAN DAVID SANCHEZ BERDUGO**

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

**2018**



**EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO DEL USO DE LA VARILLA CONTINUA EN  
SISTEMAS DE BOMBEO POR CAVIDADES PROGRESIVAS EN CAMPO  
CASABE.**

**DANIEL FERNANDO CARREÑO DIAZ  
JUAN DAVID SANCHEZ BERDUGO**

Proyecto de Grado presentado como requisito para optar por el título de Ingeniero  
de Petróleos

Director

**ERIK GIOVANY MONTES PÁEZ**  
Magíster en Ingeniería de Hidrocarburos

Codirector

**JORGE MARIO DOVAL DORADO**  
Ingeniero de Petróleos

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

**2018**



## Dedicatoria

A Dios por darme la vida, por regalarme salud, sabiduría y una linda familia; por ser mi guía y fortaleza en cada momento.

A mi madre Zuleima Díaz Barreto por enseñarme que no hay límites para soñar, por confiar siempre en mis capacidades y apoyarme en las adversidades, por ser el mejor ejemplo de humildad y lucha constante, no me alcanzaran los años para recompensar tanto sacrificio.

A mi padre Luis Edin Carreño por su apoyo incondicional, por creer plenamente en mí, por enseñarme que con esfuerzo y disciplina todo se puede alcanzar.

A mis hermanos Henry, Fabián, Stiven, Erika y Tania que los quiero mucho. Ruego porque Dios nos permita estar siempre unidos. Gracias por toda la confianza depositada, nunca los voy a defraudar.

A mi tía Idaly Carreño quien siempre ha estado incondicionalmente para apoyarme, por sus buenos deseos y cariño.

A toda mi familia que siempre están en mis oraciones, muchas gracias por su apoyo y consejos en todo momento. Sé que están orgullosos con este logro.

A Juan David, por ser un excelente compañero de proyecto, por enseñarme muchas cosas y por la paciencia que tuvo en todo momento, muchas gracias!

A mis amigos y compañeros de estudio, aquellas personas con las que compartí experiencias durante esta etapa de mi vida, muchas gracias por su constante colaboración.

**Daniel Fernando Carreño Díaz**



## Dedicatoria

A Dios, por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

A mis padres, Nubis y David, por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, por los ejemplos de perseverancia y constancia que los caracterizan y que me han infundado siempre, por el valor mostrado para salir adelante pero más que nada, por su amor.

A mis amigos, quienes nos apoyamos mutuamente en nuestra formación profesional, Álvaro, Diana, Jose, Melvin, Diego y por último a Daniel por haberme ayudado a realizar este trabajo de grado.

**Juan David Sánchez Berdugo**



## AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

A la Universidad Industrial de Santander, por formarnos como profesionales a partir de su fuente de conocimiento y excelencia académica.

A los docentes de la Escuela de Ingeniería de Petróleos por enseñarnos todo lo relacionado con la industria del petróleo.

A ECOPEPETROL S.A por permitirnos desarrollar este proyecto en el campo Casabe, con el acompañamiento de excelentes profesionales.

Al ingeniero Erik Giovany Montes, por toda su dirección, apoyo y disposición para llevar acabo los objetivos del proyecto, así como su compromiso con el mismo.

Al ingeniero Jorge Mario Doval, por quien este proyecto fue posible, por brindarnos esta oportunidad y la confianza para compartir su conocimiento y experiencia, así como su inmensa paciencia y constante apoyo.

A todo el equipo de la Alianza Casabe, por considerarnos parte de esa gran familia, por enseñarnos muchas cosas valiosas, por haber hecho que el tiempo en el campo fuera una experiencia inolvidable.



## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	16
1. GENERALIDADES .....	18
2. SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL DE BOMBEO POR CAVIDADES PROGRESIVAS .....	20
2.1 GENERALIDADES .....	20
2.2 CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS PCP .....	20
2.3.1 Corod DER 8.5.....	24
2.3.2 Corod SWR 8.5 – 6.....	24
2.3.3. Corod SER 8.5 – 6.....	25
2.3.4. Corod DWR 8.5 – 6.....	25
2.3.5. PROROD 960M.. .....	25
2.3.6 PROROD 970N.....	25
2.4 VENTAJAS DEL USO DE LA VARILLA CONTINUA .....	26
2.5 DESGASTE SOBRE LA VARILLA Y TUBERIA DE PRODUCCIÓN.....	26
2.5.1. Cargas de contacto entre tubería y varilla.....	26
2.5.2 Desgaste sobre la tubería de producción.....	28
2.5.3 Desempeño de la bomba con el uso de la varilla continua.. .....	29
3. CREACIÓN DE BASE DE DATOS .....	30
3.1 CONSTRUCCIÓN DE LA BASE DE DATOS DE LOS POZOS CON TRABAJOS DE MANTENIMIENTO DE SARTA DE VARILLAS CONTINUA.....	31
3.2 DISEÑO DE UN SISTEMA DE BOMBEO PCP USANDO EL SOFTWARE PC-PUMP. ....	33
3.2.1 Geometría del pozo.....	33
3.2.2 Configuración del equipo. . . . .	35
3.2.3 Propiedades de los fluidos. ....	36
3.2.4 Condiciones de operación.....	36
3.2.5 Análisis de resultados. ....	38
3.2.6 Análisis auxiliares. ....	39
3.3 CONSTRUCCIÓN DE LA BASE DE DATOS DE LOS POZOS QUE HAYAN UTILIZADO AMBOS TIPOS DE VARILLA (CONVENCIONAL Y CONTINUA). ..	40
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	41

4.1. ANÁLISIS GENERAL DE LOS POZOS OBJETO .....	41
4.1.1. Análisis por grado de varilla.. .....	42
4.1.2. Análisis por tipo de pozo y diámetro de la varilla.. .....	43
4.1.5. Análisis por condición.. .....	49
4.3 AJUSTE DE LA CORRELACIÓN DE DESGASTE DE LA TUBERÍA UTILIZADA POR EL SOFTWARE PC-PUMP .....	56
4.4 ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DESEMPEÑO DE LA VARILLA CONTINUA CON RESPECTO A LA VARILLA CONVENCIONAL. ....	65
5. FLUJOGRAMA OPERATIVO PARA LA SELECCIÓN, CRITERIO DE REUTILIZACIÓN, TRAZABILIDAD Y ALMACENAMIENTO DE LA VARILLA .....	69
6. CONCLUSIONES .....	76
7. RECOMENDACIONES.....	78
BIBLIOGRAFÍA.....	79

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Campo Casabe (bloques).....	18
Figura 2. Componentes del sistema PCP .....	21
Figura 3. Flujograma para diseño apropiado de sistemas PCP.....	23
Figura 4. Carreto de varilla continua.....	29
Figura 5. Reporte de servicio de <i>pulling</i> de varilla continua.....	32
Figura 6. Reporte de calibración e inspección de la varilla continua.....	34
Figura 7. Pantalla inicial para la carga de datos de la geometría del pozo en PC-Pump .....	37
Figura 8. Visualización de la gráfica de severidad del <i>dogleg</i> vs profundidad .....	37
Figura 9. Equipos de superficie y subsuelo de un sistema PCP .....	38
Figura 10. Cargas de contacto entre la varilla y tubería.....	39
Figura 11. Visualización de los resultados de desgaste de la tubería.....	40
Figura 12. Gráfica de desgaste de la tubería en función del tiempo .....	41
Figura 13. <i>Run life</i> promedio por grados de varilla. ....	42
Figura 14. <i>Run life</i> promedio por tipo de pozo según su geometría.....	44
Figura 15. <i>Run life</i> promedio por diámetro de la varilla.....	44
Figura 16. <i>Run life</i> promedio por inclinación máxima de los pozos. ....	45
Figura 17. <i>Run life</i> promedio por rangos de máximos <i>dogleg</i> .....	46
Figura 18. Gráfico comparativo <i>run life</i> acumulado promedio BM vs PCP. ....	47
Figura 19. <i>Run life</i> promedio por grados en pozos con sistema de bombeo mecánico. ....	47
Figura 20. <i>Run life</i> y RPM de los pozos con falla por varilla. ....	48
Figura 21. Desgaste vs <i>Run Life</i> de los pozos con falla de varilla .....	50
Figura 22. <i>Run life</i> promedio por grados, criterio: geometría del pozo. ....	51
Figura 23. <i>Run life</i> promedio por grados, criterio: máximos <i>doglegs</i> . ....	52
Figura 24. Distribución porcentual de grados de varilla continua usada en los pozos objeto de estudio.....	53

Figura 25. Vida útil de la tubería de producción vs RPM para pozos con un <i>dogleg</i> máximo entre 1 y 2.15°/100 ft. ....	54
Figura 26. Vida útil de la tubería de producción vs RPM para pozos con un <i>dogleg</i> máximo mayores a 2.15°/100 ft. ....	54
Figura 27. Vida útil de la tubería de producción vs desgaste para pozos con un <i>dogleg</i> máximo entre 1 y 2.15°/100 ft. ....	55
Figura 28. Vida útil de la tubería de producción vs desgaste para pozos con un <i>dogleg</i> máximo mayor a 2.15°/100 ft. ....	55
Figura 29. Profundidad medida vs severidad del <i>dogleg</i> pozo CBE-X.....	57
Figura 30. Gráfica cargas de contacto entre tubería y varilla pozo CBE-X. ....	57
Figura 31. Perfiles de presión en el casing y el tubing.....	61
Figura 32. Porcentaje de desgaste teórico y desgaste calculado de PC-Pump.....	63
Figura 33. Comparación run life varilla continua vs varilla convencional. ....	65
Figura 34. Cargas de contacto entre la varilla convencional y la tubería para el pozo A. ....	66
Figura 35. Cargas de contacto entre la varilla continua y la tubería para el pozo A. ....	67
Figura 36. Tasa de desgaste y <i>run life</i> de la tubería al usar varilla convencional para el pozo A.....	68
Figura 37. Tasa de desgaste y <i>run life</i> de la tubería al usar varilla continua para el pozo A.....	68

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Propiedades petrofísicas del Campo Casabe. ....	19
Tabla 2. Propiedades mecánicas y químicas de las varillas .....	24
Tabla 3. Condiciones de operación con varilla convencional y varilla continua .....	30
Tabla 4. Primera intervención de algunos pozos perforados campaña 2014 .....	59
Tabla 5. Cargas y desgastes del software PC-Pump.....	60
Tabla 6. Desgaste obtenido de la ecuación de Barlows. ....	62
Tabla 7. Desviación entre los datos de desgaste.....	62
Tabla 8. Porcentaje de desgaste a diferentes coeficientes .....	64
Tabla 9. Propiedades de la varilla y geometría del pozo CBE 1108. ....	71
Tabla 10. Propiedades de la varilla y geometría de los pozos CBE 1452 y CBE 1453. .....	72
Tabla 11. Propiedades de la varilla y geometría del pozo CBE 1409. ....	73

## RESUMEN

**TITULO:** EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO DEL USO DE LA VARILLA CONTINUA EN SISTEMAS DE BOMBEO POR CAVIDADES PROGRESIVAS EN CAMPO CASABE<sup>1</sup>.

**AUTORES:** Daniel Fernando Carreño Díaz  
Juan David Sanchez Berdugo<sup>2</sup>

**PALABRAS CLAVE:** Sarta de varilla, sistema de levantamiento artificial, bombeo por Cavidades Progresivas, varilla continua, *Run Life*, Campo Casabe.

En Casabe, un campo maduro que se encuentra en etapa de recuperación secundaria mediante la inyección de agua; una de las causas de falla más frecuente en los sistemas de levantamiento de bombeo de cavidades progresivas y bombeo mecánico se presenta en la tubería y en la sarta de varillas. Un alto porcentaje de estas fallas está relacionado con el contacto entre tubería y varilla por la construcción del pozo y por las conexiones de las varillas convencionales. Frente a esto se propuso el uso de la varilla continua como una alternativa que busca eliminar los problemas operacionales y mecánicos relacionados con los acoples de la varilla convencional, incrementando así su factor de servicio por reducción de esfuerzos de contacto (inducidos por gravedad o por curvatura-tensión), reduciendo de esta manera los costos operacionales.

Este proyecto tiene como objetivo evaluar el desempeño de la varilla continua en los sistemas de bombeo por cavidades progresivas, para esto, se tendrán en cuenta los trabajos de mantenimiento de sarta de varillas durante los años 2016 y los dos primeros meses de 2017. Además, se contará con la información de los pozos perforados en las tres últimas campañas de perforación en el campo Casabe, correspondientes a los años 2012, 2013 y 2014 con el fin de determinar el desgaste en la tubería de producción producto de las cargas de contacto distribuidas tubería/varilla.

El análisis estadístico se realizará considerando diferentes criterios y condiciones que permitan obtener conclusiones precisas acerca del comportamiento de la varilla continua utilizada en el campo Casabe.

---

<sup>1</sup> Trabajo de grado

<sup>2</sup> Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos, M. Sc. Erik Giovany Montes Páez. Ing. Jorge Mario Doval Dorado.

## ABSTRACT

**TITLE:** ASSESMENT OF PERFORMANCE OF THE USE OF THE CONTINUOUS ROD IN PROGRESSIVE CAVITY PUMPING SYSTEMS IN CASABE OILFIELD<sup>3</sup>.

**AUTHORS:** Daniel Fernando Carreño Díaz  
Juan David Sanchez Berdugo<sup>4</sup>

**KEYWORDS:** Rod String, Artificial Lift System, Progressive Cavity Pumping, Continuous Rod, Run Life, Casabe Oilfield.

In Casabe, a mature oilfield passing through secondary recovery stage by water injection; one of the most frequent failure cause in progressive cavity and conventional pumping takes place in tubing and rod string wellbore equipments. A high percent of these failures are related to tubing/rod string load contacts due to wellbore geometry and connections between sucker rods. In order to address this situation the use of continuous rod was proposed as an alternative to eliminate operational and mechanical problems linked to sucker rod couplings, increasing service factor by reducing contact load stresses (induced by gravity or curvature-tension) thus diminishing operational costs.

This research is seeking to evaluate the performance of continuous rod in progressive cavity pumping systems, for this purpose, the rod string maintenance services done between January 2016 and February 2017 will be taken into consideration. Furthermore, data of wells drilled during the last three drilling campaigns (2012, 2013, 2014) will be used in support in order to determine the tubing wear because of the distributed contact loads (tubing/rod string).

An statistical analysis will be performed taking into account different approaches and conditions allowing to obtain accurate conclusions about the performance of the continuous rod string used in Casabe oilfield.

---

<sup>3</sup> Thesis

<sup>4</sup> Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos, M. Sc. Erik Giovany Montes Páez. Ing. Jorge Mario Doval Dorado.

## INTRODUCCIÓN

Una de las causas de falla más frecuente en los sistemas de levantamiento de bombeo de cavidades progresivas y bombeo mecánico en Campo Casabe se presenta en la tubería y en la sarta de varillas. Un alto porcentaje de estas fallas está relacionado con el contacto entre tubería y varilla por la construcción del pozo y por las conexiones de las varillas convencionales. Frente a esto se propuso el uso de la varilla continua como una alternativa que busca eliminar los problemas operacionales y mecánicos relacionados con los acoples de la varilla convencional, incrementando así su factor de servicio por reducción de esfuerzos de contacto (inducidos por gravedad o por curvatura-tensión), reduciendo de esta manera los costos operacionales.

Por lo anterior se propuso la realización de un análisis estadístico de la vida útil de la varilla continua en el campo, tomando el *run life* como indicador principal, a partir de la construcción de una base de datos histórica de las sartsas de varilla continua utilizadas en el campo. Además, con el fin de analizar el desgaste de la tubería en pozos con este tipo de varilla, se tomaron como objeto de estudio los pozos perforados en las últimas campañas (pozos con tubería de producción nueva), comparando los tiempos de vida útil con los obtenidos a partir de la simulación con el software de diseño PC-Pump.

Por otra parte se analizó el desempeño de la varilla continua con el de la varilla convencional, comparando los tiempos de vida y el desgaste de la tubería al utilizar ambos tipos de varilla. Así mismo se presenta un flujograma donde se establecen criterios y recomendaciones acerca del manejo de la varilla continua en el campo.

A partir de los análisis mencionados anteriormente, se determinó que la trayectoria del pozo influye de manera directa en el desempeño de la varilla, teniendo en cuenta que a mayor inclinación y variación del azimut se verá afectado negativamente el

*run life* de la varilla, así mismo se observó que la magnitud y comportamiento de las cargas de contacto entre la sarta de varillas y la tubería de producción depende básicamente de la geometría del pozo y de la configuración de ambas. Finalmente, como resultado de la comparación entre los diseños con sarta de varilla convencional y continua se evidencia que la varilla continua supera en un promedio de 90 días el desempeño de la convencional, evaluadas bajo las mismas condiciones de geometría y trayectoria de pozo

## 1. GENERALIDADES

Casabe, descubierto en el año 1941, es un campo maduro localizado en la Cuenca del Valle Medio del Río Magdalena (VMM) en el municipio de Yondó, departamento de Antioquia. Desde el año 2004 es operado a través de una alianza estratégica entre Ecopetrol S.A y Schlumberger con el fin de revitalizar el campo.

La tasa máxima de producción del campo se alcanzó en 1954 con 46000 BOPD, proveniente de 414 pozos; producción que en ese entonces correspondía aproximadamente al 26% de la producción anual de Colombia<sup>5</sup>. En 1969 el campo fue entregado a Ecopetrol, sin embargo, no fue sino hasta 1979 cuando se inició la inyección de agua proveniente de un acuífero presente en la formación La Mesa. En los años próximos y hasta 1985 se dio una masificación del método de recobro secundario a través de patrones de 5 puntos invertido.

**Figura 1. Campo Casabe (bloques).**



Fuente: Ecopetrol S.A.

<sup>5</sup> AMAYA, M., *et al.* Casabe: Revitalización de un campo maduro. Oilfield Review. V. (2010). Primavera.

A pesar de que el sistema de inyección implementado logró aumentar significativamente la producción del campo, las complejidades estructurales, la heterogeneidad de las arenas y las lutitas hinchables ocasionaron que se presentara una irrupción temprana del frente de inyección en los pozos productores, alta producción de sedimentos, fallas en los equipos de fondo y una baja efectividad en el proceso.

Por lo anterior y como una forma de mitigar los problemas ocasionados por una inyección de agua descontrolada en el campo, la Alianza Casabe implementó y desarrolló un sistema de inyección con sarta selectiva, aplicado previamente en campos argentinos con gran éxito. Con esta técnica se logró una mayor eficiencia en el proceso de inyección, a través del incremento del barrido vertical y la eliminación de los problemas de canalización presentados anteriormente.

El campo cuenta con tres reservorios, el primero de ellos corresponde a la formación Colorado (arenas A), el segundo a la formación Mugrosa (arenas B) y por último el correspondiente a la formación La Paz (arenas C). Las propiedades petrofísicas y de los fluidos de las zonas productoras se encuentran consignadas en la tabla 1:

**Tabla 1. Propiedades petrofísicas del Campo Casabe.**

PARÁMETROS	CASABE			
	Fm. Colorado		Fm. Mugrosa	
ZONAS PRODUCTORAS	A1	A2	B1	B2
Área (acres)	4570	3875	2030	2499
Profundidad promedio (ft)	2600	2900	3900	4200
Espesor neto (ft)	76	78	43	23
Porosidad promedio	0.24	0.24	25.5	25.5
Permeabilidad promedio (mD)	225	225	385	385
°API	19	19	20	20
Viscosidad a Psat (Cp.)	43	43	21	21
Presión de saturación (psi)	1350	1350	2200	2200

Fuente: Ecopetrol S.A.

## **2. SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL DE BOMBEO POR CAVIDADES PROGRESIVAS**

### **2.1 GENERALIDADES**

Los sistemas de bombeo por cavidades progresivas son extremadamente flexibles y poseen características que lo hacen viable dentro de un rango diverso de aplicación. Una de sus cualidades más importantes es su alta eficiencia total. Otras de las ventajas de este sistema son: muy buena resistencia a la abrasión, bajo costo energético, habilidad para producir fluidos altamente viscosos y con alto porcentaje de sedimentos, ausencia de válvulas o partes reciprocantes evitando bloqueos, bajos costos de inversión inicial y su simple instalación, operación y mantenimiento.

Sin embargo, para que se presente un correcto funcionamiento del sistema este debe ser compatible con las condiciones del pozo y los parámetros operacionales del mismo, teniendo en cuenta las limitaciones propias que este ofrece.

Los sistemas PCP también tienen algunas desventajas en comparación con otros métodos de levantamiento artificial. Las más significativas hacen referencia a la capacidad de desplazamiento y levantamiento de la bomba, así como la compatibilidad de los fluidos producidos<sup>6</sup>.

### **2.2 CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS PCP**

El diseño de un sistema de levantamiento artificial, incluyendo el bombeo de cavidades progresivas, debe considerar las limitaciones de aplicación, dimensionales y de compatibilidad que restringe la selección de ciertos

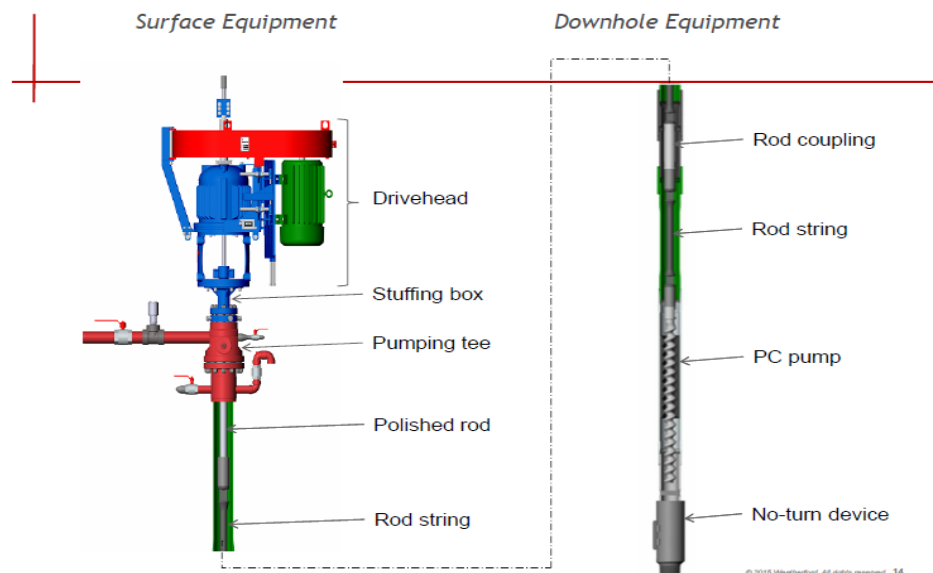
---

<sup>6</sup> CIULLA A. Francesco P. Principios Fundamentales para Diseño de Sistemas con Bombas de Cavidad Progresiva. Weatherford ALS. 2003. P. 53

componentes propios del sistema. Algunas de estas consideraciones a tomarse en cuenta son las siguientes:

- Condiciones de bombeo.
- Efecto del flujo de fluidos.
- Cargas y contactos sobre la sarta de varillas.
- Desgaste sobre varillas y tubería de producción.
- Dimensionamiento de los equipos de superficie.

**Figura 2. Componentes del sistema PCP**



Fuente: DUNN. Lonnie. Progressing Cavity Pumping Systems Overview with a Focus on Coalseam Gas Applications. Weatherford. 2015. (Recuperado en 2 de Enero de 2018) Disponible en

<https://www.spe-qld.org/useruploads/files/pcpspeaustraliafinalv1.pdf>

Una de las causas de los problemas relacionados al desgaste de la tubería en pozos con este tipo de sistema de levantamiento es su aplicación en pozos con configuraciones y geometría altamente desviada, teniendo en cuenta que la

inclinación y la severidad de la curvatura gobiernan el contacto entre la tubería de producción y la sarta de varilla.

Un óptimo desempeño del sistema tiene en cuenta las características de los fluidos a producir, factores como la viscosidad, la densidad del crudo, corte de agua, gas libre, CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S, contenido de arena, presencia de aromáticos y altas temperaturas, son parámetros críticos, si no se consideran sus rangos máximos de aceptación al momento de diseñar correctamente.

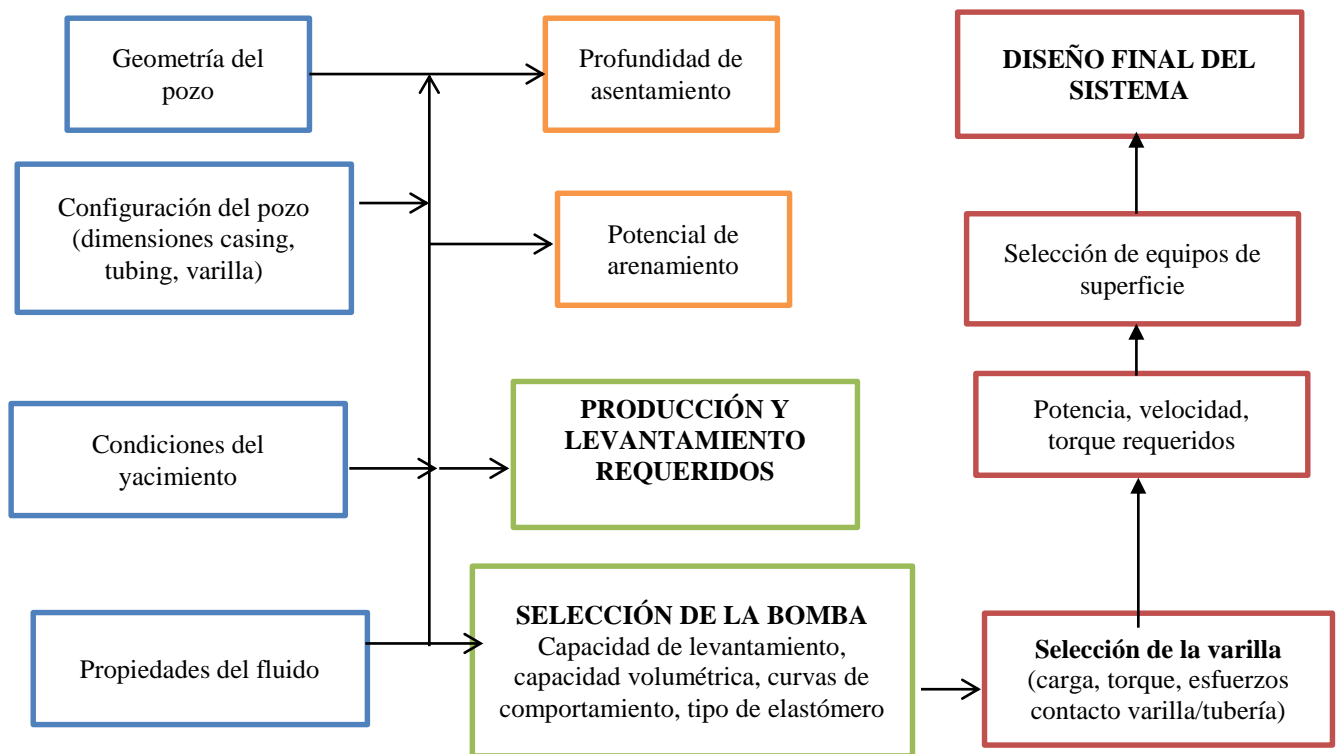
Una de las principales causas de fallas en este tipo de sistema en Campo Casabe es la alta producción de sedimentos. Cuando se realizan cambios en la velocidad de operación de los equipos, se genera una alteración de la presión de fondo fluyente, cuando esta disminuye, provoca la ruptura y desprendimiento de los granos de arena de las perforaciones, haciendo que estos fluyan hacia el pozo y posteriormente al equipo de producción, ocasionando atascamientos en el mismo. Por esta razón es importante tener un control sobre los incrementos realizados al sistema, sobretodo en casos donde las formaciones productoras sean poco consolidadas.

### **2.3 VARILLA CONTINUA**

La varilla continua es una tecnología efectiva desarrollada para eliminar problemas operacionales y mecánicos relacionados con los acoples de conexión en las sargas de varilla convencional. Por sus características y ventajas, juega un papel importante en la optimización de pozos con sistemas de bombeo recíproco o bomba de cavidad progresiva.

Durante estudios realizados, la falla más frecuente en las sartas de varillas es la de los pines de conexión desconectados por mal roscado de los mismos<sup>7</sup>. También por presentarse gran número de fallas por desgaste de los acoples de conexión. Por ello, se diseña el concepto de varilla continua, la cual buscaba como objetivo principal eliminar las sucesivas fallas ocurridas por causa de la existencia de acoples.

**Figura 3. Flujograma para diseño apropiado de sistemas PCP.**



Fuente: Modificado de CIULLA A. Francesco P. Principios Fundamentales para Diseño de Sistemas con Bombas de Cavidad Progresiva. Weatherford ALS. 2003. P. 53

<sup>7</sup> PATTON, L. D. Continuous-rod Pumping: A field-proved Concept. American Petroleum Institute. 1970.

**Tabla 2. Propiedades mecánicas y químicas de las varillas**

Proveedor	GRADOS	Material	Diámetro (in)	Peso (lb/ft)	Yield (psi)	Tensile (psi)	Max. Torque (ft°lb)
Weatherford	SER 6	4120M	1"	2.67	115000	140000	1300
	SWR 6	4320M	1"	2.67	120000	145000	1300
	DER 8.5	4120M	1-5/32"	3.57	90000	115000	1490
	DWR 8.5	4320M	1-5/32"	3.57	90000	115000	1490
	SER 8.5	4120M	1-5/32"	3.57	115000	140000	2000
	SWR 8.5	4320M	1-5/32"	3.57	120000	145000	2000
Dover	PRO-ROD 960M	4120M	13/16"	1.76	115000	140000	725
			7/8"	2.04	115000	140000	900
			1"	2.67	115000	140000	1350
			1/18"	3.38	115000	140000	1900
	PRO-ROD 970N	4330M	13/16"	1.76	115000	140000	725
			7/8"	2.04	115000	140000	900
			1"	2.67	115000	140000	1350
			1/18"	3.38	115000	140000	1900

Fuente: Modificado de COROD Continuous Rod. Weatherford. 2016. (Recuperado en 23 de Diciembre de 2017) Disponible en <https://weatherford.com/en/documents/technical-specification-sheet/products-and-services/production-optimization/crod-continuous-rod-wft312437/>

**2.3.1 Corod DER 8.5.** Diseñada para bombeo reciprocante y rotativo de carga media. Recomendada en ambientes corrosivos que se inhiben de manera efectiva y donde hay presencia de dióxido de carbono y cloruros.

La DER 8.5 es fabricada con una aleación de Cromo-Molibdeno, micro aleada con titanio para mejorar sus propiedades mecánicas y térmicas. Su contenido de cromo se incrementa al 2 % para mejorar la resistencia a la corrosión.

**2.3.2 Corod SWR 8.5 – 6.** Varilla continua de alta resistencia diseñada para bombeo reciprocante y rotativo de carga pesada, usada en pozos profundos, de grandes

volúmenes y en ambientes levemente corrosivos. Está hecha de una aleación de Cromo-Níquel-Molibdeno formulada para mejorar la tolerancia a la tensión y la resistencia a la fatiga.

**2.3.3. Corod SER 8.5 – 6.** Diseñada para bombeo mecánico y sistemas PCP de carga pesada. Es recomendada para ambientes muy corrosivos que sean efectivamente inhibidos. Está fabricada de una aleación Cromo-Molibdeno, micro aleado con Titanio.

**2.3.4. Corod DWR 8.5 – 6.** Varilla continua de resistencia regular, diseñada para bombeo recíprocante y rotativo de carga media, para ambientes medianamente corrosivos que son efectivamente inhibidos. Este producto está disponible en múltiples tamaños para usar en amplio rango de aplicaciones<sup>8</sup>.

**2.3.5. PROROD 960M.** Acero AISI 4120M con aleación de Cromo - Molibdeno. Diseñado para cargas extra pesadas a cualquier profundidad, en fluidos corrosivos que estén efectivamente inhibidos. Este grado ha sido aleado y tratado térmicamente para resistir la corrosión y la fatiga. Las varillas 960M se recomiendan para aplicaciones de bombeo mecánico y PCP.

**2.3.6 PROROD 970N.** Grado de alta resistencia AISI 4330M con aleación Cromo-Níquel-Molibdeno. Fabricado para cargas extra pesadas y en ambientes corrosivos. Es apto tanto para sistemas de bombeo recíprocante como para bombeo rotativo<sup>9</sup>.

---

<sup>8</sup> COROD Continuous Rod and Well Services. Weatherford. 2013. (Recuperado en 5 de Enero de 2018). Disponible en <https://www.weatherford.com/en/documents/brochure/products-and-services/production-optimization/corod-continuous-rod-and-well-services/>

<sup>9</sup> PRO-ROD Optimize your Rod Lift Systems with Pro-Rod. Dover Artificial Lift. 2016. (Recuperado en 11 de Enero de 2018) Disponible en [https://www.doverals.com/assets/img/brochures/Pro\\_Rod\\_Brochure\\_06-13-16\\_1.pdf](https://www.doverals.com/assets/img/brochures/Pro_Rod_Brochure_06-13-16_1.pdf)

## 2.4 VENTAJAS DEL USO DE LA VARILLA CONTINUA

Una de las principales ventajas de esta tecnología es el incremento en la eficiencia total del sistema debido a que ofrece una alternativa de carga más liviana, lo cual permite un consumo menor de energía y reduce las caídas de presión adicional en la tubería de producción, siendo esto más significativo en sistemas rotativo con bombas de cavidad progresiva.

Por otro lado, reduce los costos operacionales, debido a que en teoría disminuye el desgaste mecánico de la tubería sobre todo en pozos desviados, inclinados y horizontales e incrementa el factor de servicio de la varilla por reducción de esfuerzos sobre la misma. Además de lo anterior, minimiza significativamente los problemas con los acoples de conexión entre varillas.

## 2.5 DESGASTE SOBRE LA VARILLA Y TUBERIA DE PRODUCCIÓN

Debido al movimiento rotativo de la sarta de varillas y el constante contacto de esta con la tubería de producción, se produce una acción de desgaste progresivo de ambos equipos provocado por las cargas de contacto. En la mayoría de los casos, la rotación se produce en un punto determinado sobre la pared interna de la tubería haciendo que, eventualmente, se forme, una reducción de la pared de la misma que, al cabo de un tiempo, determinado por la velocidad de rotación y las cargas de contacto termina por presentarse una falla por ruptura del componente.

**2.5.1. Cargas de contacto entre tubería y varilla.** La magnitud y la naturaleza de las cargas de contacto entre la sarta de varilla y la tubería de producción dependerán básicamente de la geometría del pozo, la configuración de ambos elementos y la tensión sobre las varillas. Este comportamiento es diferente para ambos tipos de

varilla, continua (cargas distribuidas a lo largo del cuerpo) y convencional (carga concentrada en los acoples).

La carga neta de contacto es la resultante de las cargas inducidas por la gravedad y aquellas que se desarrollan a partir de la combinación entre la curvatura del pozo<sup>10</sup>. Para determinar la carga neta de contacto en el caso de la varilla continua se puede utilizar:

$$F_{contacto} = F_{grav} + F_{curv} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

$$F_{contacto} = \text{Carga neta de contacto en varilla continua} \left( \frac{N}{m} \right)$$

$$F_{grav} = \text{Cargas de contacto inducidas por gravedad} \left( \frac{N}{m} \right)$$

$$F_{grav} = \text{Cargas de contacto inducidas por gravedad} \left( \frac{N}{m} \right)$$

Para el cálculo de las cargas inducidas por gravedad en varilla continua se tiene:

$$F_{grav} = C * Wr * Sen (\theta) \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

$$Wr : \text{peso unitario de la varilla} \left( \frac{lb}{ft} \right)$$

$$C : \text{Constante (Métrico} = 9.81 - \text{Inglés} = 1)$$

$$\theta : \text{Ángulo de desviación} (^\circ)$$

<sup>10</sup> CIULLA A. Francesco P. Principios Fundamentales para Diseño de Sistemas con Bombas de Cavidad Progresiva. Weatherford ALS. 2003. P. 60.

Las cargas de contacto inducidas por curvatura en varillas continua pueden calcularse como:

$$F_{\text{curv}} = C * S_{\text{sarta}} * \Delta\theta \quad \text{Ecuación 3}$$

$S_{\text{sarta}}$  : Tensión de la sarta de varilla (N o lb)

$\Delta\theta$  : Severidad del hueco (°/30m) (°/100 ft)

C : Constante (Métrico =  $5.818 * 10^{-4}$  – Inglés =  $1,736 * 10^{-4}$ )

**2.5.2 Desgaste sobre la tubería de producción.** Uno de las consecuencias del efecto rotativo continuo de la sarta de varilla sobre la tubería de producción es el desgaste del equipo de producción. Esta tasa de desgaste dependerá principalmente de la naturaleza del material de cada uno de los componentes, las propiedades del fluido (contenido de sedimentos), las cargas de contacto en cada parte de la tubería, incluyendo también la geometría del pozo.

*Center for Energy Research (C-FER)* desarrolló una correlación empírica para el cálculo de la tasa de desgaste de la tubería de producción con base a una muestra de pozos representativa de Canadá y EEUU<sup>11</sup>.

$$Wt = C * X * 10^{0.075 Y * S} * F_{\text{contacto}} \quad \text{Ecuación 4}$$

$Wt$  : Tasa de desgaste de tubería  $\left( \frac{\text{pulg}}{\text{MMrevs}} \right)$

S: contenido de arena %

X, Y : Coeficientes de desgaste del material – acero = 1

C : Constante (Métrico =  $1.9548 * 10^{-5}$  – Inglés =  $7.2845 * 10^{-3}$ )

---

<sup>11</sup> CIULLA A. Francesco P. Principios Fundamentales para Diseño de Sistemas con Bombas de Cavidad Progresiva. Weatherford ALS. 2003. P. 110.

$F_{\text{contacto}}$  : Carga de contacto distribuida  $\left(\frac{\text{N}}{\text{m}} \text{ o } \frac{\text{lb}}{\text{ft}}\right)$

**Figura 4. Carreto de varilla continua**



Fuente: DUNN. Lonnie. Progressing Cavity Pumping Systems Overview with a Focus on Coalseam Gas Applications. Weatherford. 2015. (Recuperado en 2 de Enero de 2018) Disponible en

<https://www.spe-qld.org/useruploads/files/pcpspeaustraliafinalv1.pdf>

**2.5.3 Desempeño de la bomba con el uso de la varilla continua.** Al analizar el efecto del uso de la varilla continua sobre la bomba, se debe considerar principalmente el tipo de fluido que se maneje, dado que se podría pensar que al tener menores torques con el uso de la varilla continua, el desempeño de la bomba aumentaría considerablemente, sin embargo, los cambios en el torque en fluidos menos viscosos no son tan representativos como en el caso de fluidos pesados<sup>12</sup>, tal como se muestra en un caso de estudio, donde el fluido del pozo tenía viscosidad

<sup>12</sup> CIULLA A. Francesco P. Principios Fundamentales para Diseño de Sistemas con Bombas de Cavidad Progresiva. Weatherford ALS. 2003. P. 120.

de 15000 cp<sup>13</sup>. En este pozo, se analizaron diferentes parámetros al usar ambos tipos de varillas, convencional y continua, encontrándose valores de torque para estas de 316.7 lb ft y 230.3 lb ft respectivamente. Por otra parte se obtuvieron diferenciales de presión de 2513 psi con la varilla convencional, mientras que con la varilla continua, la presión diferencial fue de 1269 psi, lo que ayudaría a trabajar la bomba más eficientemente. Por otra parte, se determinó que las pérdidas de flujo al usar la varilla continua fueron menores, lo que sugiere la utilización de una bomba con menor capacidad de levantamiento que en el caso de la varilla convencional, donde se obtuvieron mayores pérdidas de flujo, tal como se muestra en la tabla 3.

**Tabla 3. Condiciones de operación con varilla convencional y varilla continua**

<b>Parámetro</b>	<b>Convencional</b>	<b>Continua</b>
Presión hidrostática	685 psi	685 psi
Perdidas de flujo	1842 psi	598 psi
Presión de descarga	2542 psi	1298 psi
Presión diferencial	2513 psi	1269 psi
Presión en Intake	29 psi	29 psi
Torque	316.7 psi	230.3 psi
Fuerza en cabeza	7.24 hp	5.27 hp

Fuente: Modificado de WILTSE, D. J; WEIR, B. A. Eliminating Sucker Rod Couplings Can Reduce Progressing Cavity Pump Operating Costs. Society of Petroleum Engineers. SPE 30275, 1995.

### 3. CREACIÓN DE BASE DE DATOS

Con el propósito de cumplir con los objetivos planteados, se creó una base de datos del uso de la varilla continua en pozos con sistema de levantamiento PCP, definiendo: *run life*, características del pozo, equipo de fondo, sarta de varilla y condiciones operacionales.

<sup>13</sup> WILTSE, D. J; WEIR, B. A. Eliminating Sucker Rod Couplings Can Reduce Progressing Cavity Pump Operating Costs. (1995, January 1). Society of Petroleum Engineers. SPE 30275.

### 3.1 CONSTRUCCIÓN DE LA BASE DE DATOS DE LOS POZOS CON TRABAJOS DE MANTENIMIENTO DE SARTA DE VARILLAS CONTINUA

A fecha de febrero de 2017 se encontraban en el campo 147 pozos activos operando con sistema de cavidades progresivas. De estos pozos se tomaron en cuenta como objeto de estudio aquellos que habían presentado trabajos de mantenimiento de sarta de varillas durante los años 2016 y los dos primeros meses de 2017.

Luego de cada trabajo de *running* o *pulling* de varilla continua, se procedió a elaborar un reporte detallado de la operación realizada en el pozo (ver figura 5), en este se consigna el tipo de trabajo, las actividades ejecutadas, la unidad de varilleo utilizada, la descripción de la sarta a instalar/ el estado final de la sarta instalada además del grado, condición y longitud de la misma. En los casos donde se realizó el *pulling* de la sarta, se adiciona un reporte de calibración e inspección (ver figura 6) donde se especifican las dimensiones y el estado de desgaste de la varilla cada 100 ft, incluyendo la presencia de corrosión y su condición de la siguiente manera: condición I (óptima, varilla nueva), condición II (aceptable, varilla usada), condición III (rechazada). De la misma manera se adjunta el estado, operativo o no operativo, de los *pin end*, superior e inferior, y el *shear coupling* utilizado. En las siguientes figuras se observa el formato del reporte utilizado en Campo Casabe.

Luego de realizar una revisión de los reportes de los servicios a pozo proporcionados por la Coordinación de Subsuelo del Río (CSR), se registró la siguiente información para la construcción de la base de datos:

- fecha de instalación de la sarta de varilla y fecha de parada.
- grado, diámetro y longitud del cuello de ganso.
- tipo de *shear coupling*.
- grado, longitud y diámetro de la sarta de varilla.
- porcentaje de desgaste de la varilla y su profundidad.

Figura 5. Reporte de servicio de *pulling* de varilla continua.

FECHA	DIA	MES	AÑO	N° REPORTE DE SERVICIOS	NUMERO DE OIT	NUMERO DELIVERY TICKET
	18	1	2016			N/A
Compañía: ECOPEPETROL				Localización: BARRANCABERMEJA		Área/Campo: CAMPO CASABE
Pozo: _____		Tipo de Trabajo: PULLING CORDO		Unid. Varilleo: FB 20		Unid. Soldadura: W 431
MG 584						
DESDE	HASTA	HORAS	DESCRIPCION			
19:00	19:30	1.5	Esperó recorredor ECP para apertura de Handover y personal eléctrico aplicar SAES.			
19:30	20:00	0.5	Verificó presiones THP=0 PSL, CHP=0 PSL. Tomó registro atmosférico, ubicó, niveló y realizó rig up unidad FB 20.			
20:00	21:00	1.0	Instaló líneas de bombeo por tubing, bombeó 12 Bls de agua industrial incremento presión a 500 PSL, prueba de integridad de tubería OK.			
21:00	22:00	1.0	Tensionó sarta con 15 Klbs, W/S-II Klbs - OP-4 Klbs, se observa giro de rotor. Ubicó, niveló MG-584. Retiró cabezal PCP VFT - B Lisa 1-1/2" X 40'.			
22:00	23:00	1.0	Armó mesa de trabajo probó BOP instaló Stack. BOP. Bajó 2 varillas convencionales confirmando Pin de Paro, instaló inyector hidráulico y set de guías. Ubicó carrito en base giratoria, instaló seguros neumáticos en Carrito vacío # 1578			
23:00	0:00	1.0	Sacó 100' de SER 8.5 calibrando cada 100' (anexo registro de calibración).			
<b>19/01/2016</b>						
0:00	1:30	1.5	Sacó total 2812' de SER 8.5 calibrando cada 100' (anexo registro de calibración) Shear Coupling T X 40 Klbs - 100' de cuello de ganso SER 8.5 calibrado cada 25'.			
1:30	2:00	0.5	Retiró set de guías inyector hidráulico. Sacó rotor 113-600 XL, SN-115085 X 36.7' (Anexo registro fotográfico).			
2:00	3:00	1.0	Retiró Stack BOP aseguró Pozo con válvula master 3-1/8" x 3000 PSL mesa de trabajo. <b>Rotor - Cabezal PCP VFT - barra lisa 1-1/2" @ 40' Grapa de seguridad y potencia - Stuffing Box quedan en locación para su movilización.</b>			
3:00	4:00	1.0	Realizó Rig Down de unidad FB 20 y unidad MG 584. realizó orden y aseo.			
4:00	6:00	2.0	Personal y equipos disponibles en locación esperando luz día para movilizar unidades.			
<b>NOTA: Sarta de varilla presenta desgaste localizado por fricción, Corrosión</b>						

Fuente: Ecopetrol S.A

Adicionalmente, a partir de los *surveys* de cada uno de los pozos se obtuvo información acerca del máximo *dogleg* y la inclinación máxima, así como su trayectoria y geometría. En caso de presentarse falla por varilla, se registraba el evento y además se especificaba el punto de ruptura.

Teniendo en cuenta la fecha de instalación y la fecha de parada del pozo, se obtuvo el *run life* por corrida de la varilla. En caso tal que la varilla se considerara operativa y fuera reutilizada en el mismo pozo (*rerun*), se acumulaba el *run life* para obtener la información completa de la vida útil de la varilla en cada pozo.

### **3.2 DISEÑO DE UN SISTEMA DE BOMBEO PCP USANDO EL SOFTWARE PC-PUMP.**

Para el análisis del desgaste de la tubería de producción se utilizó la herramienta PC-Pump, la cual es ampliamente utilizada tanto por operadores como vendedores, en la optimización y la selección de los equipos de superficie y subsuelo de los sistemas PCP.

A continuación se presenta una explicación de la interfaz del software y los datos que se deben introducir en la herramienta para crear un sistema PCP, además del adecuado análisis de la información que esta arroja.

Lo primero que se tiene al abrir el software PC-Pump son 7 pestañas que corresponden a:

- Geometría del pozo
- Configuración del equipo
- Propiedades del fluido
- Condiciones de Operación
- Opciones
- Análisis de resultados
- Análisis auxiliares

En las pestañas de geometría del pozo, configuración del equipo, propiedades del fluido y condiciones de operación se debe introducir toda la información correspondiente al equipo de superficie, subsuelo, condiciones del pozo, características de los tubulares y de las varillas, así como las propiedades del fluido y condiciones de operación, como se detalla a continuación.

**3.2.1 Geometría del pozo.** Para iniciar la creación de un sistema PCP, lo primero que se debe realizar es introducir la información de la geometría del pozo. En esta

parte se copian los datos de profundidad, ángulo y *azumit* que se encuentran en el *survey* de cada pozo de estudio. Al llenar estas tres columnas, PC-Pump automáticamente calcula los valores de la severidad del *dogleg*, profundidad vertical, distancia horizontal, entre otros datos que se muestran en la figura 7.

Figura 6. Reporte de calibración e inspección de la varilla continua.

DIMENSIONES SEGUN N°. DE VARILLAS														
Elíptica	N°. 4	(14/16")	MAYOR	MENOR	Redonda	N°. 4	(7/8")	Diámetro						
	N°. 5	(15/16")	1,005"	0,700"		N°. 6 SER	(1")	1						
N°. 7	(17/16")	1,260"	0,740"	PRO ROD 360	(1-1/8")	1.125								
N°. 8	(18/16")	1,430"	0,745"	N°. 8,5 SER	(1-5/32")	1.156								
PROFU	INVENTARIO		MAYOR		MENOR		REDONDA		MEDIDAS		CONDICION			
ND	Desde	Hasta	Anterior	Actual	Anterior	Actual	Anterior	Actual	Corrosión	Desgaste	I	II	III	
PIN- END SUPERIOR SARTA 1" 1/8 X 1"- SER PIN= OK.														
100							1.156	1.150		1.0%	X			
200							1.156	1.135		3.6%	X			
300							1.156	1.152		0.7%	X			
400							1.156	1.147		1.6%	X			
500							1.156	1.150		1.0%	X			
600							1.156	1.154		0.3%	X			
700							1.156	1.156		0.0%	X			
800							1.156	1.151		0.9%	X			
900							1.156	1.150		1.0%	X			
1000							1.156	1.144	LEVE	2.1%	X			
1100							1.156	1.153		0.5%	X			
1200							1.156	1.150		1.0%	X			
1300							1.156	1.151		0.9%	X			
1400							1.156	1.152		0.7%	X			
1500							1.156	1.154		0.3%	X			
1600							1.156	1.153		0.5%	X			
1700							1.156	1.152		0.7%	X			
1800							1.156	1.147	LEVE	1.6%	X			
1900							1.156	1.148		1.4%	X			
2000							1.156	1.143		2.2%	X			
2100							1.156	1.150		1.0%	X			
2200							1.156	1.147		1.6%	X			
2300							1.156	1.153		0.5%	X			
2400							1.156	1.153	LEVE	0.5%	X			
2500							1.156	1.146	LEVE	1.7%	X			
2600							1.156	1.143	LEVE	2.2%	X			
2700							1.156	1.150		1.0%	X			
2800							1.156	1.150		1.0%	X			
2812	PIN- END INFERIOR 1" X 1" SER PIN= OK.								OPERATIVO					
SHEAR COUPLING 1" X 40 K LBS									NO OPERATIVO					

Fuente: Ecopetrol S.A.

En esta misma sección se grafican distintos parámetros como la severidad del *dogleg*, ángulo del hueco, azimut, entre otros datos que se pueden visualizar en la ventana de gráficas.

En las otras dos pestañas se obtiene un resumen de las propiedades del hueco y la imagen de la geometría del pozo, que mostradas en *summary* y *3-D wellbore* respectivamente.

**3.2.2 Configuración del equipo.** En esta parte es importante contar con la información referente al equipo de superficie, tuberías, bomba y varillas que conforman todo el sistema PCP, ya que dichos datos afectan considerablemente los resultados y por ende la toma de decisiones con respecto al mejor diseño PCP para el pozo en estudio.

Para introducir la información anteriormente descrita, esta sección se divide en 4 partes donde se introduce los datos que se especifican a continuación:

- Equipo de superficie
  - Modelo del motor y compañía proveedora
  - En caso que el equipo de superficie cuente con correas se introduce la eficiencia de transmisión de estas, así como la relación de reducción.
  - Condiciones de operación del motor
- Tuberías
  - Tamaño, peso y longitud del *casing*
  - Clase, grado, tamaño y longitud del *tubing*
- Bomba
  - Compañía proveedora

- Torque
- Profundidad de asentamiento de la bomba
- Eficiencia volumétrica
- Varillas
  - Tipo
  - Marca
  - Tamaño y grado

Luego de introducir toda la información referente al equipo superficie y subsuelo, PC-Pump muestra un esquema de la configuración del sistema PCP, como se muestra en la figura 9.

**3.2.3 Propiedades de los fluidos.** Dentro de la carga de datos en PC-Pump es indispensable conocer las propiedades de los fluidos del pozo, dado que criterios como la tasa de desgaste de la tubería son función directa de factores como el contenido de arena y por lo tanto un desconocimiento de dicha propiedad, afecta los resultados obtenidos. Para esto, se debe contar con información del tipo de fluido, gravedad API, salinidad del agua, contenido BSW y GOR del pozo de estudio.

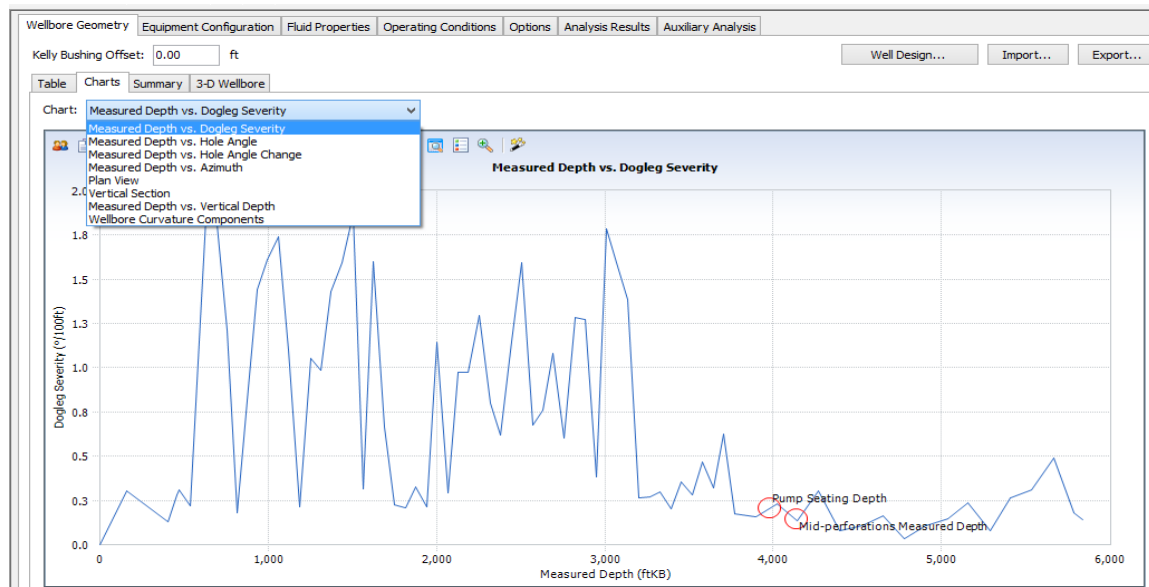
**3.2.4 Condiciones de operación.** La última sección de introducción de datos corresponde a las condiciones de operación del sistema. La información referente a velocidad de la bomba, nivel del fluido, presión en el *tubing* (THP), presión en el *casing* (CHP), temperatura de fondo y gradiente de temperatura deben ser introducidos secuencialmente.

**Figura 7. Pantalla inicial para la carga de datos de la geometría del pozo en PC-Pump**

Stn #	Measured Depth (ftKB)	Hole Angle (°)	Azimuth (°)	Dogleg Severity			Hole Angle Change (°/100ft)	Vertical Depth (ft)	Horizontal Distance (ft)	Latitude (ft)	Departure (ft)	Vertical Section (ft)
				Overall (°/100ft)	Vertical (°/100ft)	Plan (°/100ft)						
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	161.00	0.49	106.45	0.30	0.30	0.00	0.30	161.00	0.69	-0.19	0.66	0.68
3	405.00	0.17	106.45	0.13	0.13	0.00	-0.13	404.99	2.09	-0.59	2.01	2.07
4	458.00	0.32	108.12	0.28	0.28	0.01	0.28	457.99	2.32	-0.66	2.22	2.30
5	471.00	0.36	108.31	0.31	0.31	0.01	0.31	470.99	2.40	-0.69	2.30	2.37
6	535.00	0.22	112.78	0.22	0.22	0.03	-0.22	534.99	2.72	-0.80	2.60	2.69
7	629.00	1.96	111.71	1.85	1.85	0.01	1.85	628.97	4.50	-1.46	4.26	4.43
8	694.00	3.13	109.50	1.81	1.80	0.15	1.80	693.91	7.39	-2.46	6.97	7.25
9	754.00	3.76	103.44	1.21	1.05	0.60	1.05	753.80	10.99	-3.47	10.42	10.82
10	814.00	3.74	101.81	0.18	0.03	0.18	-0.03	813.67	14.90	-4.33	14.25	14.73
11	875.00	4.10	96.79	0.81	0.59	0.56	0.59	874.53	19.03	-4.99	18.37	18.90
12	936.00	4.80	89.93	1.44	1.15	0.87	1.15	935.34	23.67	-5.25	23.08	23.60
13	997.00	5.76	92.19	1.61	1.57	0.34	1.57	996.08	29.19	-5.36	28.70	29.17
14	1060.00	6.85	93.29	1.74	1.73	0.19	1.73	1058.70	36.06	-5.70	35.61	36.06
15	1123.00	7.50	95.20	1.10	1.03	0.38	1.03	1121.21	43.90	-6.28	43.45	43.90
16	1187.00	7.45	94.23	0.21	0.08	0.20	-0.08	1184.66	52.22	-6.97	51.75	52.21
17	1251.00	7.79	98.62	1.05	0.53	0.91	0.53	1248.10	60.69	-7.93	60.17	60.69
18	1311.00	8.38	98.64	0.98	0.98	0.00	0.98	1307.50	69.13	-9.19	68.52	69.13
19	1374.00	9.16	95.69	1.43	1.24	0.71	1.24	1369.77	78.73	-10.38	78.05	78.73
20	1439.00	10.19	95.10	1.59	1.58	0.15	1.58	1433.84	89.65	-11.40	88.92	89.63
21	1502.00	11.37	95.14	1.87	1.87	0.01	1.87	1495.73	101.43	-12.45	100.66	101.40

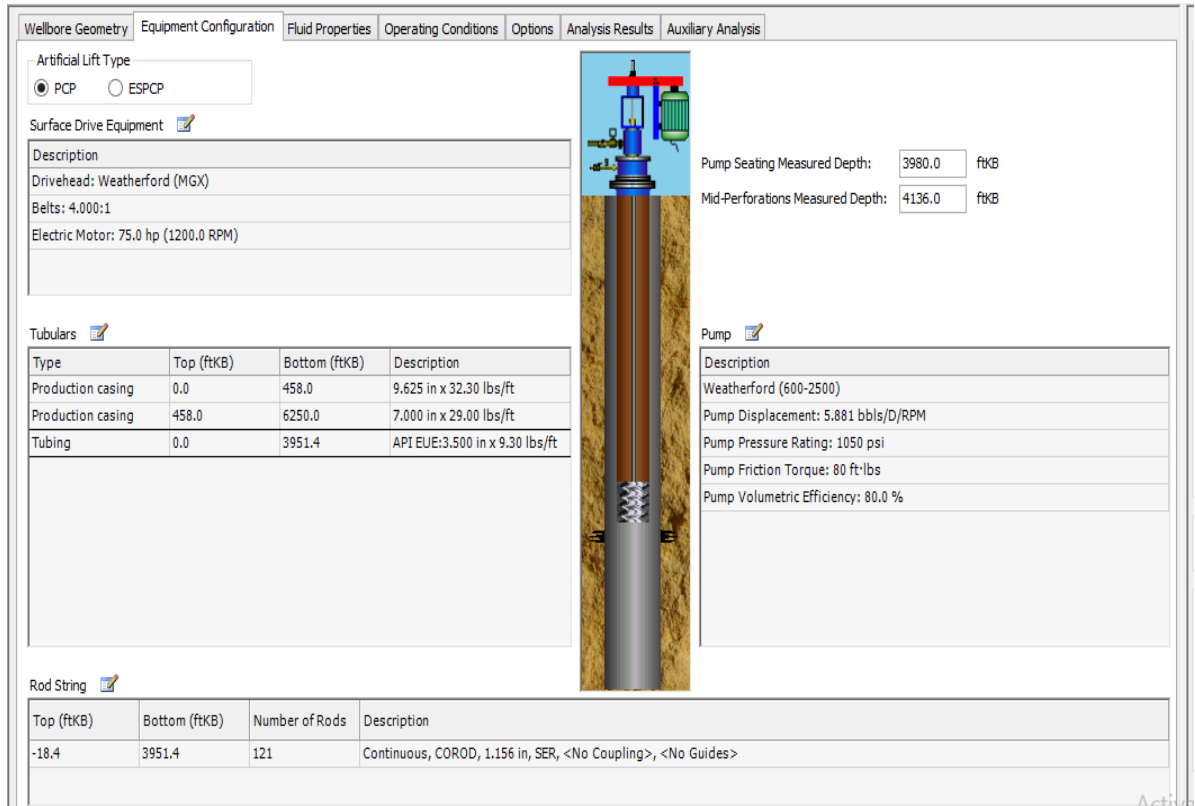
Fuente: PC-Pump versión 3.7 C-FER, 2017.

**Figura 8. Visualización de la gráfica de severidad del *dogleg* vs profundidad**



Fuente: PC-Pump versión 3.7 C-FER, 2017.

**Figura 9. Equipos de superficie y subsuelo de un sistema PCP**



Fuente: PC-Pump versión 3.7 C-FER, 2017.

**3.2.5 Análisis de resultados.** Luego de cargar toda información, el siguiente paso es el análisis de los resultados que arroja el software. Dentro de los parámetros más usados para la selección del mejor diseño PCP de un pozo, están las cargas de contacto entre la varilla y la tubería. Estos datos se observan en la pestaña de contacto varilla/*tubing* de la sección de análisis de resultados, como se muestra en la gráfica 10.

**Figura 10. Cargas de contacto entre la varilla y tubería**



Fuente: PC-Pump versión 3.7 C-FER, 2017.

**3.2.6 Análisis auxiliares.** En esta sección se visualizan los datos de desgaste de la tubería de producción. Como se muestra en la figura 11, con cierto porcentaje de arena presente en el pozo se obtiene una máxima tasa de desgaste de la tubería al igual que la profundidad donde se presenta el mayor desgaste, el tiempo en el cual el 100% de la pared de la tubería ha sido desgastada y la tasa de desgaste a un tiempo específico. Por lo tanto, el porcentaje de arena es una variable importante a tener en cuenta en el análisis y de ahí que su correcto conocimiento y uso afecte la selección del diseño del sistema PCP a utilizar.

Por último, en esta sección se encuentra la pestaña *Tubing Wear vs. Time* donde se encuentra la gráfica de desgaste de la tubería en función del tiempo. A partir de esta grafica se obtiene el desgaste de la tubería a cierto tiempo de uso de la tubería. Por ejemplo, en el caso que la tubería usada en el pozo lleve un *run life* de 4000 días se obtiene que a ese tiempo de vida, la tubería presenta un porcentaje de desgaste del 48% de la pared, tal como se muestra en la figura 12.

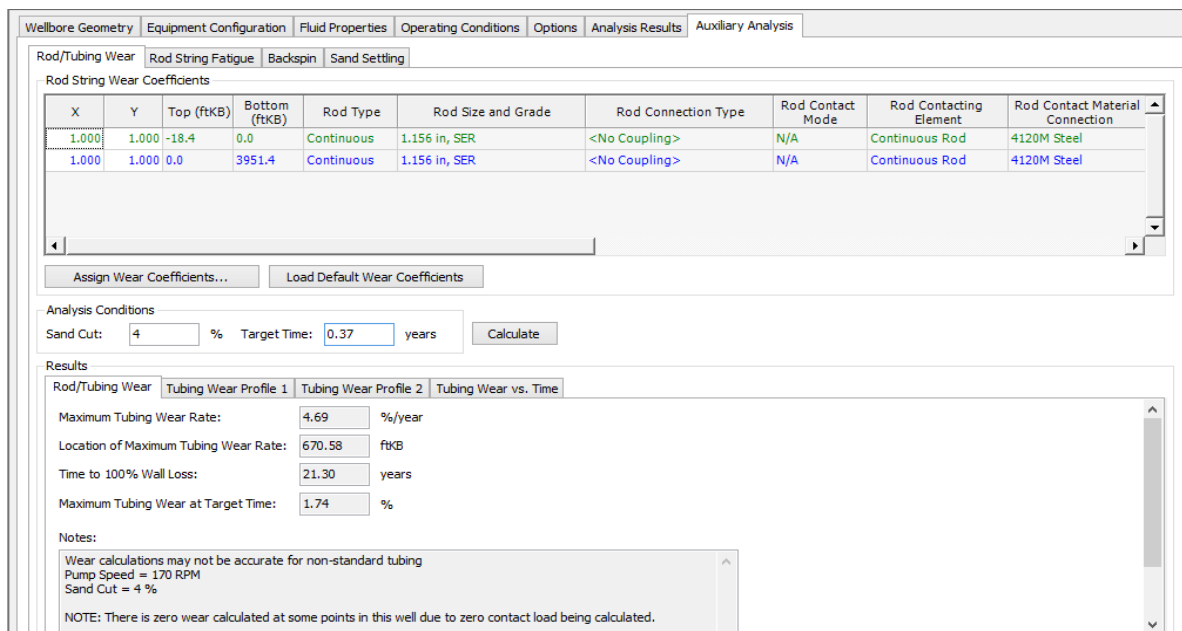
### 3.3 CONSTRUCCIÓN DE LA BASE DE DATOS DE LOS POZOS QUE HAYAN UTILIZADO AMBOS TIPOS DE VARILLA (CONVENCIONAL Y CONTINUA).

Con el objeto de comparar el desempeño de la varilla convencional con el de la continua, se decidió crear una base de datos a partir de la información de los pozos que hubieran contado en sus diferentes diseños con ambos tipos de varillas.

Luego de una revisión histórica en la base de datos del programa Open Wells, que contiene los reportes de cada evento o trabajo realizado en cada uno de los pozos del campo, se recopiló la información correspondiente a:

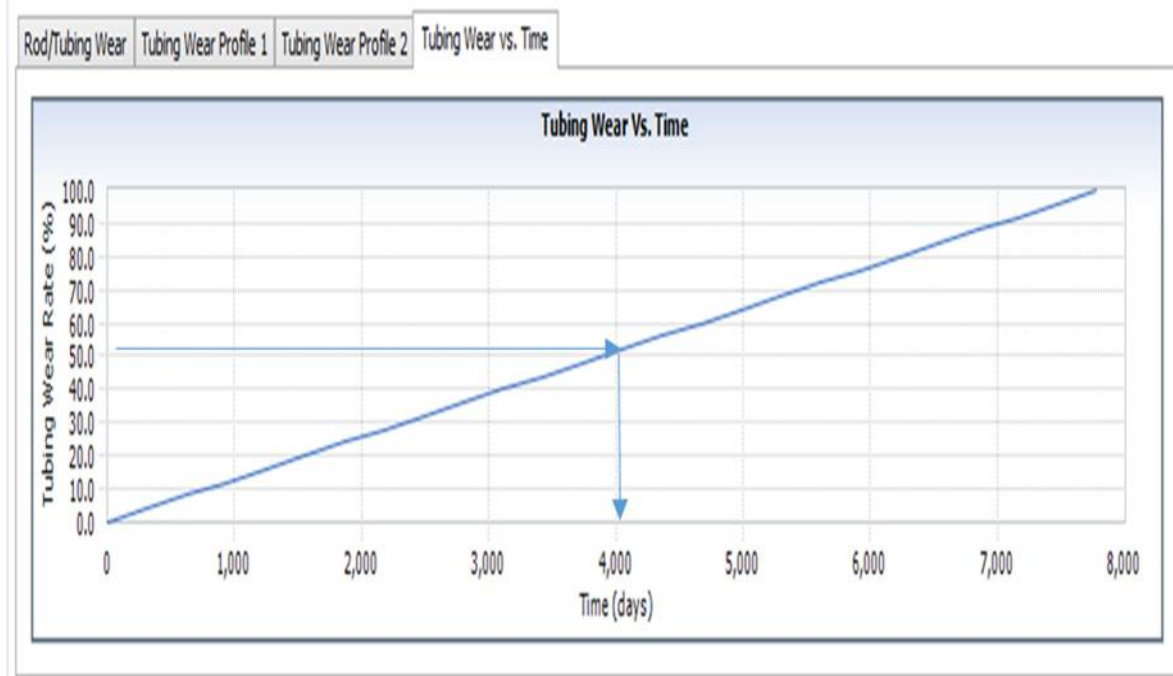
- fecha de instalación de la sarta de varilla y fecha de parada
- cantidad de varillas usadas en el diseño
- diámetro y grado de las varillas

**Figura 11. Visualización de los resultados de desgaste de la tubería**



Fuente: PC-Pump versión 3.7 C-FER, 2017.

**Figura 12. Gráfica de desgaste de la tubería en función del tiempo**



Fuente: PC-Pump versión 3.7 C-FER, 2017.

Y a través del Sistema de Monitoreo y Seguimiento de la Producción e Inyección (MySIP) de la Alianza Casabe (Ecopetrol S.A - Schlumberger), se obtuvieron los parámetros operacionales correspondientes a RPM del sistema.

## 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

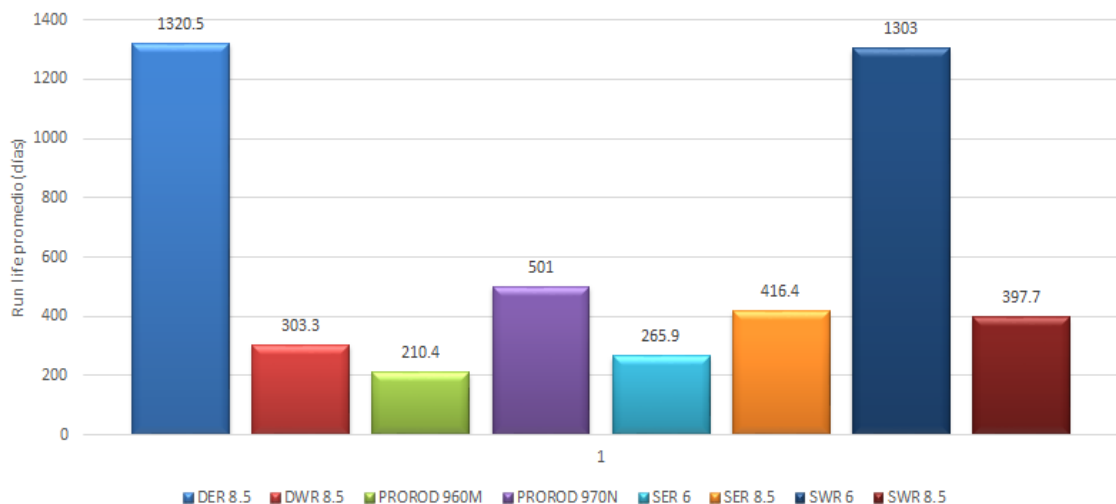
### 4.1. ANÁLISIS GENERAL DE LOS POZOS OBJETO

Una vez se obtuvo la base de datos con la información de todos los pozos del proyecto, se procedió a determinar el *run life* promedio de las corridas de la varilla. Se clasificaron los resultados basados en diferentes criterios: grado de la varilla, tipo de pozo, diámetro de la varilla, inclinación máxima, máximo *dogleg* y tipo de sistema de levantamiento.

**4.1.1. Análisis por grado de varilla.** En la figura 13 se observa el *run life* promedio para cada uno de los grados de la varilla. Al analizar la gráfica, se evidencia que los grados con mayor vida útil son el DER 8.5 y el SWR 6, con *run life* de 1320 y 1303 días respectivamente, sin embargo, la información de estos grados corresponde a un solo pozo para cada tipo. Luego se encuentra la varilla PROROD 970N con un *run life* promedio de 501 días en sus corridas.

Teniendo en cuenta los grados con mayor porcentaje de uso en el campo, la varilla de grado SER 8.5 (33,3% del total de los casos estudiados) mostró un desempeño de *run life* aproximado de 416 días, mientras que la varilla de grado SER 6 tuvo un *run life* promedio de 266 días y el menor desempeño en este grupo fue de la varilla PROROD 960M (41% de los casos estudiados) con un *run life* promedio de 210 días.

**Figura 13. *Run life* promedio por grados de varilla.**



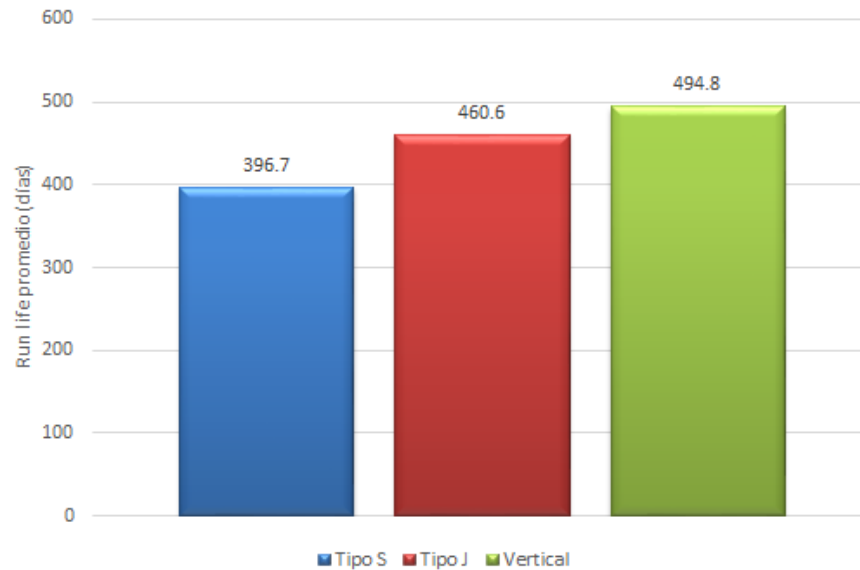
**4.1.2. Análisis por tipo de pozo y diámetro de la varilla.** Otro de los criterios de clasificación para el análisis de los resultados fue el tipo de pozo, teniendo en cuenta su geometría. En la gráfica 14 se evidencia que en los pozos con una trayectoria vertical se presenta el mayor *run life* promedio (494.8 días), seguido de los pozos tipo J (460.6 días) y por último los pozos direccionales tipo S (396.7 días). A partir de los resultados se deduce que la trayectoria del pozo influye de manera directa en el desempeño de los pozos del campo, teniendo en cuenta que a mayor inclinación y variación del azimut se verá afectado negativamente el *run life* de la varilla.

Con el fin de analizar la incidencia del diámetro en el desempeño de la varilla, se clasificó la información de acuerdo a los tres tipos de diámetro presentes (1" - 1.125" - 1.156"). De acuerdo a lo esperado, la varilla de mayor OD presenta un mayor *run life* promedio (440.5 días), seguido de la varilla con OD de 1.125" con *run life* de 240.4 días y la varilla de OD de 1" con 239.9 días, para las cuales el desempeño es similar, como se muestra en la figura 15. Sin embargo, si se compara el comportamiento entre las varilla con OD 1.125" y OD 1" con la varilla de OD 1.156" se observa que esta última casi duplica el *run life* promedio alcanzado por las primeras.

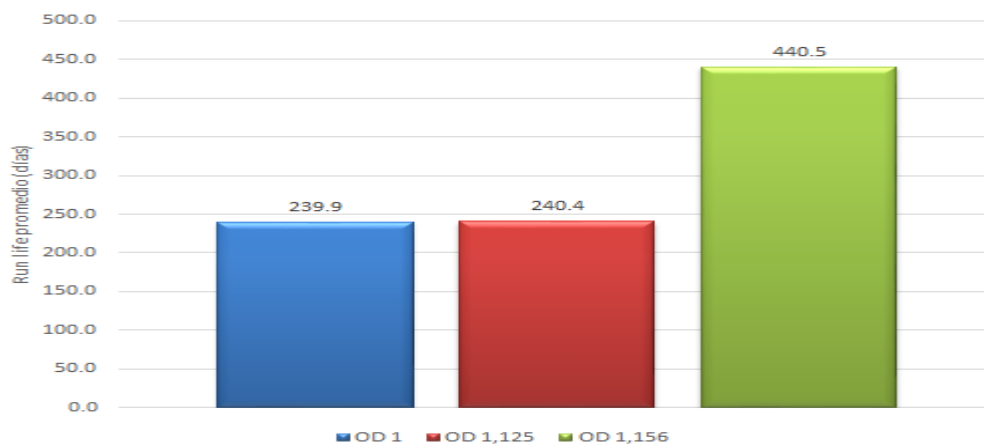
**4.1.3. Análisis por inclinación y máximo dogleg.** Otro criterio de clasificación para el análisis de los resultados, es el de inclinación máxima, como se observa en la figura 16, donde la inclinación máxima del pozo se agrupó en tres rangos: de 0 a 10°, mayores a 10° y menores que 20° y de 20° a 30°. Los resultados evidencian que en los pozos con un menor ángulo de inclinación (0°-10°) el *run life* promedio es superior a los demás rangos, 576 días, casi duplicando los rangos restantes. Mientras que en pozos mayores a 10° de inclinación se presenta un *run life* promedio similar de aproximadamente 320 días. A partir de lo anterior se puede establecer un

umbral crítico de inclinación máxima de 10° desde el cual el desempeño de la varilla cambia drásticamente.

**Figura 14. Run life promedio por tipo de pozo según su geometría**



**Figura 15. Run life promedio por diámetro de la varilla.**

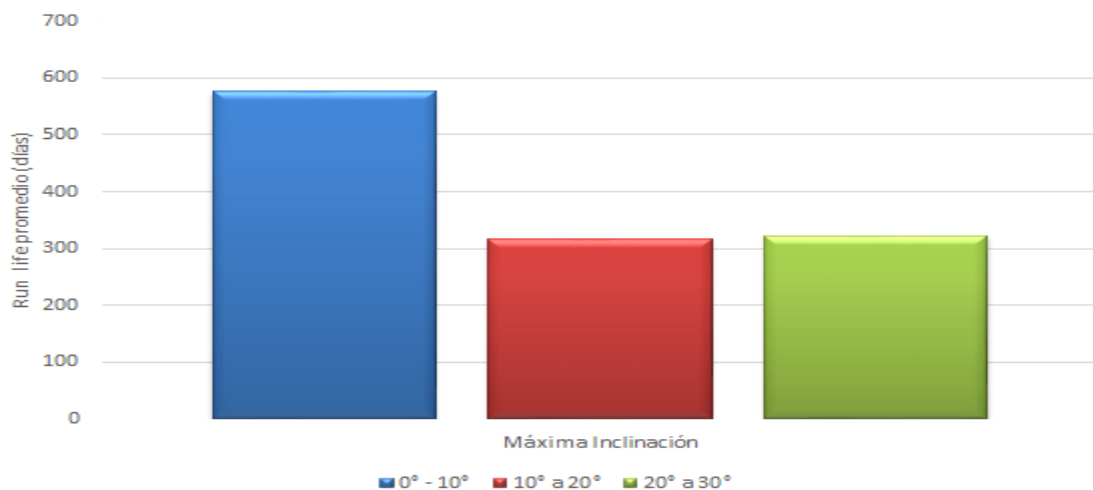


Otro parámetro importante en el análisis estadístico es el máximo *dogleg* de los pozos. Al observar la gráfica 17, se puede evidenciar una relación inversa entre

ambos parámetros (*run life* - máximo *dogleg*). El *run life* es mayor entre menor sea el máximo *dogleg* en el pozo. En los pozos con un *dogleg* más severo, en este caso, mayor a 2,5/100 ft, el *run life* promedio acumulado fue el menor de todos los rangos con tanto solo 306 días.

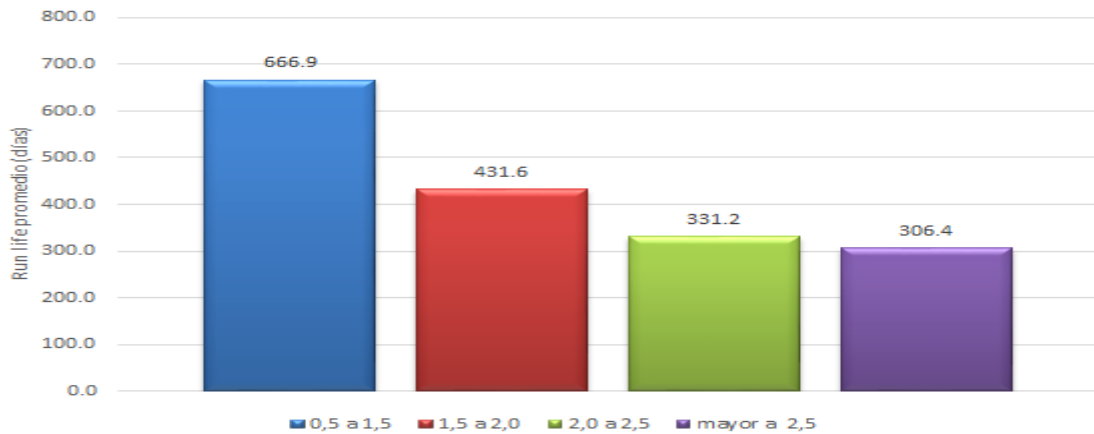
**4.1.4. Análisis por tipo de SLA.** En Campo Casabe, además del sistema de bombeo por cavidades progresivas, algunos de los pozos con levantamiento artificial por bombeo mecánico también cuentan con sargas de varilla continua. Por esta razón se hace necesario realizar un análisis comparativo con el fin de observar el desempeño de este tipo de varilla en ambos sistemas.

**Figura 16. *Run life* promedio por inclinación máxima de los pozos.**



La gráfica 18 muestra un comparativo de los *run life* promedio acumulados de la varilla continua en sistemas PCP y BM. Como resultado de esta se concluye que el sistema de bombeo mecánico con sarga de varilla continua presenta un *run life* acumulado promedio de 368.9 días, siendo este mayor que el evidenciado en pozos con sistema de bombeo por cavidades progresivas (322.9 días).

Figura 17. *Run life* promedio por rangos de máximos *dogleg*.



Asimismo, se efectúa el análisis de los diferentes grados de varilla en los pozos con sistema de bombeo mecánico que cuentan en su diseño con varilla continua, para así comparar el desempeño de estos en ambos sistemas de levantamiento artificial (BM y PCP).

Es importante tener en cuenta que solo 8 de los pozos con sistema de bombeo mecánico poseían varilla continua durante el desarrollo de la investigación, en los cuales se corrieron 20 diseños de este tipo de sarta.

A partir de la figura 19 se evidencia que el mayor *run life* promedio acumulado lo obtuvo la varilla COROD SER 8.5 (884 días) seguido de la de COROD SER 4 (676 días). Además de esto se observa que la varilla PROROD grado 960M, al igual que en el sistema PCP, muestra el *run life* promedio acumulado más bajo (26% de los diseños corridos en los pozos objeto de estudio con BM contaban con este tipo de varilla).

Figura 18. Gráfico comparativo *run life* acumulado promedio BM vs PCP.

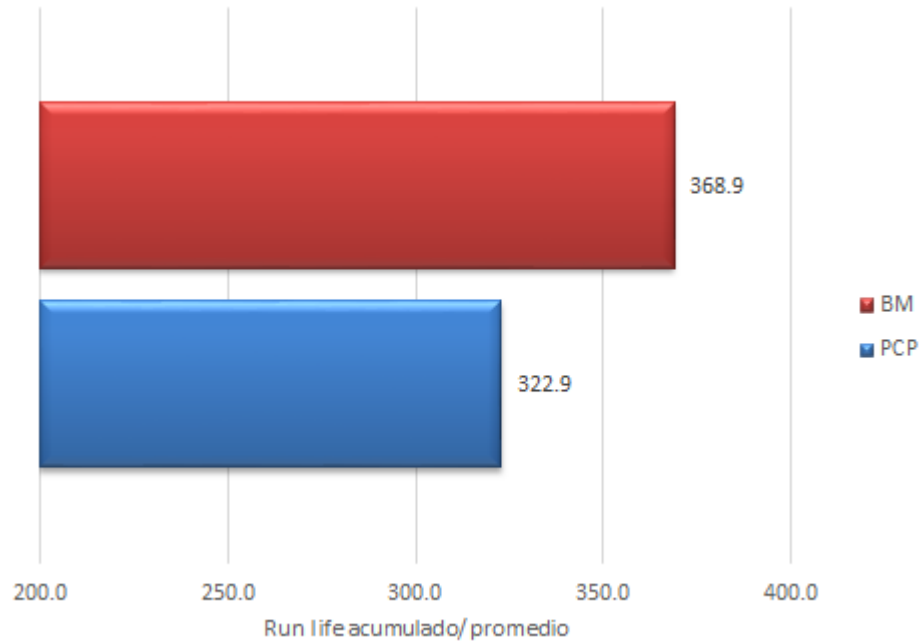
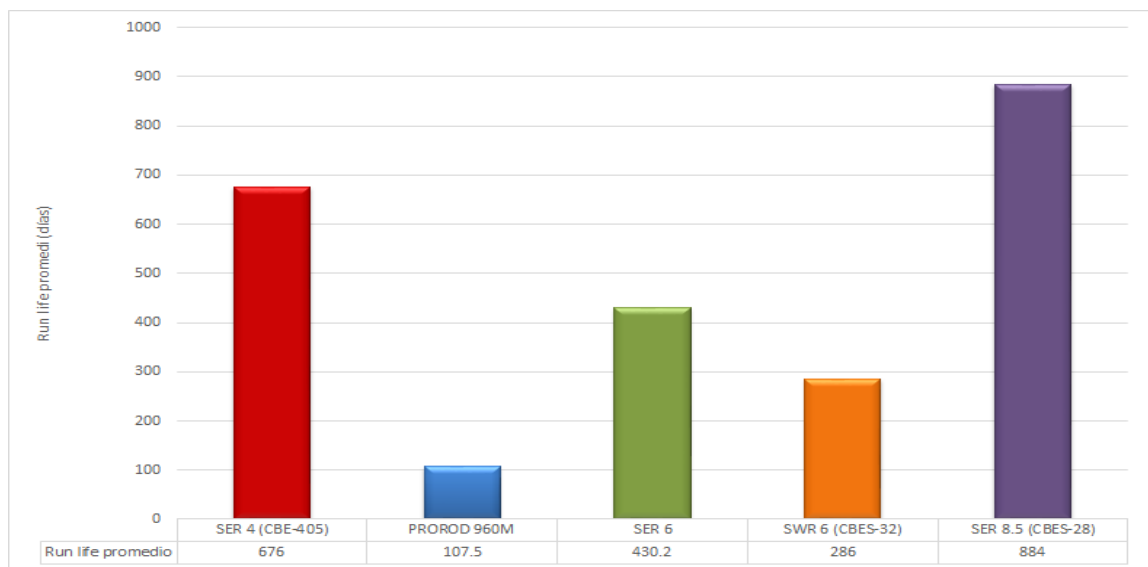


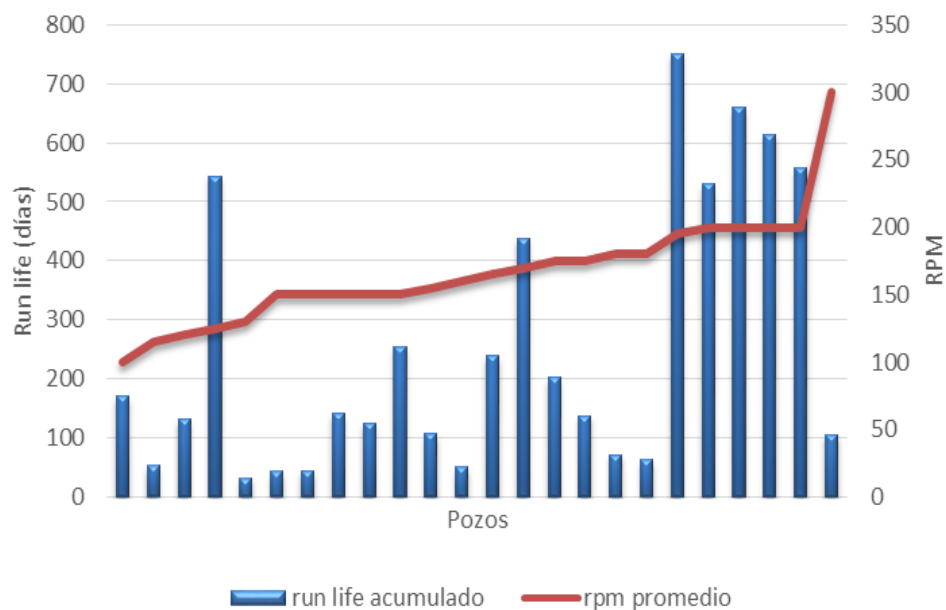
Figura 19. *Run life* promedio por grados en pozos con sistema de bombeo mecánico.



**4.1.5 Análisis por falla de varilla.** Dado que el 28% de los pozos estudiados presentaron al menos una falla por varilla, se hizo necesario realizar un análisis del promedio de vida útil de la sarta utilizada en estos pozos. De la figura 20 se observa que en el 62 % de los eventos registrados, se presentó un rango de *run life* acumulado entre 32 y 200 días, mientras que en el resto los *run life* acumulados fueron desde 239 a 750 días.

Además de esto, se observó que no existe una relación directa entre la velocidad de operación del sistema y el *run life* de la varilla, puesto que hay casos donde la RPM está en un rango alto de aproximadamente 200 RPM y en dichos pozos la vida útil de la varilla presenta valores altos entre 300 y 751 días. De lo anterior se observa que el valor de las RPM del sistema no es un factor determinante en la vida útil de la varilla.

**Figura 20. *Run life* y RPM de los pozos con falla por varilla.**



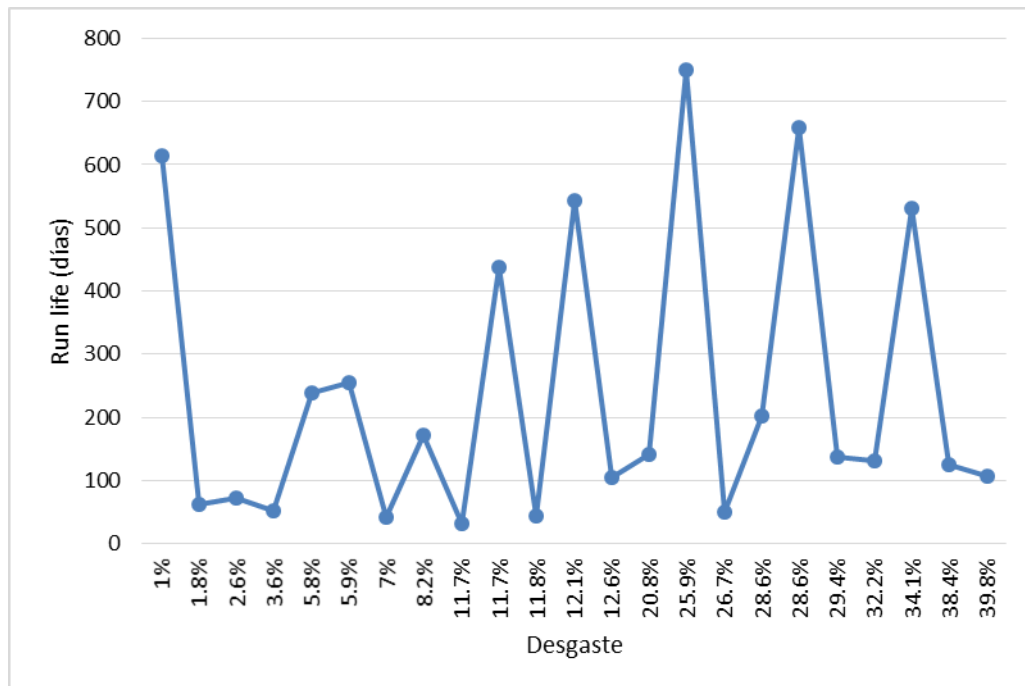
Por otra parte, se analizó el *run life* de la varilla en función del porcentaje de desgaste que esta presentaba al momento de la falla. Tal como se muestra en la figura 21, se determinó que el máximo desgaste presentado en las varilla fue del 39% obteniéndose *run life* de 107 días para este caso, mientras que el menor desgaste fue del 1%, para el cual la vida útil de la varilla fue de 614 días. Del análisis anterior se podría determinar que existe una relación directa entre el desgaste y el *run life*, sin embargo, esto no se presenta en la mayoría de los casos estudiados.

**4.1.5. Análisis por condición.** Con el fin de realizar un análisis estadístico más detallado se establecen condiciones que permitan estudiar el desempeño de los diferentes tipos de varilla continua usadas en Campo Casabe. Primeramente se realiza el análisis de los diferentes grados de varilla teniendo como criterio principal el tipo de pozo (geometría), de esta manera podemos profundizar en el comportamiento de cada uno de los tipos de varilla teniendo en cuenta la trayectoria de los pozos.

Al observar la figura 22 se evidencia un bajo desempeño del grado de varilla PROROD 960M en las diferentes geometrías de los pozos, con un promedio acumulado de *run life* de 191.6 y 171 días en pozos tipo S y tipo J respectivamente, mientras que en pozos verticales presenta un promedio acumulado de 386.7 días. Es importante resaltar que este grado de varilla continua es usada en el 41.7% de los pozos objeto de estudio, sin embargo presenta el desempeño más bajo entre los diferentes grados utilizados en el campo. Además de esto se evidencia una tendencia constante en el desempeño de la varilla grado COROD SER 8.5 (33.3% de los pozos) con un *run life* promedio acumulado de 447 días teniendo en cuenta los diferentes tipos de pozos.

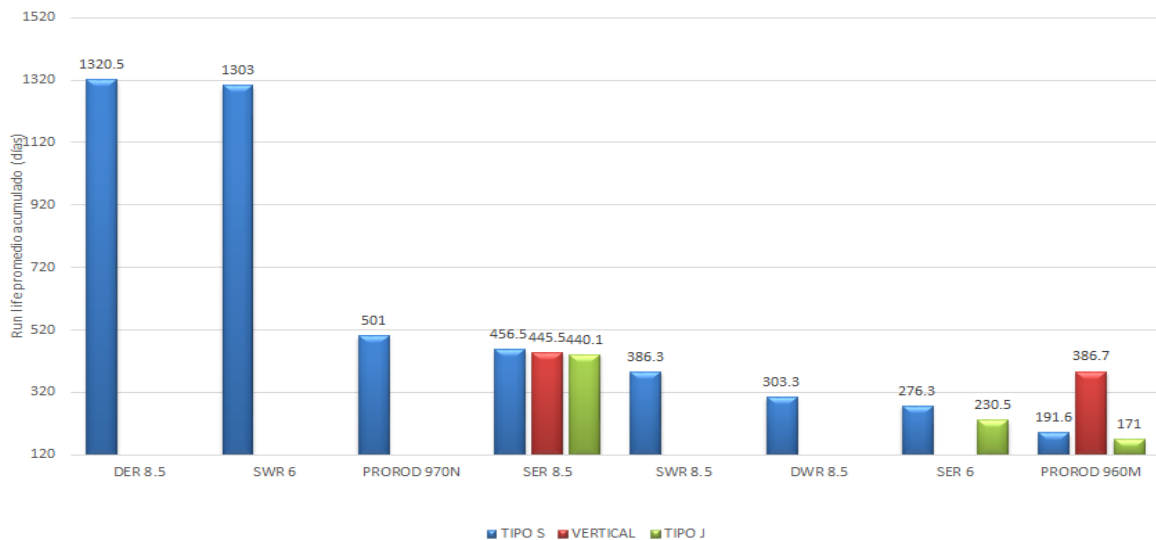
Otro aspecto a resaltar es el desempeño evidenciado de la varilla continua PROROD 970N en pozos tipo S (2.1% de los pozos estudiados, con un total de 5 corridas en diferentes diseños) con un run life promedio acumulado de 501 días.

**Figura 21. Desgaste vs *Run Life* de los pozos con falla de varilla**



En aras de profundizar en la incidencia de la trayectoria del pozo, se decide analizar los diferentes grados de varilla teniendo ahora como condición principal diferentes intervalos de *dogleg*. A partir de la gráfica 23 se concluye que la varilla grado PROROD 960M presenta un *run life* promedio acumulado de 405.3 días en pozos con *doglegs* máximos entre los 0.5-1.5/100ft, no obstante su desempeño se reduce en un 50% en pozos con *doglegs* máximos mayores a 2.5/100ft.

**Figura 22. Run life promedio por grados, criterio: geometría del pozo.**



Otro aspecto a resaltar es el *run life* promedio acumulado de 744 días presentado por la varilla PROROD 970N en pozos con *dogleg* mayores a 2.5/100ft, mientras que la varilla COROD SER 6 evidencia un promedio acumulado constante en los diferentes tipos de pozo, teniendo un desempeño superior en los pozos con un *dogleg* máximo entre los 1.5 y 2/100 ft. En el caso de la varilla COROD SER 8.5 el desempeño es inversamente proporcional al aumento del máximo *dogleg*, teniendo como promedio acumulado 659 días en pozos con *dogleg* máximos entre los 0.5-1.5/100 ft. .

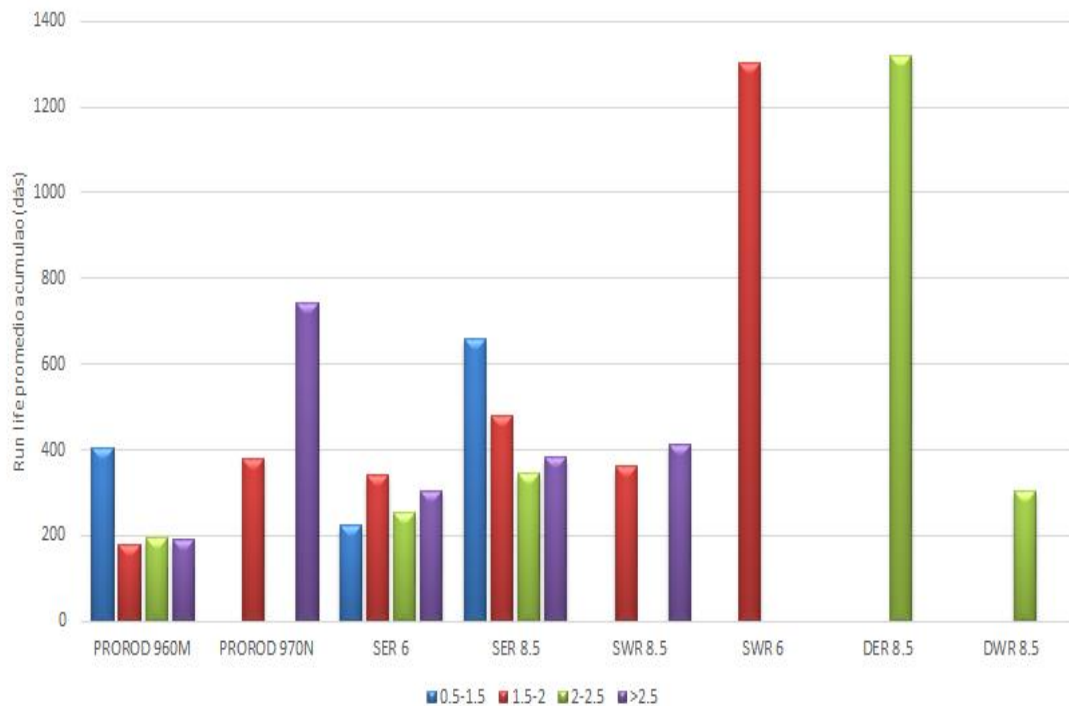
En la figura 24 se expone la información correspondiente a la distribución estadística de los diferentes grados de varilla continua usados en Campo Casabe.

## 4.2 ANÁLISIS DE LOS TIEMPOS DE VIDA UTIL DE LA TUBERIA DE PRODUCCIÓN

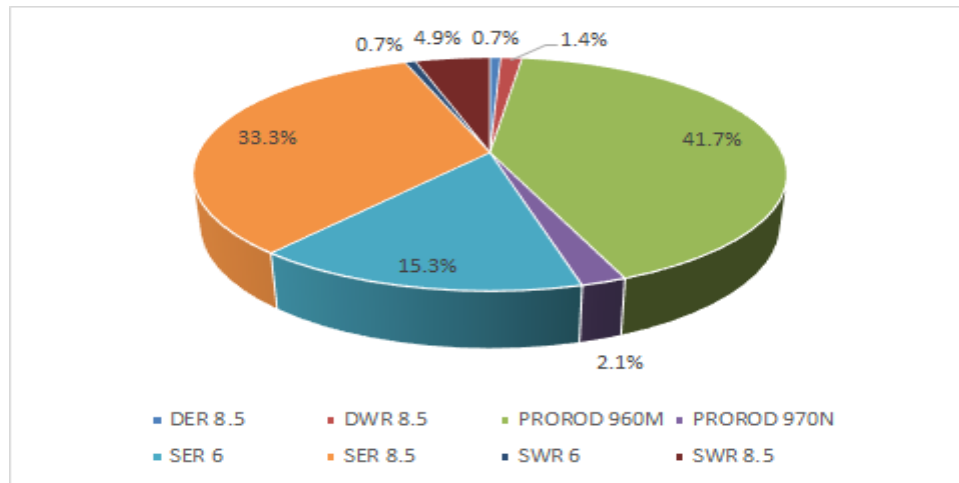
Habiendo analizado el desempeño de la varilla continua teniendo en cuenta diferentes criterios tales como el grado, trayectoria y geometría del pozo,

condiciones operacionales del sistema y profundidad del mayor desgaste, se procede a estudiar en detalle la vida útil de la tubería de producción de los pozos perforados en las tres últimas campañas de perforación que presentaron como falla inicial rotura en el cuerpo de la tubería. La razón principal de la selección de este grupo de pozos se hace teniendo en cuenta que tanto la tubería utilizada para poner el pozo en producción como la varilla continua eran nuevas. De esta manera se pueden obtener resultados relevantes para la evaluación de desempeño de ambos componentes.

**Figura 23. Run life promedio por grados, criterio: máximos doglegs.**



**Figura 24. Distribución porcentual de grados de varilla continua usada en los pozos objeto de estudio.**



En el gráfico 26, se aprecian los pozos con un *dogleg* mayor a  $2.15^{\circ}/100$  ft. Para este caso en particular se alcanzaron *run life* más altos con RPM entre los 124 y 160. El tiempo de vida útil se hace menor cuando se mantienen rpm promedios alrededor de 200 rpm, esto se puede explicar debido al alto desgaste de la tubería producto del giro de la sarta de varilla.

Del mismo modo y tomando como condición principal el máximo *dogleg* se evalúa el desempeño de la tubería de producción a partir del *run life* presentado y el desgaste de la misma. Al observar los gráficos 27 y 28 se evidencia que en los pozos con un *dogleg* menor a  $2.15^{\circ}/100$ ft y mayores a este valor. El desgaste mostrado en la tubería con *dogleg* menor a  $2.5^{\circ}/100$ ft se encuentra entre 5.7% y 9 %, sin embargo es importante resaltar que el *run life* de este pozo fue de 1483 días por lo que el desgaste esperado por el tiempo de operación coincide con el obtenido. Por otro lado, en pozos con un *dogleg* máximo superior a los  $2.5^{\circ}/100$ ft el desgaste evidenciado se encuentra entre 5.7 y 24.3 %.

Figura 25. Vida útil de la tubería de producción vs RPM para pozos con un *dogleg* máximo entre 1 y 2.15°/100 ft.

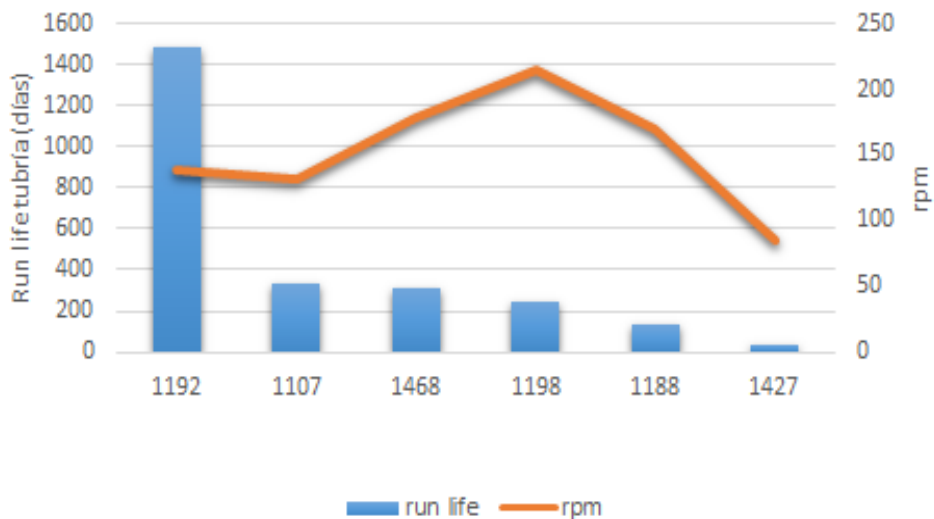
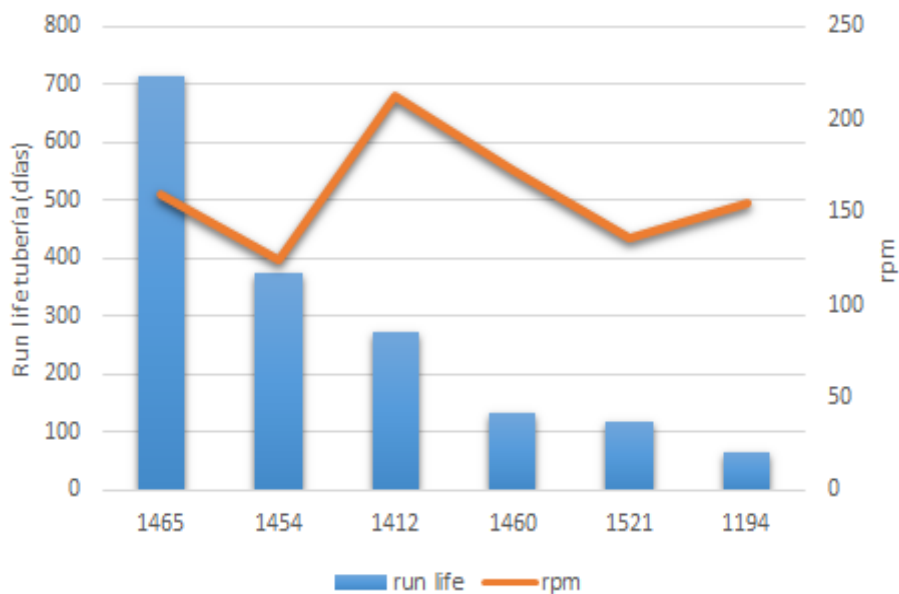
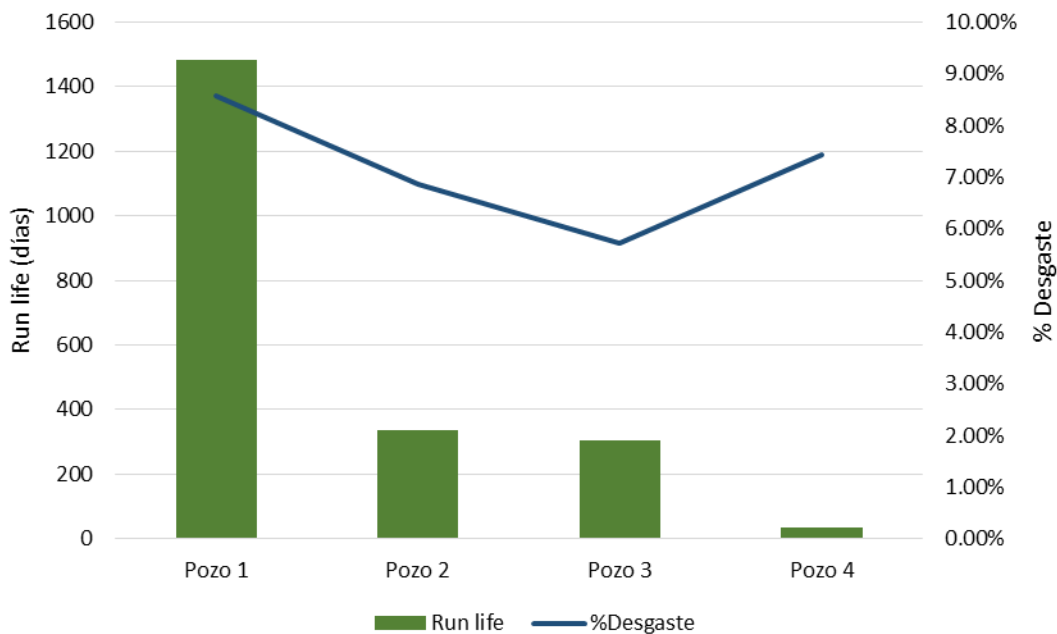


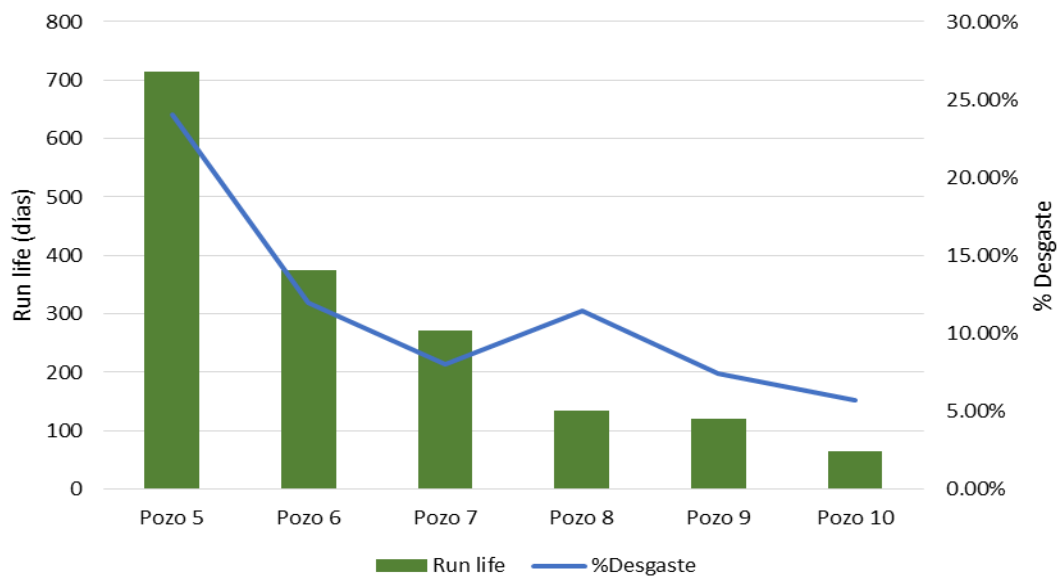
Figura 26. Vida útil de la tubería de producción vs RPM para pozos con un *dogleg* máximo mayores a 2.15°/100 ft.



**Figura 27. Vida útil de la tubería de producción vs desgaste para pozos con un *dogleg* máximo entre 1 y 2.15°/100 ft.**



**Figura 28. Vida útil de la tubería de producción vs desgaste para pozos con un *dogleg* máximo mayor a 2.15°/100 ft.**



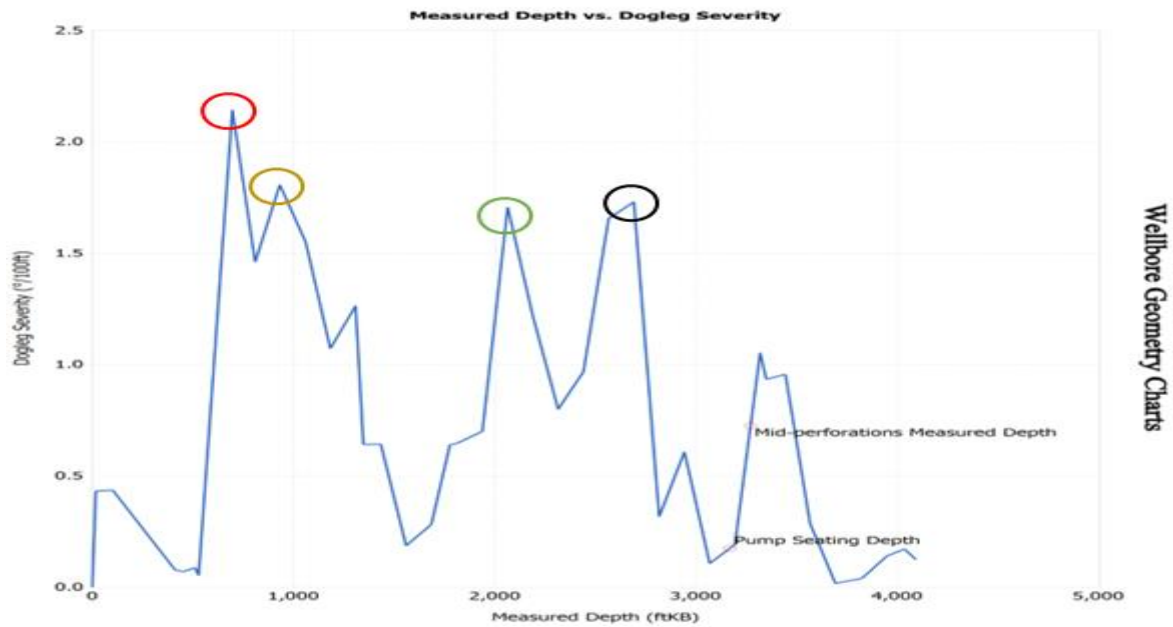
Uno de los parámetros más críticos en la vida útil de la tubería es la distribución de las cargas continuas de contacto ejercidas por la sarta de varilla. Además de lo anterior, esta distribución de cargas guarda una relación directa con la trayectoria y geometría del pozo.

Se tomará como caso de estudio el pozo CBE-X perteneciente al bloque 7-8 del campo, con una profundidad de 4123 ft, la tubería instalada en su completamiento original fue tubería grado J-55 (R2), varilla continua COROD SER 6 y la PMP es de 3193 ft. Las gráficas 30 (profundidad - *dogleg severity*) y 31 (profundidad - cargas de contacto tubería/varilla) son resultado del diseño del sistema de levantamiento del completamiento original del pozo en el software PC-PUMP de la compañía CFER. A partir de la información obtenida se observa que en los puntos en donde la severidad del *dogleg* es mayor, se presentan las mayores cargas continuas de contacto tubería/varilla, esto se evidencia en las profundidades señaladas que corresponden a los 733 – 995 - 2140 y 2600 ft de profundidad, en donde se presentan los *dogleg* máximos así como cargas entre 2 y 5 lbf/ft. Es importante resaltar que la primera falla presentada por el pozo luego de su puesta en producción fue tubería rota a una profundidad de 2143 ft, identificada como una zona donde se presentan las mayores cargas de contacto y con un *dogleg* cercano a los 2°/100ft.

#### **4.3 AJUSTE DE LA CORRELACIÓN DE DESGASTE DE LA TUBERÍA UTILIZADA POR EL SOFTWARE PC-PUMP**

Para la realización de este objetivo se contó con la información de los pozos perforados en las tres últimas campañas de perforación en el campo Casabe, correspondientes a los años 2012, 2013 y 2014. Una vez obtenidos estos pozos se creó en Excel una tabla donde se registró la información del bloque y la primera intervención de cada pozo consignada en el programa Open Wells, tal como se muestra en la tabla 3, donde aparece la información de una parte de los pozos perforados en el año 2014.

Figura 29. Profundidad medida vs Severidad del *dogleg* pozo CBE-X



Fuente. PC-Pump versión 3.7 C-FER, 2017.

Figura 30. Gráfica cargas de contacto entre tubería y varilla pozo CBE-X.



Fuente. PC-Pump versión 3.7 C-FER, 2017.

Registrada la información en las tablas para cada año, se seleccionaron aquellos pozos cuya primera intervención correspondía a tubería rota. Teniendo el nombre de estos pozos, se inició a construir la base de datos, para lo cual se debía revisar cada intervención de tubería rota de manera más detallada para obtener los siguientes datos:

- Fecha de instalación de la tubería
- Fecha de parada
- Grado, longitud y diámetro de la varilla
- Grado, longitud, diámetro y rango de la tubería
- Punto medio de los perforados
- Profundidad de la falla
- Tipo de pozo

Una vez obtenida la fecha de instalación y la fecha de parada, se calculó el *run life* de la tubería en cada uno de los pozos. Seguido esto, se diseñó el sistema PCP para cada pozo con ayuda del software PC-Pump, esto con el objetivo de obtener el valor de las cargas de contacto entre la varilla y la tubería a la profundidad de la falla y de esta manera hacer el cálculo de la tasa de desgaste de la tubería a partir de la ecuación que utiliza PC-Pump. Los datos obtenidos se muestran en la tabla 4.

$$Wt = C * X * 10^{0.075 Y * S} * F_{\text{contacto}} \quad \text{Ecuación 5}$$

Wt : tasa de desgaste de tubería  $\left( \frac{\text{pulg}}{\text{MMrevs}} \right)$

S: contenido de arena %, para el caso del campo Casabe se uso un porcentaje de 4

X, Y : coeficientes de desgaste del material – acero = 1

C : constante, Inglés =  $7.2845 * 10^{-3}$

$F_{\text{contacto}}$  : carga de contacto distribuida  $\left( \frac{\text{lb}}{\text{ft}} \right)$ , obtenida a la profundidad de la falla

**Tabla 4. Primera intervención de algunos pozos perforados campaña 2014**

<b>POZOS PERFORADOS CAMPAÑA 2014 / COMPLETAMIENTO ORIGINAL PCP VARILLA CONTINUA</b>	<b>BLOQUE</b>	<b>Intervenciones</b>
Pozo 1	6	Limpieza de arena
Pozo 2	3,4 y 5	Limpieza de arena
Pozo 3	3,4 y 5	Limpieza de arena
Pozo 4	6	Limpieza de arena
Pozo 5	1 y 2	Limpieza de arena
Pozo 6	1 y 2	Limpieza de arena
Pozo 7	1 y 2	Tubería rota

Luego, se procedió a calcular el porcentaje de desgaste teórico de la tubería obtenido a partir de la ecuación de *Barlows* (ecuación 6). Para el uso de dicha ecuación, es necesario contar primeramente con el valor de espesor de la tubería, sin embargo como este valor era el objeto de estudio, se tomó este como variable para obtener una presión mayor o igual a la presión que presentaba la tubería al punto de falla, la cual se lee de la gráfica de presión en el *casing* y en el *tubing*, que se muestra en la figura 32.

$$P_b = 0.875 * \left[ \frac{2 * Y_p * t}{D} \right]$$

Ecuación 6

$P_b$  = Presión de cedencia interna, psi

$Y_p$  = Esfuerzo de cedencia mínimo, psi

$t$  = Espesor nominal de la pared, in

$D$  = Diámetro, in

**Tabla 5. Cargas y desgastes del software PC-Pump**

POZO	Carga F (lbf/ft)	Wt	% Desgaste
Pozo 1	1.5	0.0218	8.58
Pozo 2	1.7	0.0247	9.73
Pozo 3	1.3	0.0145	5.71
Pozo 4	1.4	0.0203	8.01
Pozo 5	1.3	0.0189	7.44
Pozo 6	1	0.0145	5.72
Pozo 7	1.2	0.0174	6.87
Pozo 8	2	0.0291	11.44
Pozo 9	2	0.0291	11.44
Pozo 10	2	0.0291	11.44
Pozo 11	1.3	0.0189	7.44
Pozo 12	4.2	0.0610	24.03

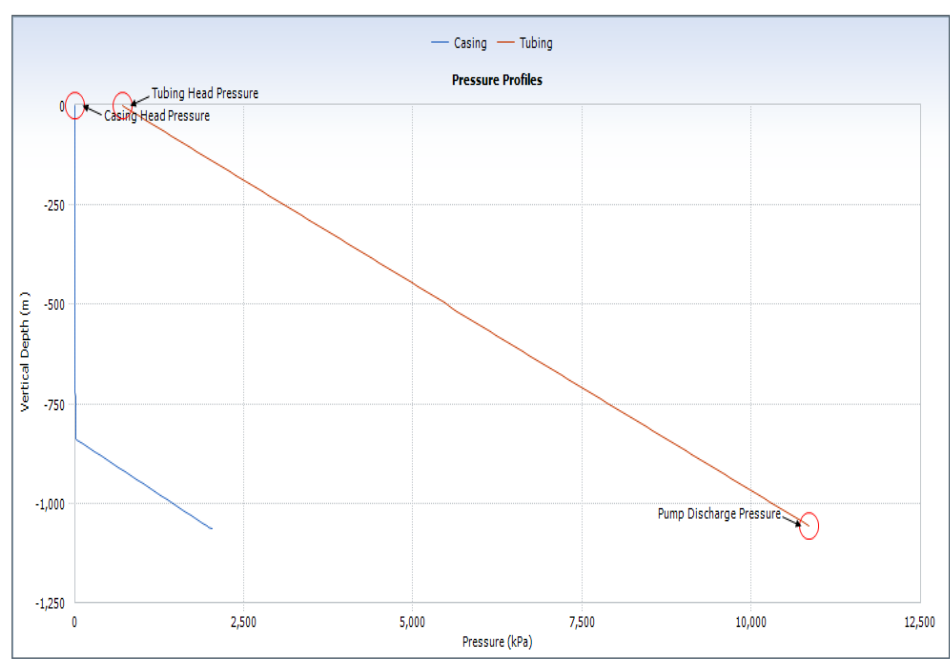
Una vez calculado el valor de presión en la tubería al punto de falla, se empezó a variar el espesor en la ecuación de *Barlows* hasta el punto de hallar un valor de espesor de la pared que diera el valor de presión en la tubería, tal como se muestra en la tabla 5.

Finalmente, se obtuvo la base de datos donde se compiló la siguiente información:

- Pozo
- Fecha de instalación de la tubería
- Fecha de parada
- *Run life*
- Grado, longitud y diámetro de la varilla
- Grado, longitud, diámetro y rango de la tubería
- Punto medio de los perforados

- Profundidad de la falla
- Tipo de pozo
- RPM
- Presión en la tubería a la profundidad de la falla
- Porcentaje de desgaste teórico
- Porcentaje de desgaste obtenido de PC-Pump

**Figura 31. Perfiles de presión en el *casing* y el *tubing***



Fuente. PC-Pump versión 3.7 C-FER, 2017.

Luego de obtener los valores de desgaste de la tubería teóricos y los calculados a partir del software PC-Pump, se realizó una comparación entre estos datos con el fin de calcular que tanto porcentaje de desviación presentaban, esta información se muestra en la tabla 6.

**Tabla 6. Desgaste obtenido de la ecuación de Barlows.**

POZO	Presión (psi)	t (espesor)	% Desgaste
Pozo 1	1437	0.0500	19.69
Pozo 2	1743	0.0500	19.69
Pozo 3	1247	0.0400	15.75
Pozo 4	1273	0.0470	18.50
Pozo 5	1039	0.0380	14.96
Pozo 6	860	0.0320	12.60
Pozo 7	994	0.0370	14.57
Pozo 8	1600	0.0590	23.23
Pozo 9	1421	0.0520	20.47
Pozo 10	1433	0.0530	20.87
Pozo 11	996	0.0370	14.57
Pozo 12	1090	0.0410	16.14

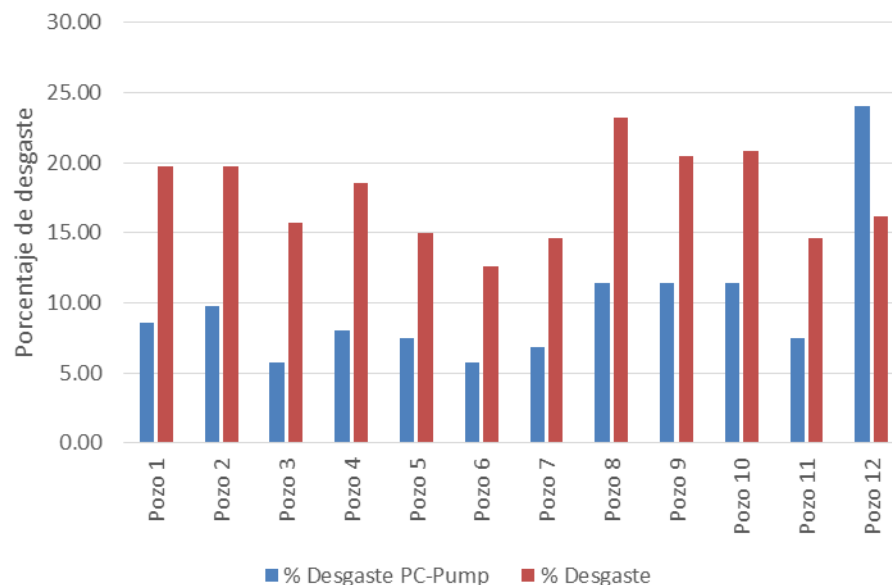
**Tabla 7. Desviación entre los datos de desgaste**

POZO	Wt PC-Pump	% Desgaste PC-Pump	Wt teórico	% Desgaste teórico	% Desviación
Pozo 1	0.0218	8.58	0.05	19.69	56.40
Pozo 2	0.0247	9.73	0.05	19.69	50.58
Pozo 3	0.0145	5.71	0.04	15.75	63.75
Pozo 4	0.0203	8.01	0.047	18.50	56.71
Pozo 5	0.0189	7.44	0.038	14.96	50.28
Pozo 6	0.0145	5.72	0.032	12.60	54.58
Pozo 7	0.0174	6.87	0.037	14.57	52.86
Pozo 8	0.0291	11.44	0.059	23.23	50.73
Pozo 9	0.0291	11.44	0.052	20.47	44.10
Pozo 10	0.0291	11.44	0.053	20.87	45.15
Pozo 11	0.0189	7.44	0.037	14.57	48.93
Pozo 12	0.0610	24.03	0.041	16.14	48.89

Con base en esto se puede evidenciar que los porcentajes de desviación entre los valores de desgaste están en un rango de 44.1 y 63.75%, lo que sugiere un comportamiento uniforme para la mayoría de los pozos, donde el porcentaje de desgaste calculado por el software PC-Pump es menor que el desgaste calculado a partir de la ecuación de Barlows, excepto en el pozo 12 donde el desgaste hallado por PC-Pump es mayor en 8 unidades al desgaste teórico. El alto porcentaje de desgaste calculado por PC-Pump en este pozo (24.03%) se debe a que es el pozo que presenta mayor carga de contacto entre la varilla y la tubería, producto del valor de *dogleg* que se presenta,  $2.55^{\circ}/100\text{ft}$ , siendo el pozo con el mayor *dogleg* de los pozos en estudio.

Luego de analizar el comportamiento del porcentaje de desviación entre los valores se procedió a variar los coeficientes de desgaste propuestos en la ecuación que usa PC-Pump con el objetivo de obtener porcentajes de desviación entre los datos menores al 15%. Para esto, se propuso los siguientes valores de coeficiente de desgaste, obteniéndose diferentes porcentajes de desviación para cada caso, tal como se muestra en la tabla.

**Figura 32. Porcentaje de desgaste teórico y desgaste calculado de PC-Pump.**



**Tabla 8. Porcentaje de desgaste a diferentes coeficientes**

POZOS	% desv (X,Y=1)	% desv (X = 1.2 Y=1)	% desv (X = 1.6 Y=1)	% desv (X = 1.9 Y=1.1)
Pozo 1	56.40	47.68	30.23	11.23
Pozo 2	50.58	40.70	20.93	0.61
Pozo 3	52.76	43.32	24.42	3.83
Pozo 4	56.71	48.05	30.73	11.86
Pozo 5	50.28	40.33	20.44	1.23
Pozo 6	54.58	45.50	27.33	7.53
Pozo 7	52.86	43.43	24.58	4.03
Pozo 8	50.73	40.88	21.17	0.31
Pozo 9	44.10	32.92	10.56	13.81
Pozo 10	45.15	34.18	12.24	11.66
Pozo 11	48.93	38.72	18.29	3.97
Pozo 12	48.89	38.63	17.98	3.61

Se puede observar en la tabla 7 que a valores de X y Y iguales a 1.2 y 1 respectivamente, el porcentaje de desviación está en el rango de 32.92 y 48.05, mientras que con valores de X= 1.6 y Y=1, el porcentaje de desviación disminuye a un rango de 10.56 y 30.73, sin embargo, este rango de desviación es alto. A partir de lo anterior, se determinó que los coeficientes de desgaste X y Y, en la ecuación del software PC-Pump que permiten obtener porcentajes de desviación con el desgaste de la ecuación de Barlows, en un rango menor a 15%, son 1.9 y 1.1 respectivamente, ya que como se muestra en la tabla el mayor porcentaje de desviación presentado es de 13.81. De manera que la ecuación ajustada para el cálculo de la tasa de desgaste de la tubería en el campo Casabe es la siguiente:

$$Wt = 7.2845 * 10^{-3} * X * 10^{0.075*Y*S} * F$$

Ecuación 7

$X = 1.9$

$Y = 1.1$

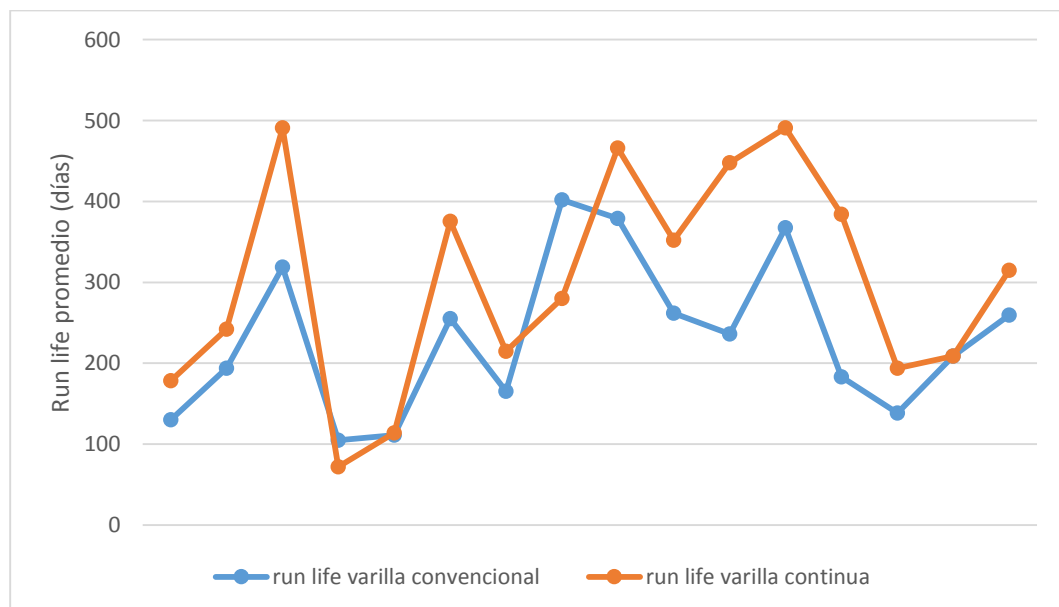
S = Contenido de arena, %

F = Carga de contacto distribuida, lbf/ft

#### 4.4 ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DESEMPEÑO DE LA VARILLA CONTINUA CON RESPECTO A LA VARILLA CONVENCIONAL.

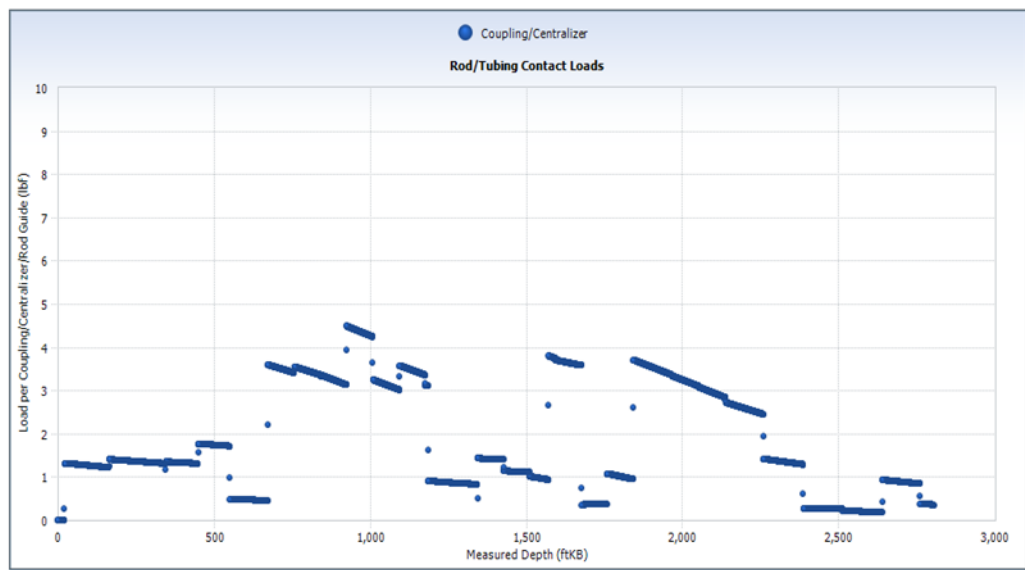
Considerando los resultados obtenidos en la gráfica 34, en la cual se aprecian los *run life* promedio de aquellos pozos en los cuales fueron utilizados ambos tipos de varilla, se evidencia que en el 88% de los casos estudiados la varilla continua supera en un promedio de 90 días el desempeño de la convencional, evaluados bajo las mismas condiciones de geometría y trayectoria de pozo. Cabe resaltar que en los pozos donde la varilla convencional presentó un mejor desempeño que la continua son de tipo vertical con una severidad de *dogleg* alrededor de los  $0.62^\circ/100\text{ft}$  y un ángulo de inclinación máxima de  $2.29^\circ$ .

**Figura 33. Comparación *run life* varilla continua vs varilla convencional.**



Por otra parte, a partir de los diseños en el software PC-Pump se pudo determinar que la tasa de desgaste máxima promedio de la tubería que se presentó cuando se usó varilla convencional fue de 7.62% por año, mientras que cuando se usó varilla continua la tasa de desgaste por año de la tubería fue menor con un valor de 3.66 %, lo que demuestra que el uso de la varilla continua en un sistema PCP permite disminuir el desgaste en la pared de la tubería de producción. Además de esto se observa que las cargas distribuidas entre la varilla convencional y la tubería se concentran más en puntos específicos de la tubería, conexiones o acoples, tal como se muestra en la figura 35, mientras que en el caso de la varilla continua las cargas se distribuyen de una manera más uniforme a través de la superficie del cuerpo de la tubería (figura 36).

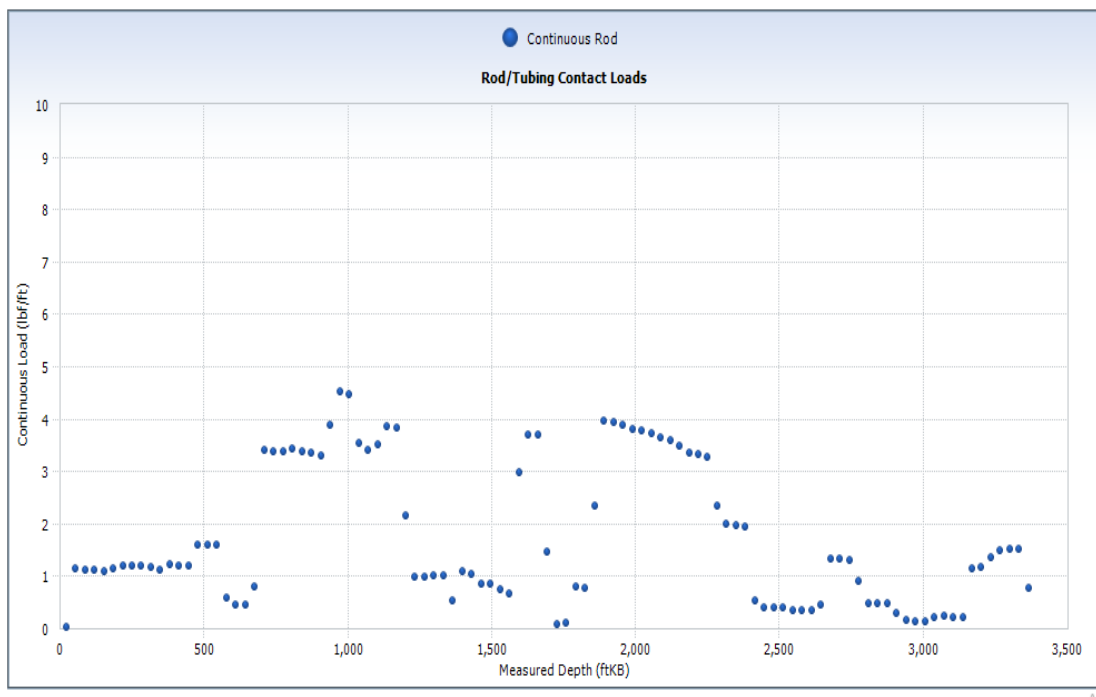
**Figura 34. Cargas de contacto entre la varilla convencional y la tubería para el pozo A.**



Fuente. PC-Pump versión 3.7 C-FER, 2017.

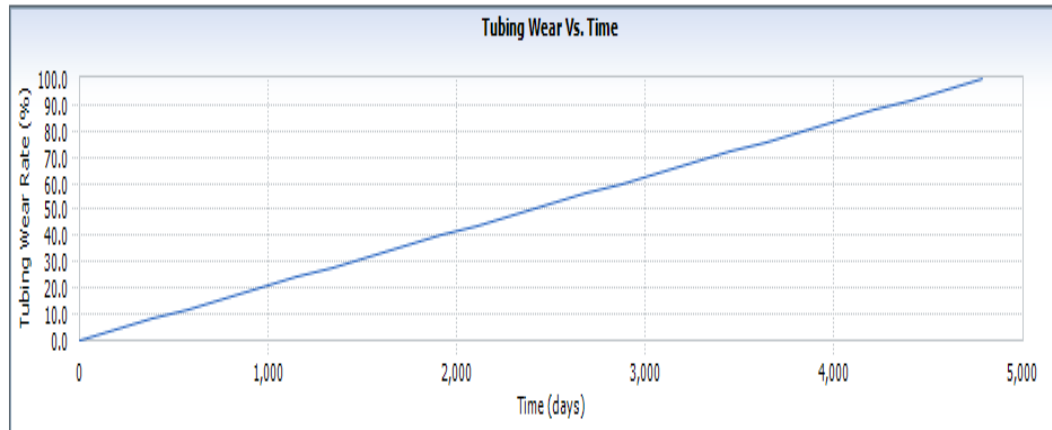
Finalmente, al comparar el *run life* al cual el 100% de la pared ha sido desgastada, calculado por PC-Pump, se comprueba que el *run life* de la tubería de producción al usar varilla continua es mayor en un 48% al *run life* de la tubería al usar varilla convencional, tal como se muestra en la figura 37 del pozo A en estudio

**Figura 35. Cargas de contacto entre la varilla continua y la tubería para**



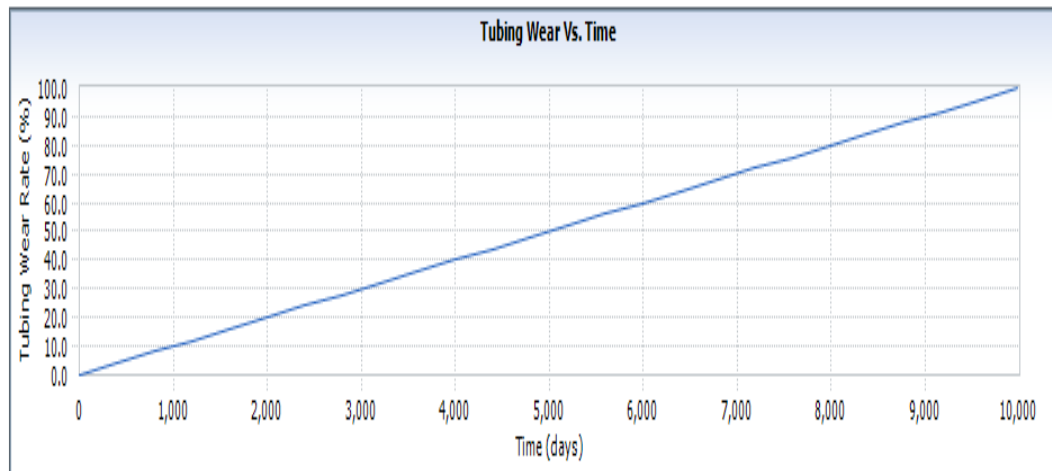
Fuente. PC-Pump versión 3.7 C-FER, 2017.

**Figura 36. Tasa de desgaste y *run life* de la tubería al usar varilla convencional para el pozo A.**



Fuente. PC-Pump versión 3.7 C-FER, 2017.

**Figura 37. Tasa de desgaste y *run life* de la tubería al usar varilla continua para el pozo A.**



Fuente. PC-Pump versión 3.7 C-FER, 2017.

## 5. FLUJOGRAMA OPERATIVO PARA LA SELECCIÓN, CRITERIO DE REUTILIZACIÓN, TRAZABILIDAD Y ALMACENAMIENTO DE LA VARILLA

Con la finalidad de establecer criterios y recomendaciones acerca del manejo de la varilla continua en campo y teniendo en cuenta los resultados obtenidos a partir del análisis de 282 eventos correspondientes a la base de datos de las diferentes corridas de diseños con sarta de varilla continua, se decide elaborar un flujograma que constituya una guía de procesos y buenas prácticas con el objeto de prolongar la vida útil de la varilla continua.

Considerando los resultados obtenidos del análisis estadístico de las figuras 16 y 17, se establece un umbral crítico de  $10^\circ$  de inclinación máxima y un *dogleg* crítico de  $2.5^\circ/100\text{ft}$ , a partir del cual disminuye en un 50% el *run life* con respecto a los pozos con *dogleg* entre los  $0.5$  y  $1.5^\circ/100\text{ft}$ .

Tomando como parámetro inicial la geometría y la trayectoria del pozo se definen ciertas recomendaciones de acuerdo al desempeño mostrado por cada uno de los grados de varilla. De esta manera se tiene para cada condición una guía para la selección de la varilla a utilizar.

Posteriormente, se recomienda realizar una inspección minuciosa de la varilla previa al *running* de la misma, con el propósito de detectar deformaciones que puedan convertirse en concentradores de esfuerzos ocasionando fallas por fatiga del material de forma prematura. Luego de realizado el *pulling* se procede a calibrar la varilla, calculando el desgaste, asimismo, se determina la condición de los diferentes componentes de la sarta (I, II o III), siendo I, óptima o varilla nueva, condición II, aceptable o varilla usada y III, rechazada. Una vez determinado el estado, se procede a analizar el máximo desgaste presentado.

Para este caso, se tomaron en cuenta los pozos tanto de varilla nueva como de varilla usada de la base de datos que presentaron falla por ruptura de varilla, se calculó un promedio del desgaste máximo evidenciado por cada uno antes de su reutilización. A partir del análisis se considero como criterio de reutilización aquellas varillas que presentan un porcentaje de desgaste menor a 17.4.

Una de las propuestas para garantizar una mayor confiabilidad en la trazabilidad de la varilla consiste en la marcación de esta a través de un número serial que permita identificar el movimiento pozo a pozo de la misma. De esta manera se obtendría información completa y detallada de la vida útil de la sarta.

Para ejemplificar las recomendaciones acerca del manejo operativo de la varilla continua propuestas en el flujograma se tomaron cuatro pozos, con geometrías y trayectorias similares, en los cuales se utilizaron diferentes diseños de grado de varilla y se comparó el desempeño de cada una de estas.

Para la selección del grado de varilla continua a utilizar se debe considerar como criterio principal la geometría y trayectoria del pozo. Para esto, primeramente se tomó el pozo CBE-1103 como caso de estudio, para el cual se identificó el tipo de pozo, a partir de la información extraída del survey, teniendo en cuenta el azimuth, inclinación y severidad de *dogleg* en profundidad, datos mostrados en la tabla 8.

Luego de obtener esta información, se determina qué tipo de geometría presenta el pozo, ya sea vertical, tipo J o tipo S, para el caso del CSBE 1103, su geometría es tipo S. El siguiente paso es evaluar si el pozo presenta un *dogleg* mayor a  $2.5^{\circ}/100\text{ft}$  y una inclinación máxima mayor a  $10^{\circ}$ , según la información consignada en la tabla 8 los valores de *dogleg* e inclinación máxima para el pozo en cuestión son  $3.52^{\circ}/100\text{ft}$  y  $16.46^{\circ}$  respectivamente, a partir de estos valores se determina que está en el rango establecido para seleccionar la varilla continua de grado PROROD 970N.

**Tabla 9. Propiedades de la varilla y geometría del pozo CBE 1108.**

POZO CBE-1103								
ROD STRING					GEOMETRÍA Y TRAYECTORIA			MÁXIMO DESGASTE
GRADO	CORRIDAS	OD	LONGITUD	RUN LIFE ACUMULADO (DÍAS)	TIPO	MÁXIMA INCLINACIÓN	MÁXIMO DOGLEG °/100ft	
PROROD 970N**	3	1"	3400'	744	S	16.46°	3.52	14.30%
PROROD 960M	2	1"	3385'	164				14.80%

A partir de las corridas de cada una de las varillas que se realizaron en el pozo CBE-1103, se establece que efectivamente el mejor desempeño lo presenta la varilla PROROD 970N con *run life* de 744 días, mientras que la PROROD 960M presenta un *run life* de 164 días (con diferencia de 580 días).

Seleccionada la varilla se procede a realizar el *running* de la misma, previo a ello, la cuadrilla encargada de la operación debe inspeccionar detalladamente el estado de la sarta de varilla. Luego del proceso de *running* e instalación del equipo de superficie, el pozo es puesto en producción.

Siguiendo lo trazado en el flujograma operativo, una vez se presenta la falla del pozo o es necesario realizar una intervención, se debe llevar a cabo el *pulling* de la varilla, durante este proceso se realiza la calibración e inspección, determinando así el porcentaje de desgaste frente al diámetro inicial. Asimismo se establece la condición de operatividad (I, II o III) .Para el caso del CBE-1103, la varilla se determina aceptable (condición II), los cuatro pin ends se consideran operativos mientras que el *shear coupling* se considera no operativo.

Continuando con el proceso planteado en el flujograma, se establece la condición de varilla antes del *running*. Teniendo en cuenta el caso de estudio, se determina

que la varilla utilizada de grado PROROD 970N era usada. Se procede a verificar el valor de máximo desgaste de la varilla, tomado del reporte de inspección de la sarta, el cual fue de 12.6%. Según lo establecido, si la varilla usada presenta un desgaste máximo menor al 17.4% se considera apta para su reutilización (*rerun*).

Otros de los pozos seleccionados para evaluar el desempeño de la varilla y las recomendaciones según el flujograma establecido, fueron el CBE 1452 y CBE 1453. La selección de estos pozos se realizó debido a que presentan valores de *dogleg* e inclinación máxima similares (tabla 9).

**Tabla 10. Propiedades de la varilla y geometría de los pozos CBE 1452 y CBE 1453.**

POZO	ROD STRING					GEOMETRÍA Y TRAYECTORIA		
	GRADO	CORRIDAS	OD	LONGITUD	RUN LIFE ACUMULADO (DÍAS)	TIPO	MÁXIMA INCLINACIÓN	MÁXIMO DOGLEG °/100ft
CBE-1453	SWR 6**	2	1"	2572'	1303	S	5.43°	1.96
CBE-1452	SER 8.5	1	1.156"	2760'	758	S	5.68°	1.92
	PROROD 960M	1	1.125"	2727'	53			
		1	1"	2677'	44			

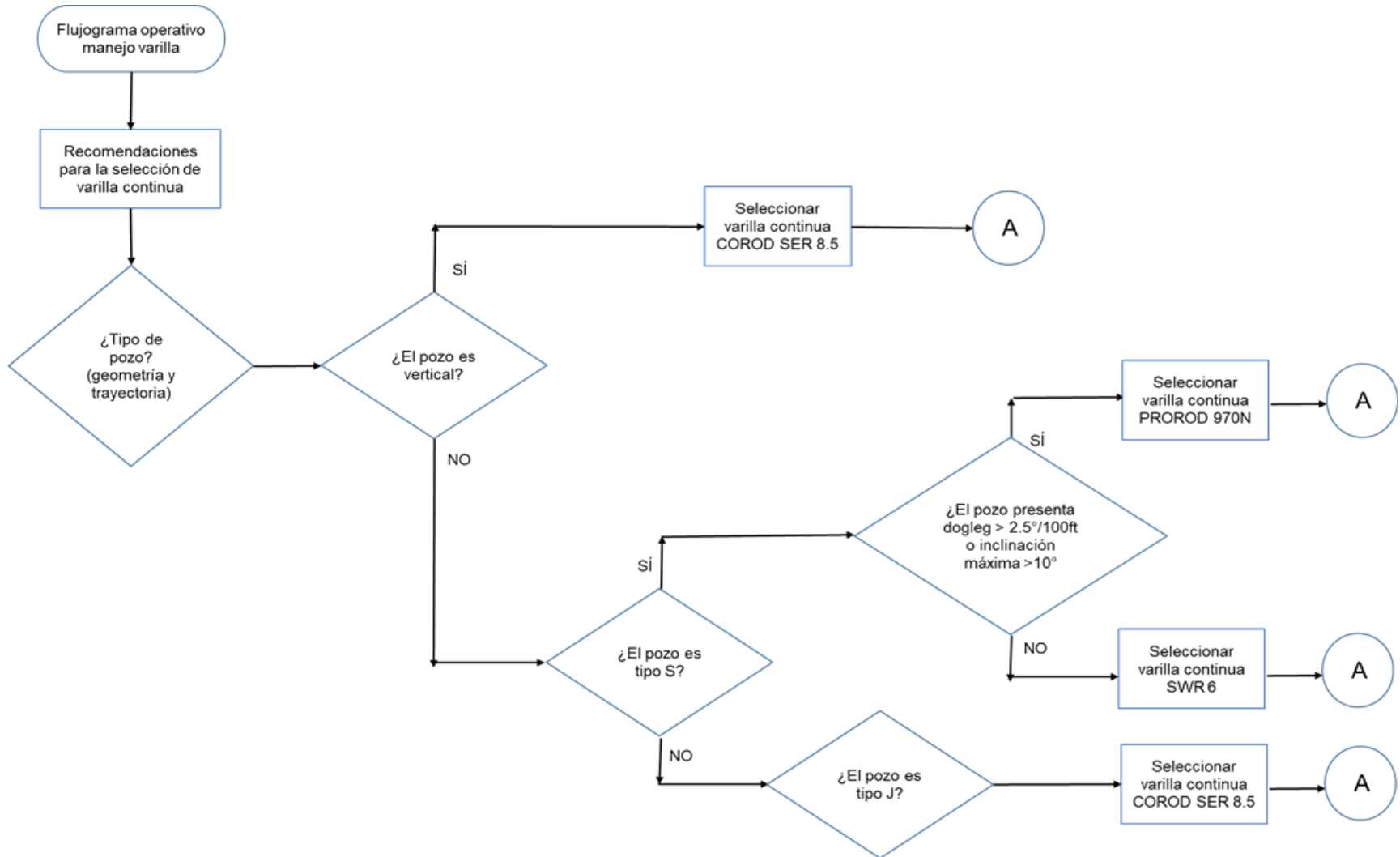
Siguiendo las indicaciones del flujograma se establece que la varilla continua grado SWR 6 es la óptima en ambos casos, dado que son pozos con geometría tipo S, inclinación máxima menor a 10° y *dogleg* menor a 2.5°/100ft. Al comparar el desempeño entre las diferentes corridas de los pozos, se observa que la varilla grado SWR 6 utilizada en el CBE 1453 presento un mejor desempeño (1303 días) a diferencia de la varilla SER 8.5 (758 días) y PROROD 960M (53 y 44 días) utilizadas en el CBE 1452.

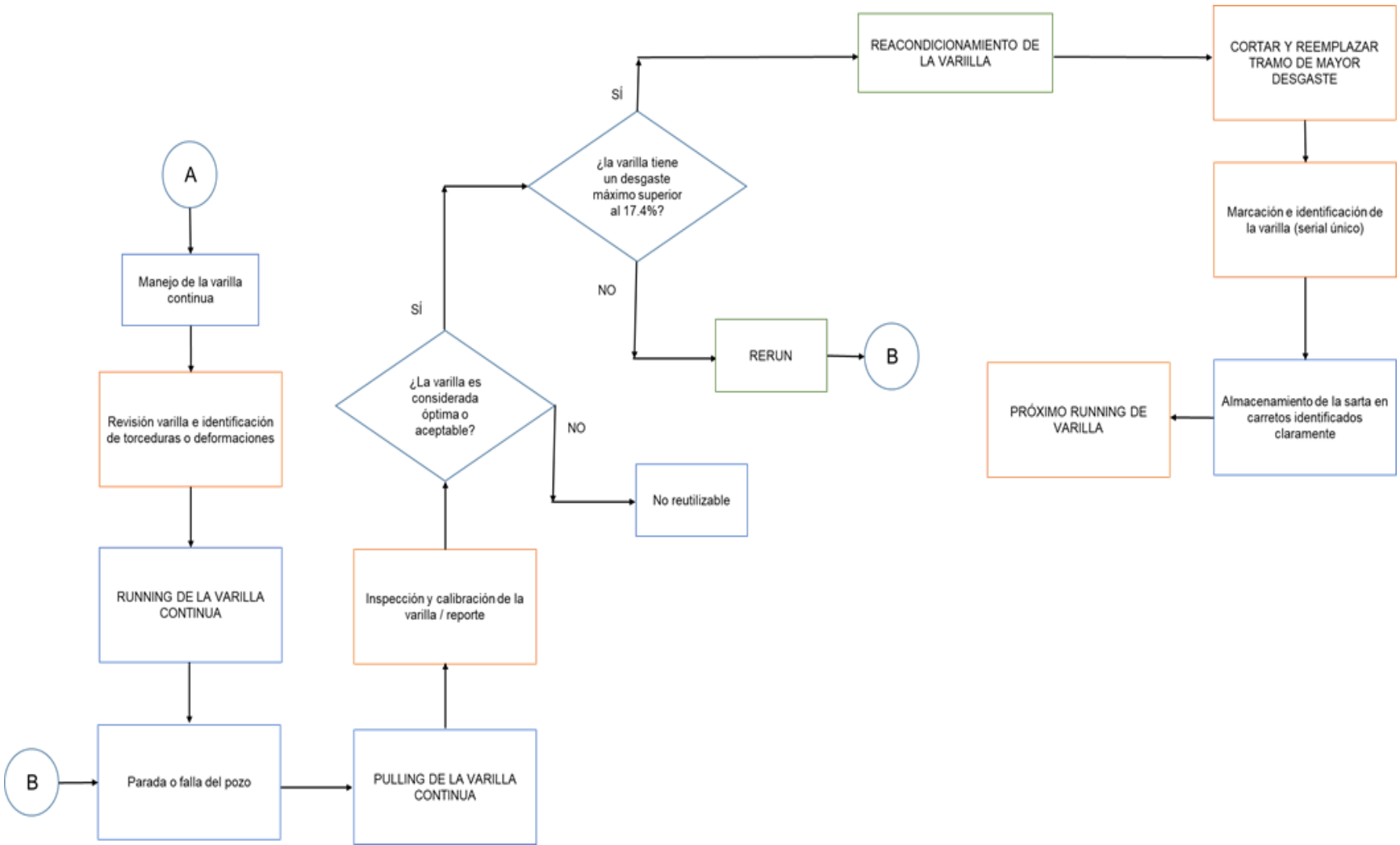
Finalmente, se evaluó el pozo CBE 1409, el cual presenta una geometría tipo J, a partir de las sugerencias planteadas en el flujograma se establece que la varilla a

utilizar es la SER 8.5. Esta información se puede constatar con las corridas realizadas en el pozo de estudio, donde se evidencia que efectivamente la varilla grado SER 8.5 presentó el mayor *run life* (490 días) comparado con el desempeño de la varilla PROROD 960M, la cual tuvo 171 días de *run life*.

**Tabla 11. Propiedades de la varilla y geometría del pozo CBE 1409.**

POZO CBE-1409								
ROD STRING					GEOMETRÍA Y TRAYECTORIA			MÁXIMO DESGASTE
GRADO	CORRIDAS	OD	LONGITUD	RUN LIFE ACUMULADO (DÍAS)	TIPO	MÁXIMA INCLINACIÓN	MÁXIMO DOGLEG °/100ft	
SER 8.5**	1	1.156"	2540'	490	J	1.76	1.77	14.30%
PROROD 960M	1	1.125"	2186'	171				14.80%





## 6. CONCLUSIONES

- La varilla de grado PROROD 960M que corresponde al 41% de los casos estudiados muestra el desempeño más bajo (210 días) al ser comparado con los diferentes grados, mientras que grados menos masificados en su uso (DER 8.5, SWR 6 y PROROD 970) presentan *run life* promedio de 1320.5, 1303 y 501 días respectivamente al analizar diferentes escenarios y condiciones.
- A partir del análisis de resultados se concluye que la trayectoria del pozo influye de manera directa en el desempeño de la varilla, teniendo en cuenta que a mayor inclinación y variación del azimut se verá afectado negativamente el *run life* de la varilla, tal como se observó en los pozos verticales, tipo J y tipo S, donde los *run life* fueron de 495, 460 y 396 días respectivamente.
- Como resultado de la comparación entre los diseños con sarta de varilla convencional y continua se evidencia que la varilla continua supera en un promedio de 90 días el desempeño de la convencional, evaluadas bajo las mismas condiciones de geometría y trayectoria de pozo.
- A partir de los diseños realizados en el software PC-Pump se concluye que la magnitud y comportamiento de las cargas de contacto entre la sarta de varillas y la tubería de producción depende básicamente de la geometría del pozo y de la configuración de ambas. En el caso de la geometría del pozo se observó que las mayores cargas de contacto se presentan en los puntos donde existen máximos *dogleg*. De la misma manera, cuando se presenta una configuración de varilla convencional con tubería, las cargas se distribuyen en ciertos puntos (conexiones), mientras que en el caso de varilla

continúa con tubería, las cargas se distribuyen de manera uniforme a través de la superficie de la tubería lo que disminuye la tasa de desgaste (48% en los casos estudiados) y aumenta la vida útil de la tubería de producción en aproximadamente 50%.

- La desviación encontrada entre los datos de desgaste obtenidos y el proporcionado por la ecuación que usa el software PC-Pump, se hallan entre 44.1 y 63.75%, por lo cual se hizo necesario realizar un ajuste a la correlación a través de la modificación de los coeficientes de desgaste del material (X y Y). Los valores obtenidos para ambos mediante este procedimiento fueron 1.9 y 1.1 respectivamente, los cuales permitieron obtener porcentajes de desviación menores al 14% entre los desgastes comparados.
- Teniendo en cuenta el análisis realizado acerca de los pozos que presentaron falla por varilla se evidencia que no existe una relación directa entre el efecto rotativo de la sarta y el desempeño de ésta. Dado que pozos que sostuvieron valores de 150 RPM promedio, mostraron desempeños que oscilaban entre los 32 y 255 días. Por otro lado, pozos que mantuvieron velocidades de 200 RPM presentaron *run life* entre 300 y 751 días.

## 7. RECOMENDACIONES

- Como complemento a la investigación realizada se recomienda a partir de la información de los reportes de calibración desarrollar una correlación que determine el desgaste de la varilla teniendo en cuenta parámetros como la longitud de la sarta, grado, diámetro y condiciones operacionales, similar a la planteada por el software PC-PUMP para el desgaste de la tubería de producción.
- Se recomienda iniciar un proceso de identificación de las varillas nuevas adquiridas por el campo, con un número serial único, que permita identificar la sarta desde el principio de su vida útil y de esta forma garantizar su trazabilidad. De esta forma cuando esta sea utilizada en diferentes pozos sea posible obtener un *run life* acumulado de todas las corridas realizadas.
- De la misma forma se sugiere la creación de una base de datos para la tubería de producción donde se registre el desgaste presentado al momento de realizar una intervención a pozo. Con esta información será posible realizar un estudio más detallado acerca de la influencia de las condiciones operaciones del sistema sobre el desgaste de la tubería de producción.

## BIBLIOGRAFÍA

AMAYA, M., *et al.* Casabe: Revitalización de un campo maduro. Oilfield Review. V. Primavera, 2010.

BARRUS, D. J.; TETZLAFF, S. K. Progressive cavity pump with flexible coupling, 1996.

CIULLA, F. Principios Fundamentales para Diseño de Sistemas con Bombas de Cavidad Progresiva. Weatherford Artificial Lift Systems, 2003.

COROD Continuous Rod. Weatherford, 2016. (Recuperado en 23 de Diciembre de 2017) Disponible en <https://weatherford.com/en/documents/technical-specification-sheet/products-and-services/production-optimization/crod-continuous-rod-wft312437/>

COROD Continuous Rod and Well Services. Weatherford, 2013. (Recuperado en 5 de Enero de 2018). Disponible en <https://www.weatherford.com/en/documents/brochure/products-and-services/production-optimization/corod-continuous-rod-and-well-services/>

DUNN. Lonnie. Progressing Cavity Pumping Systems Overview with a Focus on Coalseam Gas Applications. Weatherford. 2015. (Recuperado en 2 de Enero de 2018) Disponible en <https://www.spe-qlid.org/useruploads/files/pcpspeaustraliafinalv1.pdf>

GAMBOA, J., *et al.* Understanding the performance of a progressive cavity pump with metallic stator. In Proceedings of the 20th International Pump Users Symposium. Texas A&M University. Turbomachinery Laboratories, 2003.

HIRSCHFELDT, M. Manual de Bombeo de Cavidades Progresivas. Bs.Aires, 2008.

KLEIN, S. T., *et al.* Well optimization package for progressive cavity pumping systems. In SPE Mid-Continent Operations Symposium. Society of Petroleum Engineers, 1999.

LEA, J. F.; ANDERSON, P. O., & ANDERSON, D. G. Optimization of progressive cavity pump systems in the development of the Clearwater heavy oil reservoir. Journal of Canadian Petroleum Technology, 27(01), 1988.

LONNIE, D. Progressing Cavity Pumping Systems Overview. SPE Queensland Brisbane Conference. Brisbane, 2016.

MALDONADO, L. Análisis del comportamiento y vida útil de las varillas en los sistemas de levantamiento artificial tipo PCP y bombeo mecánico en el campo La Cira-Infantas. Trabajo de grado. Escuela de Ingeniería de Petróleos, UIS, 2012.

NOONAN, S. G., & SKOCZYLAS, P. A. Saskatchewan Field Trial to Better Understand Downhole Dynamics of PCP Systems. In SPE Progressing Cavity Pumps Conference. Society of Petroleum Engineers, 2010.

ORR, R. Continuous Rod Strings Enhance Artificial Lift in Deviated Wells. Upstream Pumping, 2014.

PATTON, L. D. Continuous-rod Pumping: A field-proved Concept. American Petroleum Institute. 1970.

PRO-ROD Optimize your Rod Lift Systems with Pro-Rod. Dover Artificial Lift. 2016. (Recuperado en 11 de Enero de 2018) Disponible en [https://www.doverals.com/assets/img/brochures/Pro\\_Rod\\_Brochure\\_06-13-16\\_1.pdf](https://www.doverals.com/assets/img/brochures/Pro_Rod_Brochure_06-13-16_1.pdf)

ROMERO, O. J., & Almeida, P. Numerical simulation of the sucker-rod pumping system. *Ingeniería e Investigación*, 34(3), 2014. p. 4-11.

SHI, C., HAIWEN, W., & WEI, Z. Mechanism Study on Eccentric Wear of Rod in Production Well by Adopting Progressive Cavity Pump. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2007.

STANKO, M., *et al.* Model-Based Production Optimization of the Rubiales Field, Colombia. In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers, 2015.

WILTSE, D. J; WEIR, B. A. Eliminating Sucker Rod Couplings Can Reduce Progressing Cavity Pump Operating Costs. *Society of Petroleum Engineers*. SPE 30275, 1995.