

**IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ (ACR)  
PARA LA REDUCCIÓN DEL ÍNDICE DE FALLAS EN LA SARTA DE VARILLA DE  
LOS POZOS CON BOMBEO DE CAVIDAD PROGRESIVA EN CAMPO LA CIRA  
INFANTAS DE LA CUENCA DEL VALLE MEDIO DEL MAGDALENA**

**GABRIEL AUGUSTO MOLINARES ABAUNZA  
NOHORA CAROLINA TORRES GONZÁLEZ**

**PROYECTO INTEGRAL DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO DE PETRÓLEOS**

**ORIENTADOR:**

**ING. EDINSON ENRIQUE JIMÉNEZ BRACHO  
INGENIERO DE PETRÓLEOS**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BOGOTÁ D.C.**

**2024**

## NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

---

---

**Ing. Edinsón Enrique Jiménez**  
**Bracho**

---

**Arnul David Paz**  
Firma del presidente del jurado

---

**Yatnielah Isbel Pirela Roperó**  
Firma del jurado

Bogotá D.C. enero de 2024

## DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

**Dr. Mario Posada García-Peña**

Consejero Institucional

**Dr. Luis Jaime Posada García-Peña**

Vicerrectora Académica

**Dra. María Fernanda Vega de Mendoza**

Vicerrector Administrativo y Financiero

**Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro**

Vicerrectora de Investigaciones y Extensión

**Dra. Susan Margarita Benavides Trujillo**

Secretario general

**Dr. José Luis Macías Rodríguez**

Decano de la Facultad de Ingenierías

**Ing. Naliny Patricia Guerra Prieto**

Director del Departamento de Energías/Programa de Ingeniería de Petróleos

**Ing. Naliny Patricia Guerra Prieto**

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores

## **DEDICATORIA**

Al concluir una etapa maravillosa de mi vida quiero extender un profundo agradecimiento, a quienes hicieron posible este sueño, aquellos que junto a mí caminaron en todo momento y siempre fueron inspiración, apoyo y fortaleza. Esta mención en especial para DIOS, mis padres Luis Antonio Molinares Barrios y Deifilia Mercedes Abaúnza Sepúlveda, mis hermanos, y mi familia. Muchas gracias a ustedes por demostrarme que «El verdadero amor no es otra cosa que el deseo inevitable de ayudar al otro para que este se supere».

También quiero dedicar la tesis a los familiares que ya no están, abuelos, tío y mi hermana Laura Vanessa Molinares Martínez que donde quiera que esté, sé que estarás alegre de ver cumplir mi sueño.

***Gabriel Augusto Molinares Abaunza***

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a mis padres, por su amor incondicional, apoyo constante y sacrificio a lo largo de mi vida y durante este arduo proceso de ser profesional. A mis hermanos quienes han sido un apoyo fundamental a lo largo de mi carrera.

También quiero dedicar esta tesis a Julián, mis amigos, quienes han sido una fuente constante de ánimo y motivación. Sus palabras de ánimo y su paciencia han sido fundamentales para mi desarrollo académico y personal.

A mi abuela y mi mejor amigo quienes ya no me acompañan con su presencia pero que fueron parte fundamental en mi crecimiento personal y profesional.

Por último, a todos los profesores que me han guiado a lo largo de este camino académico. Su conocimiento y orientación han sido invaluable y han contribuido de manera significativa a mi formación.

A todos ustedes, les dedico este logro. Sin su apoyo y amor, no habría sido posible. Gracias por estar siempre a mi lado.

***Nohora Carolina Torres González***

## **AGRADECIMIENTOS**

Primero que todo agradecer a Dios por permitirme culminar esta etapa universitaria, también quiero agradecer a mi familia la cual siempre me ha apoyado en este camino que no fue sencillo, pero que gracias al aporte de ellos, amor y bondad pude salir adelante y cumplir mi sueño.

Quiero agradecer a cada uno de los profesores que fueron parte de mi formación académica y me aportaron sus conocimientos para crecer como profesional, en especial a mi director de tesis Edinson Jiménez por el tiempo que nos brindó.

También mi agradecimiento sincero al asesor de mi tesis, Jhon Lizcano por su apoyo y ofrecerme los recursos para ejecutar la tesis.

Gracias a la vida porque cada día me demuestra lo hermosa que es y lo justa que puede llegar a ser.

***Gabriel Augusto Molinares Abaunza***

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a todas las personas que contribuyeron de manera significativa a la realización de esta tesis:

A mi director de tesis, Edinson Jiménez, por su orientación experta, paciencia y dedicación constante a lo largo de este proyecto. Sus conocimientos y consejos fueron fundamentales para dar forma a esta investigación.

A mis compañeros de estudio en especial a Gabriel Molinares por compartir sus conocimientos y experiencias, y por crear un ambiente colaborativo y enriquecedor.

A mis amigos y familiares, quienes me brindaron su amor, comprensión y ánimo en todo momento. Su apoyo emocional fue esencial para superar los momentos de dificultad.

A Julián su amor incondicional, apoyo constante y paciencia infinita han sido una fuente de fortaleza para mí.

Agradezco a todos los profesores quienes impartieron cursos fundamentales durante mi carrera, les agradezco por compartir su sabiduría y su pasión por el conocimiento. Sus enseñanzas han sido un faro en mi camino académico.

***Nohora Carolina Torres González***



## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	15
INTRODUCCIÓN	16
1.PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
2.JUSTIFICACIÓN	19
3.OBJETIVOS	20
3.1 Objetivo genreal	20
3.2 Objetivos específicos	20
4.MARCO TEÓRICO	21
4.1 Sistemas de levantamiento artificial	21
4.2 Bombeo por cavidades progresivas	21
4.2.1 <i>Componentes de la bomba por cavidades progresivas</i>	23
4.3 Fallas en los sistemas de levantamiento artificial	27
4.3.1 <i>Fallas por tensión</i>	27
4.3.2 <i>Fallas por fatiga</i>	28
4.3.3 <i>Fallas mecánicas</i>	29
4.3.4 <i>Fallas de varilla por flexión</i>	29
4.3.5 <i>Fallas por daños superficiales</i>	30
4.3.6 <i>Fallas de conexión</i>	30
4.3.7 <i>Fallas de fatiga por corrosión</i>	31
4.4 Metodología de análisis causa raíz (ACR)	32
5.METODOLOGÍA	34
5.1 Identificaciópn de los pozos críticos en el Campo La Cira Infantas	34
5.2 Aplicación de la metodología de análisis de causa raíz (ACR)	39

5.3	Simulación de los pozos mediante el uso del software especializado	40
5.4	Condiciones de operación iniciales de los pozos	44
6.	RESULTADO Y ANÁLISIS	46
6.1	Selección de los pozos críticos en el Campo La Cira Infantas	46
6.2	Análisis del pozo LCIG&C-1	48
	<i>6.2.1 Análisis del problema. Pozo perforado el día 23 de junio de 2008, el cual fue contemplado como pozo productor iniciando su operación con sistema de bombas con cavidades progresivas para el Campo La Cira Infantas</i>	48
	<i>6.2.2 Alternativas de solución. Finalmente, se identificaron las acciones correctivas para disminuir la frecuencia de la falla en la sarta de varillas en el pozo LCIG&amp;C-1, entre ellas se destaca</i>	54
6.3	Análisis del pozo LCIG&C-8	54
	<i>6.3.1 Análisis del problema. Pozo perforado en el día 14 de junio de 1947, el cual fue contemplado como pozo productor en la formación Mugrosa para el Campo La Cira Infantas</i>	54
	<i>6.3.2 Alternativas de solución. Finalmente, se identificaron las acciones correctivas para disminuir la frecuencia de la falla en la sarta de varillas en el pozo LCIG&amp;C-8, entre ellas se destaca</i>	60
6.4	Análisis del pozo LCIG&C-20	60
	<i>6.4.1 Análisis del problema. Pozo perforado en el día 26 de noviembre de 2008, el cual fue contemplado como pozo productor iniciando su operación con sistema de bombeo mecánico para el Campo La Cira Infantas</i>	60
	<i>6.4.2 Alternativas de solución. Finalmente, se identificaron las acciones correctivas para disminuir la frecuencia de la falla en la sarta de varillas en el pozo LCIG&amp;C-20, entre ellas se destaca</i>	67
6.5	Resultados de las simulaciones de los pozos	67
7.	CONCLUSIONES	75

REFERENCIAS	77
ANEXOS	79

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 <i>Sistema de bombeo con cavidades progresivas</i>	22
Figura 2 <i>Partes principales del sistema de bombeo con cavidades progresivas</i>	24
Figura 3 <i>Falla de varilla por tensión</i>	28
Figura 4 <i>Falla de varilla por flexión</i>	30
Figura 5 <i>Falla de varilla por daños en superficie</i>	30
Figura 6 <i>Falla de varilla por conexión</i>	31
Figura 7 <i>Falla de varilla por corrosión</i>	32
Figura 8 <i>Diagrama causa – efecto</i>	33
Figura 9 <i>Distribución de los Sistemas de Levantamiento Artificial en el Campo La Cira Infantas</i>	35
Figura 10 <i>Estadística de las fallas recurrentes de los sistemas con bombeo por cavidades progresivas</i>	36
Figura 11 <i>Criterios de selección de los pozos en el Campo La Cira Infantas</i>	39
Figura 12 <i>Ventana geometría del pozo en el simulador PC-PUMP</i>	41
Figura 13 <i>Ventana configuración de equipos en el simulador PC-PUMP</i>	42
Figura 14 <i>Ventana configuración de propiedades de los fluidos en el simulador PC-PUMP</i>	42
Figura 15 <i>Ventana condiciones de operación en el simulador PC-PUMP</i>	43
Figura 16 <i>Ventana sección de resultados del simulador PC-PUMP</i>	44
Figura 17 <i>Evidencia fotográfica de la falla por varilla partida del pozo LCIG&amp;C-1</i>	53
Figura 18 <i>Diagrama de causa-efecto del pozo LCIG&amp;C-1</i>	53
Figura 19 <i>Evidencia fotográfica de la falla por varilla partida del pozo LCIG&amp;C-8</i>	58
Figura 20 <i>Evidencia fotográfica del rotor con rozamiento sobre el pin de paro en el pozo LCIG&amp;C-8</i>	59
Figura 21 <i>Diagrama de causa-efecto del pozo LCIG&amp;C-8</i>	59
Figura 22 <i>Evidencia fotográfica de la falla por varilla partida del pozo LCIG&amp;C-20</i>	65
Figura 23 <i>Evidencia fotográfica del rotor con rozamiento sobre el pin de paro en el pozo LCIG&amp;C-20</i>	66

Figura 24 <i>de causa-efecto del pozo LCIG&amp;C-20</i>	66
Figura 25 <i>Espaciamiento de la varilla del pozo LCIG&amp;C-8 sin el perfil de temperatura</i>	70
Figura 26 <i>Espaciamiento de la varilla del pozo LCIG&amp;C-8 con el perfil de temperatura</i>	71
Figura 27 <i>Espaciamiento de la varilla del pozo LCIG&amp;C-20 sin el perfil de temperatura</i>	73
Figura 28 <i>Espaciamiento de la varilla del pozo LCIG&amp;C-20 con el perfil de temperatura</i>	74

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 <i>Consolidado de las fallas por varilla en los sistemas con bombeo por cavidades progresivas</i>	37
Tabla 2 <i>Condiciones iniciales de operación de los pozos</i>	45
Tabla 3 <i>Evaluación de los dos (2) criterios para seleccionar los pozos en el Campo La Cira Infantas</i>	47
Tabla 4 <i>Variables identificadas en el pozo LCIG&amp;C-1 con sus respectivas preguntas</i>	49
Tabla 5 <i>Variables identificadas en el pozo LCIG&amp;C-8 con sus respectivas preguntas</i>	55
Tabla 6 <i>Variables identificadas en el pozo LCIG&amp;C-20 con sus respectivas preguntas</i>	62
Tabla 7 <i>Análisis de las variables obtenidas del pozo LCIG&amp;C-8</i>	69
Tabla 8 <i>Análisis de las variables obtenidas del pozo LCIG&amp;C-20</i>	72

## RESUMEN

El presente trabajo de grado tuvo como objetivo fundamental el análisis de las fallas en la sarta de varillas en los pozos con bombeo de cavidades progresivas en el Campo La Cira Infantas en la Cuenca del Valle Medio del Magdalena mediante la aplicación de la metodología de Análisis de Causa Raíz (ACR), la cual ha demostrado ser muy útil en la identificación de fallas recurrentes.

La metodología de trabajo se enmarcó en la selección de los pozos con fallas críticas por varilla en los sistemas con bombeo por cavidades progresivas en los últimos años, 2019 – 2023. Para ello, se establecieron dos (2) criterios de selección, los pozos con tiempo de duración o *run life* menor o igual a 150 días y los pozos con alto potencial de producción de crudo con valores superiores a los 20 BOPD, lo que permitió la selección de los pozos LCIG&C-1, LCIG&C-8 y LCIG&C-20 para aplicar la metodología de ACR.

Posteriormente, se recopiló información del histórico de intervención de los pozos, de reportes de producción, de operación, de Dinason y de los diseños realizados por los ingenieros especialistas en la empresa para profundizar un poco sobre las posibles causas de las fallas y determinar su causa raíz. A partir de ello, se plantearon las respectivas alternativas de solución para mitigar la recurrencia de las fallas a corto plazo, las cuales fueron validadas mediante el uso del software PC – PUMP.

Como resultados se obtuvo que el pozo LCIG&C-1 tiene asociada una causa raíz por el proceso de soldadura del *pin end* inferior en la sarta de varilla y los pozos LCIG&C-8 y LCIG&C-20 presentan problemas en el procedimiento de espaciamento.

**PALABRAS CLAVE:** análisis causa raíz, bombeo cavidad progresiva, índice falla, Cira Infantas.

## INTRODUCCIÓN

Los sistemas de levantamiento artificial generalmente se aplican para maximizar la tasa de producción de un pozo cuando la energía del yacimiento no es suficiente para responder a la demanda de producción requerida. Dentro de estos sistemas se destacan las bombas de cavidades progresivas (PCP) que son bombas de desplazamiento positivo fundamentadas en el principio de Moineau's, su geometría consta de un motor instalado en superficie que transmite movimiento giratorio a una sarta de varillas conectadas a un equipo de bombeo de subsuelo, constituidas principalmente por un rotor metálico y un estator de elastómero sintético [1]. Estos sistemas son ampliamente utilizados para la extracción de petróleo con diferentes gravedades API, desde crudos extra pesados hasta crudos livianos, además tienen un bajo costo de inversión inicial y de mantenimiento y su instalación y operación es sencilla.

Usualmente, la mayoría de las fallas en los sistemas PCP se asocian a la bomba de fondo, varilla de bombeo o sarta de tubería de producción. Principalmente, los problemas de varilla son por: fallas mecánicas, flexión, diseño y operación, daños en superficie, conexión, corrosión y defectos de fabricación [2]. Cualquiera de las fallas que ocurra en el sistema es un evento catastrófico que genera pérdidas por producción diferida y elevados costos, dado que requiere la intervención de personal y equipos especializados. Por ello, es importante la identificación de las causas que ocasionan la falla, dado que conllevan a la implementación de soluciones que minimizan la recurrencia de estas.

El Análisis de Causa Raíz (ACR) es una metodología que permite la identificación de la causa primaria que ocasiona la falla o incidente que ocurre una o varias veces, permitiendo la implementación de acciones correctivas que minimizan su recurrencia [3]. El ACR es un método muy utilizado para solucionar fallas de tipo crónico, que suceden más de una vez por la misma razón.

Por lo anterior, el presente trabajo de grado tiene como objetivo la implementación de la metodología de Análisis de Causa Raíz (ACR) para identificar los tipos de falla relacionados con la sarta de varilla, a fin de mejorar el funcionamiento de los sistemas PCP en el Campo La Cira Infantas en la Cuenca del Valle Medio del Magdalena.



## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El Campo La Cira Infantas se encuentra ubicado en la Cuenca del Valle Medio del Magdalena, en el departamento de Santander, en el corregimiento El Centro. Cuenta con 1.157 sistemas de levantamiento artificial en pozos productores, con una producción alrededor de los 40.000 barriles de petróleo por día (BOPD), donde cerca del 18% de los pozos productores operan con bombas de cavidades progresivas. No obstante, el uso de esta tecnología ha conllevado a que las instalaciones de estos sistemas no siempre sean exitosas, dado que se presentan fallas en el sistema, ocasionando pérdidas por producción.

Fundamentalmente, las fallas asociadas a las varillas pueden ser de varios tipos, entre estas se destacan las que son por fallas mecánicas, flexión, diseño y operación, daños en superficie, conexión, corrosión y defectos de fabricación [2]. Según el informe especial que la empresa Norris realizó en el año 2020 sobre el análisis de las fallas de las varillas de bombeo se puede evidenciar las siguientes causas de las fallas en los pozos con extracción artificial. Las fallas mecánicas son responsables de un gran porcentaje de número total de todas las fallas de las sargas de varillas. El daño mecánico en la sarga de varillas contribuye a un elevador de esfuerzo, el cual causa fallas en las varillas de bombeo. Este daño puede ser causado por el diseño ineficaz del elevador artificial, procedimientos inadecuados de cuidado y manipulación, procedimientos descuidados de montaje y desconexión o cualquier combinación de esos elementos. Por otra parte, si una varilla de bombeo esta doblada, este es un indicativo de ocasionar una falla. Cualquier grado de flexión en la varilla ocasiona un aumento del esfuerzo en el punto de flexión durante la carga aplicada. Cuando el cuerpo de la varilla doblada es halado durante la carga, se alcanza rápidamente la resistencia a la rotura del material, lo que conlleva a generar fisuras.

Los programas de diseño disponibles comercialmente permiten al diseñador optimizar el equipo de producción bajo condiciones existentes de los pozos, seleccionando el tamaño de los tubos, el grado de tubería, la configuración de la bomba, las unidades de bombeo, entre otros. Sin embargo, es posible que las condiciones del

pozo cambien con el tiempo, convirtiendo un buen diseño inicial en un diseño deficiente que puede impactar con severidad el sistema de extracción artificial [2].

A su vez, los daños superficiales ocasionan potencialmente fallas en la sarta de varillas, debido a que se aumentan los esfuerzos durante las cargas aplicadas. Por su parte, la conexión API de la varilla de bombeo está diseñada como una conexión con soporte rotativo cargado con fricción. Debido a que la resistencia de la conexión de la varilla de bombeo es baja, cuando se somete a cargas cíclicas, es necesario limitar las cargas cíclicas con precarga de unión macho. Si la precarga es menor que la carga aplicada, la cara del soporte de la unión macho y la cara del soporte del acople se separa bajo la carga, durante el movimiento cíclico de la unidad de bombeo. Una vez que las caras se separan, la conexión es cargada cíclicamente, ocasionando una falla por pérdida de desplazamiento o pérdida de ajuste que pueden conllevar a un montaje inadecuado, lubricación no adecuada, exceso de torsión, desgaste por golpeteo de los tubos o cualquier combinación de estos elementos [2].

Así mismo, la corrosión es el responsable de casi dos tercios de todas las fallas de las varillas de bombeo. La corrosión es producto de una reacción electroquímica entre el acero utilizado para hacer varillas de bombeo y el medio ambiente de la operación al cual se someten estas. La mayoría de los pozos de producción tienen problemas de corrosión, lo que significa que ninguna varilla de bombeo fabricada en la actualidad soporta dichos efectos [2].

La reducción de la frecuencia de las fallas requiere de un análisis de la causa raíz de la falla y la implementación de medidas de acción correctiva que impidan la recurrencia de la falla. Por ello, es necesario que el personal de producción entienda los efectos de los daños asociados con las varillas de bombeo, dado que esto impide la reproducción continua de las fallas cuando estas se detectan a tiempo. De manera que el análisis de las fallas de las varillas de bombeo es un reto.

Por lo anterior, el presente trabajo de grado plantea la identificación de las fallas ocasionadas en la sarta de varilla en los sistemas PCP mediante la aplicación de un método de diagnóstico de Análisis de Causa Raíz (ACR) para mejorar el funcionamiento de estos sistemas.

## 2. JUSTIFICACIÓN

El Análisis de Causa Raíz (ACR) es un método muy utilizado en ingeniería, que enlaza tres preguntas básicas fundamentales, ¿cuál es el problema?, ¿por qué ocurrió? y ¿qué se hará para prevenirlo? [4]. Lo que busca es determinar el origen de la falla, la frecuencia con que aparece y el impacto que este genera, a partir de un estudio profundo de los factores y condiciones que podrían ocasionar la falla, con el objetivo de mitigarlo o eliminarlo por completo, una vez se tomen acciones correctivas que surgen del análisis.

Usualmente, los problemas que se generan en la industria petrolera están asociados a fallas crónicas que suceden más de una vez por la misma razón. Se estima que estas fallas representan el 20% de los incidentes y representan el 80% de las pérdidas económicas. Por ello, pensar en aplicar la metodología del Análisis de Causa Raíz (ACR) implica investigar el 20% de las fallas en la sarta de varilla en los sistemas de levantamiento artificial por PCP afín de prevenir el 80% de las pérdidas totales, lo que representa una optimización de los costos en un periodo de tiempo corto [3]. Las ventajas que sobresalen del ACR son la determinación de la raíz de las fallas, disminución en la frecuencia de fallas, optimización de costos, reconocimiento de un patrón de falla y evita la repetición de la misma [3].

Cabe destacar que la aplicación del método de ACR permitirá la identificación de las causas de las fallas en la sarta de varilla en los sistemas de levantamiento artificial por PCP en Campo La Cira Infantas en la Cuenca del Valle Medio del Magdalena, en pro de establecer controles necesarios sobre criterios de selección, diseño e instalación en los completamientos de los pozos, con el propósito de hacer seguimiento oportuno del sistema y mejorar la vida útil del mismo.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivo genreal**

Evaluar el índice de fallas en la sarta de varilla de los pozos con bombeo de cavidad progresiva en el Campo La Cira Infantas en la Cuenca del Valle Medio del Magdalena a partir de la implementación de la metodología de Análisis de Causa Raíz (ACR).

#### **3.2 Objetivos específicos**

- Identificar mediante un análisis causa-raíz los factores que inducen las fallas en la sarta de varilla de los pozos estudiados con bombeo de cavidad progresiva.
- Proponer ajustes operativos con base en el análisis causa-raíz para la reducción de las fallas en la sarta de varilla de los pozos estudiados con bombeo de cavidad progresiva.
- Simular el escenario actual y el ajuste operativo propuesto evaluando la recurrencia de falla en la sarta de varilla.
- Evaluar los resultados obtenidos de las simulaciones de los pozos con PCP con falla en la sarta de varilla.

## **4. MARCO TEÓRICO**

### **4.1 Sistemas de levantamiento artificial**

Los sistemas de levantamiento artificial son parte fundamental en los procesos de producción en la industria del petróleo dado que permiten llevar el fluido desde el subsuelo hacia la superficie.

Es importante analizar muy bien las características del fluido que se encuentra en el yacimiento, así como las condiciones en el pozo, con el fin de seleccionar correctamente el sistema de levantamiento artificial para alcanzar el mejor desempeño del equipo tanto en superficie como en subsuelo.

Los sistemas de levantamiento artificial que se utilizan para la extracción de crudo son: bombeo mecánico, bombeo por cavidades progresivas, bombeo electrosumergible y bombeo hidráulico.

El presente trabajo de grado profundizará en los sistemas de levantamiento artificial por bombeo con cavidades progresivas [5].

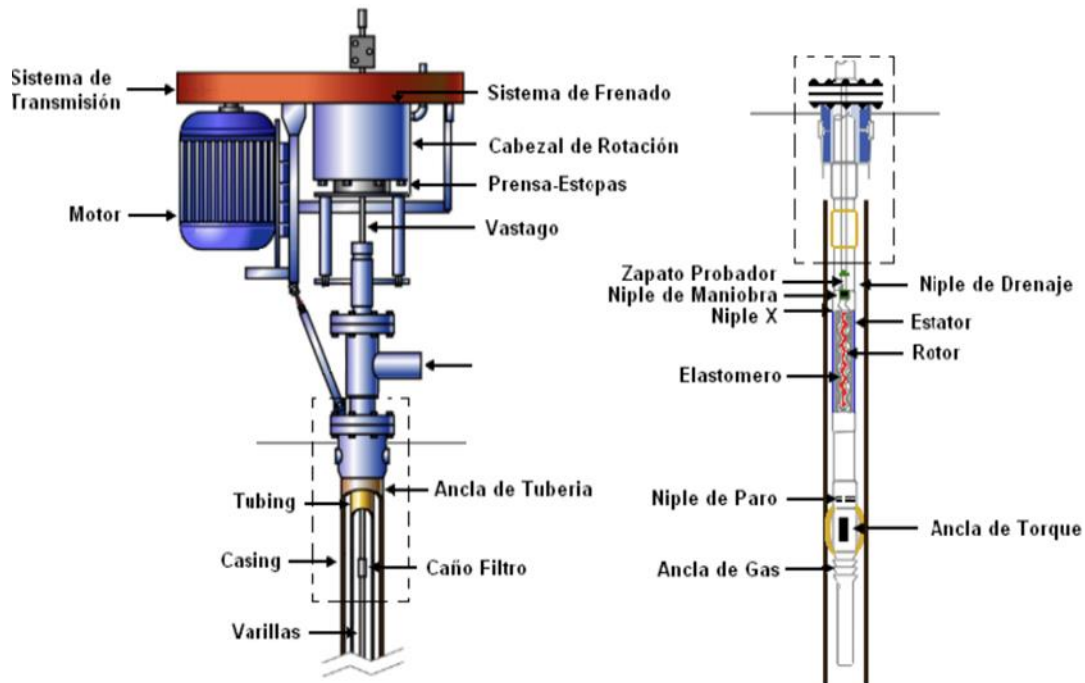
### **4.2 Bombeo por cavidades progresivas**

Las bombas por cavidades progresivas son reconocidas porque son bombas de desplazamiento positivo que tienen un cabezal de accionamiento, el cual se ubica en superficie y una bomba de fondo que se compone de un rotor de acero en forma helicoidal el cual gira dentro de un estator de elastómero sintético o de metal en un tubo de acero.

Cuando el rotor gira dentro del estator se presenta un movimiento axial que genera un efecto de succión en el fondo del estator, logrando impulsar el fluido desde subsuelo hasta la superficie. El rotor se instala con la sarta de varillas para generar movimiento giratorio del rotor dentro del estator, haciendo que el fluido se desplace hacia la superficie del pozo. En la figura 1 se presenta un sistema con bombeo por cavidades progresivas [5].

**Figura 1**

*Sistema de bombeo con cavidades progresivas*



**Nota.** En la imagen se destacan las distintas partes fundamentales de este sistema, proporcionando una visión integral de su estructura y funcionamiento. Tomado de J. A. Posada Piedrahita. Aplicación de la metodología de Análisis de Causa Raíz (ACR) para la reducción de las fallas en los componentes de subsuelo de los sistemas de bombeo PCP en pozos de campo Velásquez (Tesis de especialista). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2016.

Este sistema de levantamiento artificial presenta alta eficiencia comparado con los otros sistemas, extrae entre un 50% a 60% de la producción de fluidos medianos con  $22 < \text{Grados API} < 29,9$  o de fluidos pesados con  $\text{Grados API} < 21,9$ . Se caracterizan por poseer mínimas partes móviles lo que disminuye el número de intervenciones por mantenimiento [5]; además, presenta menos desgaste en los equipos de subsuelo, presenta buena tolerancia a la producción de arena, consume poca energía, los costos de inversión son bajos y son fáciles de instalar y operar.

Sin embargo, se destaca que estos sistemas presentan algunas desventajas, entre ellas, la necesidad de sacar la tubería de producción cuando se realiza

mantenimiento a la bomba y de requerir de la intervención de equipo de workover para el mantenimiento de los equipos de subsuelo.

#### **4.2.1 Componentes de la bomba por cavidades progresivas**

A continuación, se describen los componentes que conforman la bomba de cavidades progresivas en subsuelo y en superficie [3], [5] y [6]:

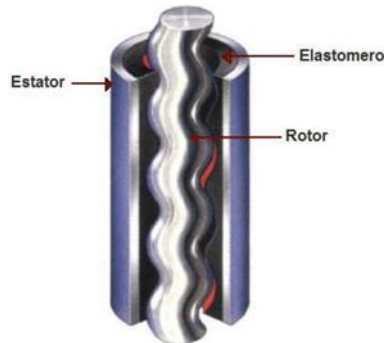
4.2.1.a Estator. Es el componente estacionario compuesto por un tubo de acero cubierto internamente por un elastómero de polímero de alto peso molecular, el cual tiene una forma de doble hélice.

4.2.1.b Rotor. El rotor está fabricado en acero con alta resistencia a la abrasión y corrosión, mecanizado en un torno especial de alta precisión. Su función es bombear el fluido desde el fondo del pozo hasta la superficie. El rotor está conectado a la sarta de varillas lo que genera que se produzca un movimiento rotacional.

4.2.1.c Elastómero. Es el elemento más delicado de la bomba que reviste internamente al estator; está hecho de un polímero de alto peso molecular. Tiene la capacidad de deformarse fácilmente hasta dos (2) veces su tamaño y recuperar su estado natural. Entre las características deseables en los elastómeros se destaca: buena resistencia química a los fluidos a transportar, buena resistencia térmica, buena resistencia a la abrasión y desgaste, capacidad de recuperación elástica, adecuadas propiedades mecánicas especialmente resistencia a la fatiga. A continuación, se presenta las principales partes del sistema de bombeo de cavidades progresivas, el estator, el rotor y el elastómero.

## Figura 2

*Partes principales del sistema de bombeo con cavidades progresivas*



**Nota.** En la figura se presenta las principales partes del sistema de bombeo de cavidades progresivas, el estator, el rotor y el elastómero. Tomado de Posada (2016).



4.2.1.d Ancla anti torque. Es un dispositivo mecánico instalado en la parte inferior al estator el cual tiene la función de evitar el desprendimiento de la tubería debido a la acción del desenrosque que genera por el movimiento rotacional.

4.2.1.e Pin de paro. Este componente es un tubo de pequeña longitud que se encuentra acoplado al estator con el fin de hacer de tope al rotor cuando se genera el espaciamento. Además, el pin de paro permite un espacio libre al rotor de manera que facilita la libre elongación de la sarta de varilla durante la operación y sirve como conexión para accesorios como anclas anti torque, filtros de arena, entre otros. En dado caso que se lleve a cabo una desconexión por tubería, el pin de paro evita que el rotor y/o las varillas lleguen al fondo del pozo.

4.2.1.f Centralizadores de varillas. Los centralizadores de varillas son muy útiles para aquellos pozos con desviación o inclinación muy pronunciada dado que permiten la centralización de la varilla de succión y ayudan a reducir la fricción entre el tubo y la varilla [7].

4.2.1.g Tubería de producción o tubing. Es la sarta de tubería que comunica a la bomba que se encuentra en subsuelo con la línea de flujo en superficie, mediante el movimiento rotacional que se genera. Se debe tener precaución con la sarta de tubería ya que se puede desenroscar y puede ocasionar problemas en la bomba.

4.2.1.h Sarta de varillas. Es el conjunto de varillas que se usa dentro de la tubería de producción o tubing, que van acopladas por medio de juntas. Su diámetro depende de la tubería de producción ya que si se escogen diámetros iguales a este se genera daño dentro del mismo y dejaría de ser funcional la aplicación de la sarta de varillas.

4.2.1.i Cabezal de rotación. Este equipo es el encargado de dar la capacidad de freno y la potencia al sistema; es de accionamiento mecánico y se encuentra en superficie exactamente encima de la cabeza de pozo. Consiste en un sistema de rodamientos o cojinetes que se encargan de soportar la carga axial generada por el movimiento rotacional del rotor, y un sistema de empaque que evita la filtración de fluidos en las conexiones de superficie.

4.2.1.j Motor. Se utilizan tanto motores eléctricos como motores de combustión interna para proveer la potencia requerida que permite la generación de movimiento rotacional en el rotor. El motor eléctrico es el más utilizado por su alta eficiencia de operación y capacidad de automatización.

4.2.1.k Sistema de transmisión. Se conoce como sistema de transmisión al equipo que genera la energía de primer momento, transmitiendo este empuje al cabezal de rotación, esta energía se crea por medio de un motor eléctrico o de combustión interna. Se destacan tres (3) tipos de sistemas de transmisión que se encargan de transmitir la energía desde el motor hasta el cabezal de rotación, estos son, el sistema de poleas y correa, el sistema de transmisión a engranajes y el sistema de transmisión hidráulica.

Estos sistemas de transmisión son utilizados con el fin de soportar al motor cuando trabaja con revoluciones relativamente bajas, si el motor es obligado a trabajar forzosamente con revoluciones bajas, se genera un daño en el sistema por falta de disipación de calor.

4.2.1.l Sistema de frenado. Este sistema es parte funcional del cabezal, ya que evita daños tanto en los equipos de subsuelo como en los de superficie, debido a la liberación de energía que la sarta de varillas tiene una vez se frena el equipo. Esta energía liberada genera una rotación inversa también conocida como back spin con velocidades altas, lo cual puede ocasionar desenrosque de varillas, rotura de poleas en el cabezal, entre otros.

4.2.1.m Prensa estopas. Se encuentran ubicadas en una caja en el cabezal, sobre él gira la barra lisa y contiene un juego de siete (7) empaquetaduras. Su función de aislar el cabezal de los fluidos del pozo.

4.2.1.n Variador de frecuencia. El variador de frecuencia rectifica la corriente alterna requerida por el motor y la modula electrónicamente produciendo una señal de salida con frecuencia y voltaje diferente. Estos equipos se utilizan en conjunto con los motoredutores y con los equipos de polea - correa para brindar la flexibilidad del cambio de velocidad en corto tiempo y sin recurrir a modificaciones mecánicas en los equipos.

### **4.3 Fallas en los sistemas de levantamiento artificial**

La mayoría de las fallas asociadas con los sistemas de levantamiento artificial pueden ser atribuidas a uno de los tres (3) componentes principales del fondo del pozo: la bomba del fondo, la varilla de bombeo o la sarta de la tubería de producción.

La falla se define como cualquier evento catastrófico que requiere que el personal de servicio extraiga o reemplace uno o más de estos componentes [2], [8] y [9].

Los pozos que producen altos índices de frecuencia de fallas son clasificados como pozos críticos, lo que significa que se debe identificar, implementar y registrar la raíz de la causa de la falla.

El presente trabajo solo se enfocará al estudio de las fallas por varillas de bombeo.

#### **4.3.1 Fallas por tensión**

Ocurren cuando la carga aplicada excede la resistencia a la tensión de la varilla. Esta carga se concentra en un punto específico dando lugar a la reducción de la sección transversal y, en consecuencia, a la fractura. Este fenómeno solo sucede cuando se aplica demasiada carga en la sarta de varillas. Inicialmente, la tensión de la varilla

produce su alargamiento elástico, pero, si la tensión aumenta hasta superar el límite elástico del material, la varilla sufrirá deformación permanente. El diámetro se reducirá hasta que la varilla se rompa. La fractura típica por tensión es cónica y en ángulo de 45° respecto al esfuerzo aplicado.

Para evitar las fallas por tensión, el indicador de peso máximo utilizado, para una varilla de bombeo en condiciones “como nueva”, no deberá exceder el 90% de fuerza de ruptura para la dimensión y grado conocidos de la varilla de bombeo de diámetro más pequeño. En la Figura 3 se presenta un ejemplo de falla por tensión.

**Figura 3**

*Falla de varilla por tensión*



**Nota.** Esta imagen representa un ejemplo de falla por tensión. Tomado de Norris (2000).

#### **4.3.2 Fallas por fatiga**

Las fallas por fatiga son progresivas y comienzan como pequeñas grietas por esfuerzo que crecen bajo la acción de los esfuerzos cíclicos. Los esfuerzos asociados con esta falla, tienen un valor máximo que es menor que la resistencia a la tensión del acero de la varilla de bombeo. Debido a que la carga aplicada es distribuida casi igualmente sobre el área de la sección transversal de la sarta de las varillas de bombeo, cualquier daño que reduzca el área de la sección transversal, aumentará la carga o el esfuerzo en ese punto, y es un elevador de esfuerzo.

A medida que progresa la grieta por fatiga, se reduce el área efectiva de la sección transversal de la varilla de bombeo, hasta que no queda metal suficiente para sostener la carga y la varilla de bombeo, simplemente se fractura en dos.

### **4.3.3 Fallas mecánicas**

Las fallas mecánicas incluyen todos los tipos de fallas excepto las fallas por corrosión y los defectos de fabricación; representan un gran porcentaje del número total de todas las fallas en la sarta de varillas. Las fallas mecánicas acontecen por procedimientos inadecuados de cuidado y manipulación, procedimientos descuidados de montaje y desconexión, prácticas de operación discontinuadas o cualquier combinación de estos elementos.

### **4.3.4 Fallas de varilla por flexión**

Es un hecho que todas las varillas de bombeo dobladas, eventualmente fallan. Las varillas de bombeo nuevas son fabricadas con una rectitud de cuerpo de no menos de 1/16 de pulgada en cualesquier doce pulgadas de longitud del cuerpo de la varilla. Las varillas de bombeo, con esta tolerancia de rectitud, ruedan con facilidad. Cualquier grado de flexión mayor que éste, causará un aumento del esfuerzo local en el punto de flexión, durante la carga aplicada. Cuando el cuerpo de la varilla doblada es halado en forma recta durante la carga, se alcanza rápidamente la resistencia a la rotura del material. El ciclo de exceder continuamente la resistencia de rotura del material, es repetida durante el ciclo de bombeo y causa fisuras de fatiga por esfuerzo en el lado cóncavo de la flexión. Estas fisuras de fatiga por esfuerzo progresan a través de la barra durante la carga, hasta que no quede superficie metal en la barra, para sostener la carga y ocurre la fractura.

Una varilla de bombeo doblada queda permanentemente dañada y no se debería usar debido a que todas las varillas de bombeo dobladas eventualmente fallarán. En la figura 4 se presenta un ejemplo de falla de varilla por flexión.

**Figura 4**

*Falla de varilla por flexión*



**Nota.** Esta figura presenta un ejemplo de falla de varilla por flexión. Tomado de Norris (2000).

#### **4.3.5 Fallas por daños superficiales**

Se debe hacer todo lo posible para impedir daños mecánicos superficiales a los elementos constituyentes de la sarta de producción, los daños superficiales aumentan los esfuerzos durante las cargas aplicadas. El tipo de daño y su orientación contribuyen a esfuerzos mayores sobre aquellos asociados al daño longitudinal. Se debe evitar todo contacto de metal con metal que podría ocasionar abolladuras, mellas o raspaduras. En la figura 5 se presenta un ejemplo de falla de varilla por daños en superficie.

**Figura 5**

*Falla de varilla por daños en superficie*



**Nota.** Esta figura presenta un ejemplo de falla de varilla por daños en superficie. Tomado de Norris (2000).

#### **4.3.6 Fallas de conexión**

La conexión API de la varilla de bombeo está diseñada como una conexión con soporte rotativo cargado con fricción. Debido a que la resistencia de la conexión de la varilla de bombeo es baja, cuando se somete a cargas cíclicas, es necesario limitar las

cargas cíclicas con precarga de unión macho (pin). Si la precarga del pasador es mayor que la carga aplicada, la carga en la conexión permanece constante y no ocurre fatiga de cargas cíclicas. La carga por fricción que se desarrolla entre la cara del soporte de la unión macho y la cara del soporte del acople ayuda a afianzar la conexión, para impedir que se suelte en el fondo del pozo. Sin embargo, si la precarga es menor que la carga aplicada, la cara del soporte de la unión macho y la cara del soporte del acople se separarán bajo la carga, durante el movimiento cíclico de la unidad de bombeo. Una vez que estas caras se separen, la conexión es cargada cíclicamente y ocasionará una falla por pérdida de desplazamiento o pérdida de ajuste. Las fallas por pérdida de desplazamiento pueden ocurrir por una lubricación no adecuada, por montaje inadecuado, exceso de torsión, desgaste por golpeteo de los tubos o cualquier combinación de estos elementos. En la figura 6 se presenta un ejemplo de falla de varilla por conexión.

**Figura 6**

*Falla de varilla por conexión*



**Nota.** Aquí se evidencia una falla de varilla por conexión. Tomado de Norris (2000).

#### **4.3.7 Fallas de fatiga por corrosión**

La corrosión es uno de los mayores problemas que se encuentran en los fluidos producidos y es responsable por casi dos tercios de todas las fallas de las varillas de bombeo. La corrosión es el resultado destructor de una reacción electroquímica entre el acero utilizado para hacer varillas de bombeo y el medio ambiente de la operación al cual están sometidas. Simplemente, la corrosión es la forma en que la naturaleza revierte un material de un estado de energía más alto (acero), hecho por el hombre, a su condición básica (mineral natural), tal como fue hallado en la naturaleza. El elemento hierro del

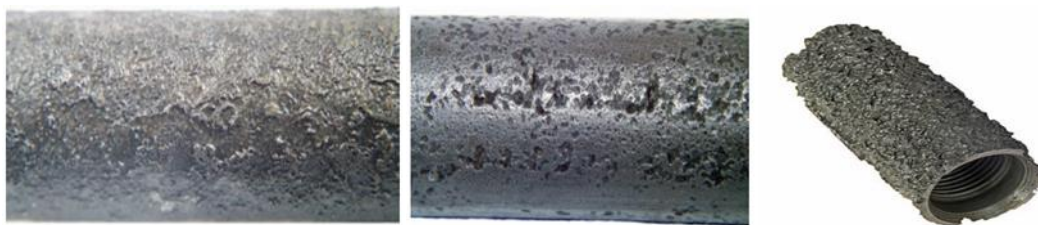
acero, se combina con la humedad o los ácidos, para formar otros compuestos, tales como, óxido, sulfato, carbonato de hierro, entre otros.

Alguna forma y concentración de agua está presente en todos los pozos considerados corrosivos y la mayoría contienen cantidades considerables de impurezas y gases disueltos. Toda el agua con valores bajos de pH es considerada corrosiva al acero, con valores más bajos que representan mayor acidez, o capacidad de corrosión.

Todos los ambientes del fondo del pozo son corrosivos hasta cierto grado. La mayoría de los pozos en producción están plagados con problemas de corrosión y ninguna varilla de bombeo fabricada en la actualidad puede soportar con éxito los efectos de esta corrosión. A pesar que la corrosión no puede ser eliminada completamente, es posible controlar su reacción. Por ello, todos los grados de las varillas de bombeo deben ser protegidas adecuadamente, mediante el uso de programas eficaces de inhibición química. En la figura 7 se presenta un ejemplo de falla de varilla por corrosión.

#### **Figura 7**

*Falla de varilla por corrosión*



**Nota.** Ejemplo de falla de varilla por corrosión donde podemos apreciar la varilla desgastada. Tomado de Norris (2000).

#### **4.4 Metodología de análisis causa raíz (ACR)**

El Análisis de Causa Raíz (ACR) es una metodología muy valiosa para establecer las causas que originan un problema.

El primer paso para realizar un análisis de causa raíz, es la identificación del problema. Seguidamente, se requiere entender el problema, lo que implica verificar la información que se tiene asociada a este. Posteriormente, se requiere priorizar la causa más probable del problema para plantear las acciones correctivas que sean necesarias



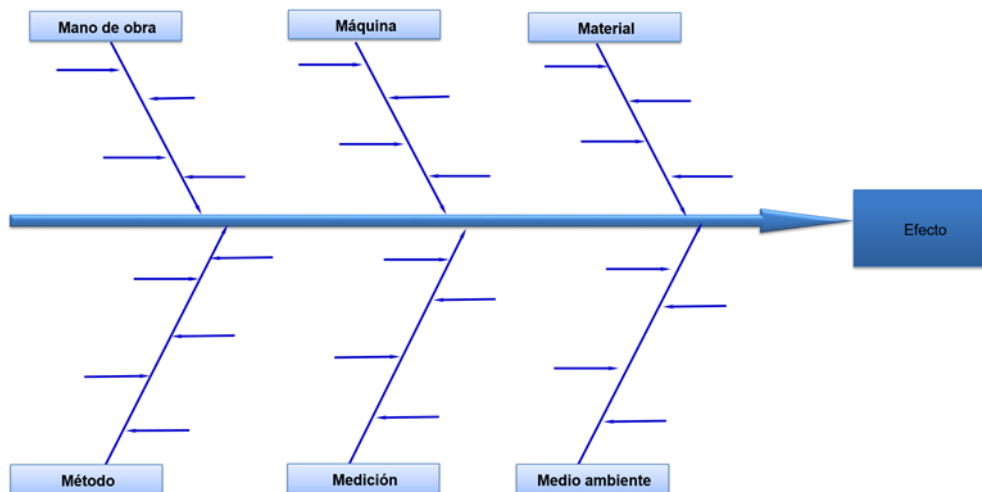
con el objetivo de mitigar la recurrencia del problema. Las acciones correctivas deben ser implementadas y monitoreadas, lo que significa que se asigna un responsable y se establece una metodología para su control [10].

Como soporte a la metodología de análisis de causa raíz se utiliza el diagrama de causa – efecto, también conocido como diagrama de espina de pescado o Ishikawa, ya que este identifica todos los potenciales factores de contribuyen a la generación de un problema.

En la figura 8 se presenta el diagrama causa – efecto que se utiliza para relacionar los efectos con las causas de un problema.

**Figura 8**

*Diagrama causa – efecto*



**Nota.** Aquí se presenta el diagrama causa – efecto que se utiliza para relacionar los efectos con las causas de un problema. Tomado de Freire (2015).

## **5. METODOLOGÍA**

A continuación, se describe la metodología que se empleó para evaluar las fallas en la sarta de varilla de los pozos con bombeo de cavidades progresiva en el Campo La Cira Infantas de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena, mediante la implementación del Análisis de Causa Raíz (ACR).

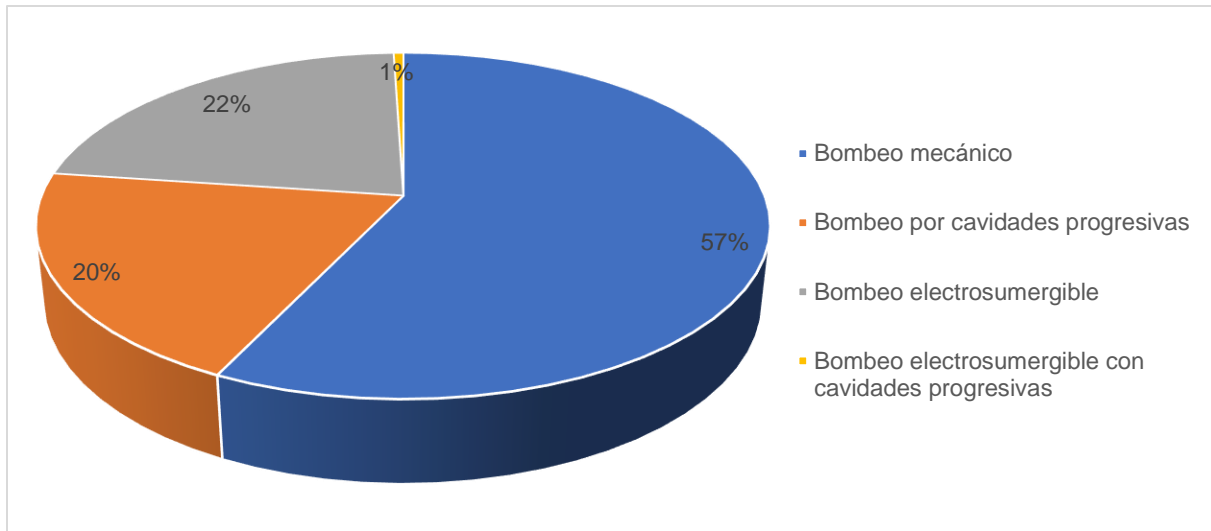
### **5.1 Identificación de los pozos críticos en el Campo La Cira Infantas**

La Cira Infantas es el campo petrolero más antiguo del país, ubicado en la Cuenca del Valle Medio del Magdalena, a unos 22 km de distancia del distrito colombiano de Barrancabermeja, que produce más de 30.000 barriles totales de petróleo por día (BPD).

En la figura 9 se presenta la distribución de los Sistemas de Levantamiento Artificial sometidos en este campo, en el que predomina el bombeo mecánico (57%), seguidamente el bombeo electrosumergible (22%), posteriormente el bombeo por cavidades progresivas (20%) y finalmente, el bombeo electrosumergible con cavidades progresivas (1%). Para efectos de desarrollo del presente trabajo, se abordó los Sistemas de Levantamiento Artificial con bombeo por cavidades progresivas.

**Figura 9**

*Distribución de los Sistemas de Levantamiento Artificial en el Campo La Cira Infantas*

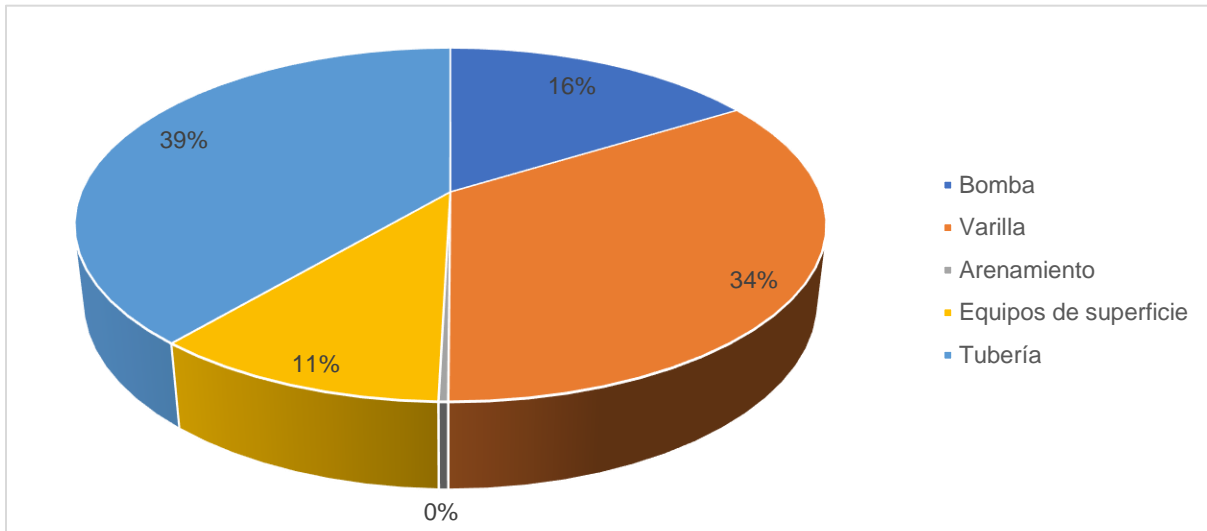


**Nota.** Se evidencia la distribución de los Sistemas de Levantamiento Artificial sometidos en este campo, en el que predomina el bombeo mecánico (57%), seguidamente el bombeo electro sumergible (22%), posteriormente el bombeo por cavidades progresivas (20%) y finalmente, el bombeo electrosumergible con cavidades progresivas (1%), esta Información es suministrada por una empresa del sector petrolero. Tomado de una empresa del sector petrolero que suministró estas estadísticas (2023).

En la figura 10 se presenta la estadística de las fallas recurrentes de los Sistemas de Levantamiento Artificial con bombeo por cavidades progresivas en el que se evidencia que las fallas más recurrentes son por tubería (39%) y varilla (34%). La frecuencia de las fallas producidas en las varillas varía de pozo a pozo, sin embargo, es muy común que las fallas se produzcan al menos una vez al año. Principalmente, los problemas por varilla son asociados a: fallas mecánicas, flexión, diseño y operación, daños en superficie, conexión, corrosión y defectos de fabricación (Norris, 2000). Cualquiera de las fallas que ocurra en el sistema es un evento catastrófico que genera pérdidas por producción diferida y elevados costos, dado que requiere la intervención de personal y equipos especializados.

**Figura 10**

Estadística de las fallas recurrentes de los sistemas con bombeo por cavidades progresivas



**Nota.** En la figura 10 se presenta la estadística de las fallas recurrentes de los Sistemas de Levantamiento Artificial con bombeo por cavidades progresivas en el que se evidencia que las fallas más recurrentes son por tubería (39%) y varilla (34%), está Tomado de una empresa del sector petrolero que suministró estas estadísticas (2023).

Para la selección de los pozos en el Campo La Cira Infantas se tomó como referente información suministrada por una empresa del sector petrolero con información consolidada de 41 pozos con fallas críticas por varilla en los Sistemas de Levantamiento Artificial con bombeo por cavidades progresivas, ubicados en las áreas Cira Norte, Cira Sur, Cira Este e Infantas Central, en los últimos cinco (5) años, 2019 – 2023 (ver tabla 1), en el que se presenta la fecha de arranque del pozo, la fecha en que se detiene el pozo por causa de la falla y el tiempo de duración del pozo o también conocido como *run life* (calculado este por la diferencia entre el tiempo en que se presenta la falla y la fecha de arranque del pozo).

**Tabla 1**

*Consolidado de las fallas por varilla en los sistemas con bombeo por cavidades progresivas*

<b>Gerencia</b>	<b>Pozo</b>	<b>Área del Campo La Cira Infantas</b>	<b>Fecha de arranque del pozo</b>	<b>Fecha de falla del pozo</b>	<b>Tiempo de duración del pozo o <i>Run life</i> (días)</b>
GCT	LCIG&C-1	Cira Norte	25-may-19	7-ago-19	74
GCT	LCIG&C-2	Cira Este	18-mar-19	14-oct-19	210
GCT	LCIG&C-3	Cira Sur	14-abr-19	5-nov-19	205
GCT	LCIG&C-4	Cira Sur	8-jul-19	20-nov-19	135
GCT	LCIG&C-5	Cira Este	30-ene-19	3-feb-20	369
GCT	LCIG&C-6	Infantas Central	12-jul-19	20-mar-20	252
GCT	LCIG&C-7	Cira Este	10-sep-19	1-mar-20	173
GCT	LCIG&C-8	Cira Sur	13-ene-20	8-mar-20	55
GCT	LCIG&C-9	Cira Sur		27-nov-19	23-mar-20
GCT	LCIG&C-10	Cira Sur	4-nov-19	2-abr-20	150
GCT	LCIG&C-11	Cira Sur	23-nov-17	20-abr-20	879
GCT	LCIG&C-12	Cira Norte	16-oct-19	3-may-20	200
GCT	LCIG&C-13	Cira Este	10-sep-19	19-may-20	252
GCT	LCIG&C-14	Cira Sur	7-dic-19	19-may-20	164
GCT	LCIG&C-15	Cira Sur	27-jul-19	2-jun-20	311
GCT	LCIG&C-16	Cira Sur	25-jun-18	5-jul-20	741
GCT	LCIG&C-17	Cira Norte	1-mar-20	28-jul-20	149
GCT	LCIG&C-18	Cira Este	24-abr-18	23-ago-20	852
GCT	LCIG&C-19	Cira Este	7-mar-20	3-oct-20	210
GCT	LCIG&C-20	Cira Sur	11-ago-20	8-oct-20	58
GCT	LCIG&C-21	Cira Sur	18-oct-19	9-nov-20	388
GCT	LCIG&C-22	Cira Este	27-mar-19	20-ene-21	665
GCT	LCIG&C-23	Cira Sur	29-jul-19	26-ene-21	547
GCT	LCIG&C-24	Cira Norte	2-mar-20	27-feb-21	362
GCT	LCIG&C-25	Cira Norte	27-sep-20	27-abr-21	212
GCT	LCIG&C-26	Cira Norte	13-may-21	14-may-21	1
GCT	LCIG&C-27	Infantas Central	15-jun-19	12-jun-21	728
GCT	LCIG&C-28	Cira Norte	18-nov-20	18-oct-21	334
GCT	LCIG&C-29	Cira Este	8-sep-20	15-oct-21	402
GCT	LCIG&C-30	Infantas Central	13-oct-19	18-nov-21	767
GCT	LCIG&C-31	Cira Sur	28-sep-18	12-feb-22	1.233
GCT	LCIG&C-32	Cira Sur	2-oct-20	19-jul-22	655
GCT	LCIG&C-33	Cira Sur	30-ene-20	12-ago-22	925
GCT	LCIG&C-34	Cira Sur	3-sep-20	19-ago-22	715
GCT	LCIG&C-35	Cira Este	25-feb-19	18-ene-20	327

**Tabla 1.** (Continuación)

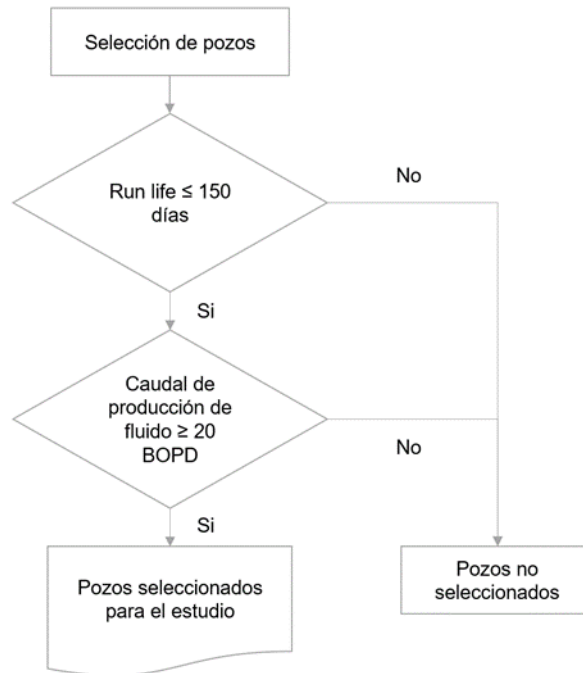
Gerencia	Pozo	Área del Campo La Cira Infantas	Fecha de arranque del pozo	Fecha de falla del pozo	Tiempo de duración del pozo o <i>Run life</i> (días)
GCT	LCIG&C-36	Cira Norte	27-sep-21	25-feb-23	516
GCT	LCIG&C-37	Cira Sur	23-dic-21	29-mar-23	461
GCT	LCIG&C-38	Cira Sur	20-nov-19	22-may-23	1.279
GCT	LCIG&C-39	Cira Sur	31-oct-20	9-jun-23	951
GCT	LCIG&C-40	Cira Norte	22-oct-22	5-jun-23	226
GCT	LCIG&C-41	Cira Sur	26-sep-20	20-jul-23	1.027

**Nota.** En la tabla se visualiza el consolidado de los pozos que tuvieron fallas por varilla esta Información es suministrada por una empresa del sector petrolero. Tomado de: Información suministrada por una empresa del sector petrolero, [Acceso: octubre, 2023].

Se establecieron dos (2) criterios para identificar los pozos objeto de estudio: 1) pozos con tiempo de duración o *run life* menor o igual a 150 días y 2) pozos con alto potencial de producción de crudo con valores superiores o iguales a los 20 BOPD, sin la presencia de contenido de agua y de sedimentos en el crudo o también conocido como BSW (ver figura 11). Estos criterios se seleccionaron dado que el tiempo de operación es corto, generando intervenciones prematuras con equipos de workover que afectan la rentabilidad del campo petrolero.

**Figura 11**

*Criterios de selección de los pozos en el Campo La Cira Infantas*



**Nota.** Esta información revela los Criterios de Selección de los Pozos de estudio en el Campo La Cira Infantas. Se destacan elementos clave que guían la elección de pozos, ofreciendo una visión visual de los parámetros y consideraciones esenciales. Esta representación gráfica contribuye a una comprensión más clara de los factores determinantes en la toma de decisiones para la gestión efectiva de los pozos en el mencionado campo.

Lo anterior permitió la selección de tres (3) pozos, el LCIG&C-1, el LCIG&C-8 y el LCIG&C-20, para aplicar la metodología de Análisis de Causa Raíz (ACR).

## **5.2 Aplicación de la metodología de análisis de causa raíz (ACR)**

Se aplicó la metodología de Análisis de Causa Raíz (ACR) para identificar cual es el problema que se evidenció en los pozos seleccionados, LCIG&C-1, LCIG&C-8 y LCIG&C-20. Para ello, se describió el evento de los hechos, lo que implicó la revisión de informes, reportes, históricos, entre otros, para conocer a profundidad el momento de la falla y sus posibles causas que lo originaron.

En un primer momento se identificaron las posibles hipótesis que conllevaron a la causa de la falla, lo que permitió hacer una serie de cuestionamientos y de planteamientos de preguntas. Esto facilitó la identificación de hipótesis más reales de la causa raíz dado que se encontró conexión con las evidencias o hechos detallados y permitió la depuración de información no verificable, la cual fue excluida del proceso.

En un segundo momento se agruparon las hipótesis por áreas, siguiendo la estructuración del diagrama de causa - efecto o diagrama Ishikawa, el cual establece seis (6) secciones, mano de obra, máquina, material, método, medición y medio ambiente. Seguidamente se diseñó el diagrama de causa – efecto.

Posteriormente, se plantearon las respectivas acciones de mejora para corregir la causa raíz del problema encontrado en los pozos LCIG&C-1, el LCIG&C-8 y el LCIG&C-20 y así evitar la recurrencia del problema a corto plazo.

### **5.3 Simulación de los pozos mediante el uso del software especializado**

El software que se utilizó fue el PC - PUMP el cual permite el diseño, la evaluación y el análisis para los sistemas con bombas de cavidades progresivas.

PC –PUMP maneja una interfase que le permite al usuario visualizar la geometría del pozo, el diseño del sistema; además cuenta con una galería para el análisis detallado de los equipos de superficie y de fondo del pozo, en el que se comparan los diversos escenarios de diseño y parámetros clave para seleccionar el diseño óptimo.

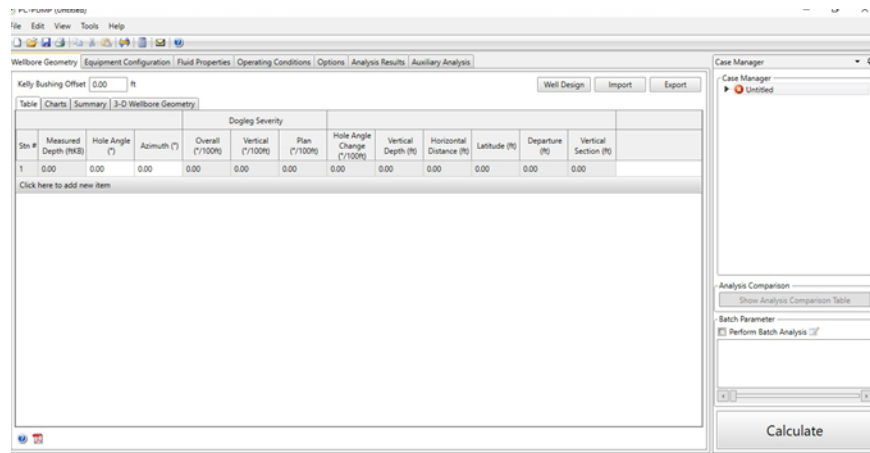
A continuación, se presenta la interfase del programa PC – PUMP para ingresar los datos:

- Geometría del pozo: en esta ventana se ingresan los valores del survey para validar el grado de inclinación del pozo.



**Figura 12**

*Ventana geometría del pozo en el simulador PC-PUMP*

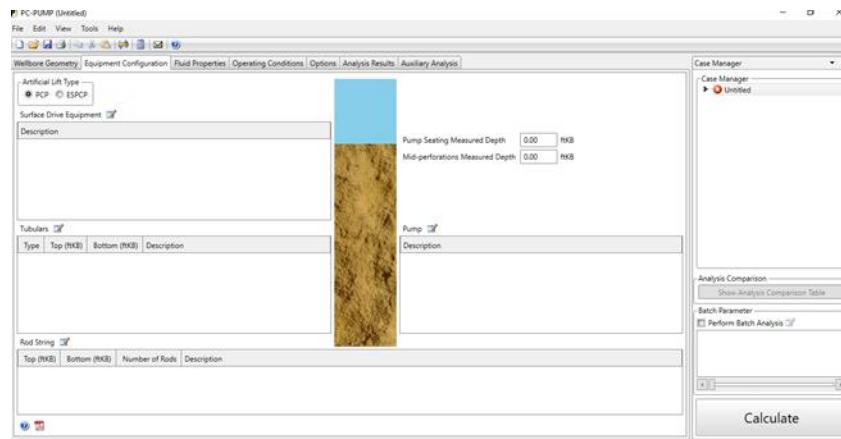


**Nota.** La imagen corresponde a la ventana del simulador PC-PUMP donde se ingresan los datos de geometría del pozo.

- Configuración de equipos: en esta ventana se selecciona a partir de una librería previamente establecida por el programa, el tipo de levantamiento artificial, la configuración del equipo de superficie, la configuración del casing del pozo, la tubería de producción, el tipo de varilla y el modelo de la bomba. A su vez, se diligencia la ubicación de la bomba y el punto medio de los perforados del pozo.

**Figura 13**

*Ventana configuración de equipos en el simulador PC-PUMP*

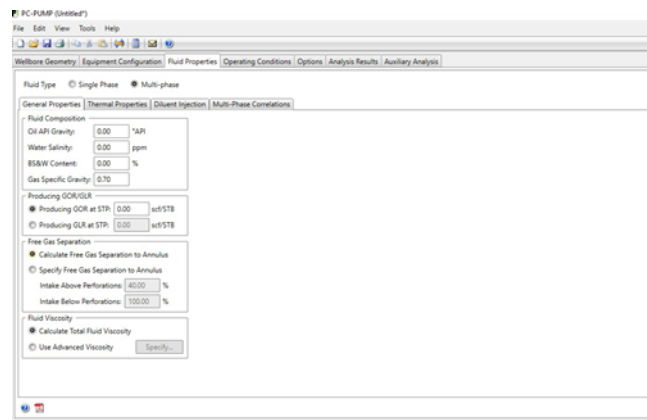


**Nota.** La imagen corresponde a la ventana del simulador PC-PUMP. La interfaz permite elegir opciones desde una biblioteca predefinida para el levantamiento artificial y todo lo relacionado a la configuración del equipo.

- Propiedades de los fluidos: en esta ventana se ingresan las propiedades generales del fluido.

**Figura 14**

*Ventana configuración de propiedades de los fluidos en el simulador PC-PUMP*

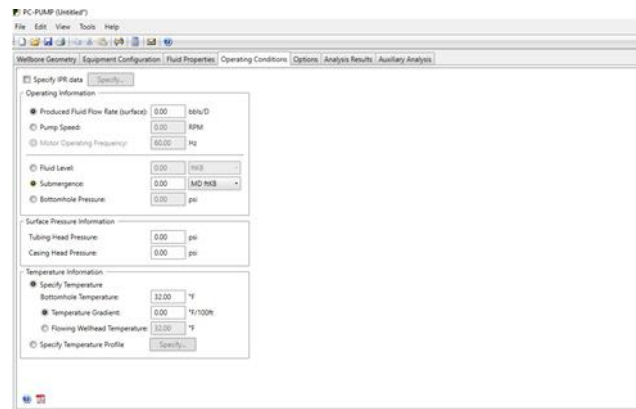


**Nota.** La captura de pantalla muestra la interfaz de Propiedades de Fluidos del simulador PC-PUMP. En esta ventana, se introducen las propiedades generales del fluido, proporcionando un espacio para ingresar datos clave que caracterizan las características fundamentales del fluido.

- Condiciones de operación: en esta ventana se ingresa los valores de caudal en BOPD que se quiere producir en el pozo, el nivel o la sumergencia, la presión de operación de producción y la temperatura del fluido.

**Figura 15**

*Ventana condiciones de operación en el simulador PC-PUMP*

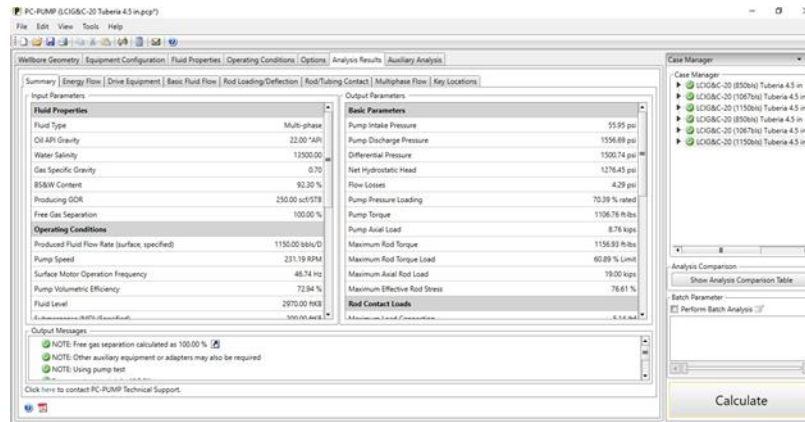


**Nota.** La imagen revela la sección de Condiciones de Operación en el simulador. Aquí, se ingresan valores cruciales como el caudal en BOPD deseado para la producción del pozo, el nivel o la sumergencia, la presión de operación de producción y la temperatura del fluido. Este espacio facilita la configuración precisa de las condiciones de funcionamiento del sistema

Luego de ingresar todos los datos, se selecciona el botón *Calcular* para generar el reporte de análisis del sistema de levantamiento artificial, en el cual se muestra las propiedades del fluido, las condiciones de operación, parámetros básicos de operación, los valores de las cargas de contacto entre la varilla y tubería, los parámetros de superficie, el diagrama de completamiento del pozo, el espaciamiento, el desgaste de la tubería, entre otros parámetros.

Figura 16

Ventana sección de resultados del simulador PC-PUMP



**Nota.** La imagen representa la sección de resultados tras ingresar los datos proporcionando una visión completa y detallada del rendimiento del sistema.

#### 5.4 Condiciones de operación iniciales de los pozos

Se realizaron las simulaciones de los tres (3) pozos seleccionados, LCIG&C-1, LCIG&C-8 y LCIG&C-20, empleando el software PC – PUMP, para conocer las condiciones de operación del pozo; resultado obtenido de la aplicación de los criterios de selección de los pozos descritos en el numeral 5.1.

En la tabla 2 se presentan los parámetros que se ingresaron al programa para realizar las respectivas simulaciones.

**Tabla 2**

*Condiciones iniciales de operación de los pozos*

<b>Variables de entrada</b>	<b>LCIG&amp;C-1</b>	<b>LCIG&amp;C-8</b>	<b>LCIG&amp;C-20</b>
<b>Producción global mínimo (BFPD)</b>	800	900	850
<b>Producción global óptimo (BFPD)</b>	1.000	1.091	1.067
<b>Producción global máximo (BFPD)</b>	1200	1.200	1.150
<b>Profundidad del intake (psi)</b>	2.935	2.370	3.170
<b>GOR (scf/stb)</b>	150	150	250
<b>Presión de tubing (psi)/THP</b>	250	250	250
<b>Presión de casing (psi)/CHP</b>	25	30	30
<b>BSW (%)</b>	97,8%	95,6%	92,3%
<b>Temperatura de fondo de pozo (°F)</b>	120	120	120
<b>Temperatura en cabeza de pozo (°F)</b>	80	100	80
<b>Gravedad API</b>	22	24	22
<b>Gravedad específica gas</b>	0,7	0,7	0,7
<b>Salinidad (ppm)</b>	12.800	12.500	13.500
<b>Eficiencia de la bomba mínimo (%)</b>	55,3%	57,6%	52%
<b>Eficiencia de la bomba máximo (%)</b>	75,4%	70,4%	72%
<b>Sumergencia (ft)</b>	200	200	200
<b>Velocidad de la unidad de bombeo mínima/RPM</b>	80	80	80
<b>Velocidad de la unidad de bombeo máxima/RPM</b>	250	250	250
<b>Presión máxima de la bomba (%)</b>	80%	80%	80%
<b>Presión mínima de la bomba (%)</b>	30%	30%	30%
<b>Tipo de bomba</b>	750 – 5400 CX-Oil Lift (120-1650)	750 – 5400 CX-Oil Lift (120-1650)	725 – 4925 CX – Oil Lift (115-1500)
<b>Potencia nominal del motor eléctrico (Hp)</b>	75	100	75
<b>Tipo de cabezal PCP</b>	WFT – MG-2000-19T	WFT – MG-2000-19T	WFT – MG-2000-19T
<b>Tipo de varilla</b>	Continua 1 1/8"	Continua 1 1/8"	Continua 1 1/8"
<b>Máxima carga en la varilla</b>	80%	80%	80%
<b>Mínima carga en la varilla</b>	30%	30%	30%
<b>Casing de producción</b>	7" x 23 lbs/ft	6 <sup>5/8</sup> " x 24 lbs/ft	7" x 26 lbs/ft
<b>Tubería de producción</b>	3,5"	3,5"	4,5"

**Nota.** En la tabla 2 se presentan los parámetros que se ingresaron al programa para realizar las respectivas simulaciones.

## 6. RESULTADO Y ANÁLISIS

A continuación, se presentan los resultados y análisis obtenidos del presente trabajo de grado para evaluar el índice de fallas en la sarta de varilla de los pozos con bombeo de cavidades progresiva en el Campo La Cira Infantas de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena, mediante la implementación del Análisis de Causa Raíz (ACR).

### 6.1 Selección de los pozos críticos en el Campo La Cira Infantas

Inicialmente se identificaron los pozos con *run life* menor o igual a 150 días, destacándose ocho (8) pozos: LCIG&C-1 (*run life* = 74), LCIG&C-4 (*run life* = 135), LCIG&C-8 (*run life* = 55), LCIG&C-9 (*run life* = 117), LCIG&C-10 (*run life* = 150), LCIG&C-17 (*run life* = 149), LCIG&C-20 (*run life* = 58) y LCIG&C-26 (*run life* = 1). Seguidamente, se identificaron los pozos que cumplieron con la producción de crudo neto mayor o igual a 20 BOPD, sobresaliendo tres (3) pozos: LCIG&C-1 (BOPD = 28,5), LCIG&C-8 (BOPD = 22,5) y LCIG&C-20 (BOPD = 33,3), (ver tabla 3).

Finalmente, los pozos que cumplieron con los dos (2) criterios fueron: LCIG&C-1, LCIG&C-8 y LCIG&C-20; por tanto, fueron los pozos seleccionados para implementar la metodología de Análisis de Causa Raíz (ACR), dado que son catalogados como pozos críticos.

**Tabla 3**

*Evaluación de los dos (2) criterios para seleccionar los pozos en el Campo La Cira Infantas*

<b>Pozo</b>	<b>Fecha de arranque del pozo</b>	<b>Fecha de falla del pozo</b>	<b>Run life (días)</b>	<b>Producción total (BFPD)</b>	<b>BSW (%)</b>	<b>Producción neta (BOPD)</b>	<b>Cumplimiento criterio 1</b>	<b>Cumplimiento criterio 2</b>
<b>LCIG&amp;C-1</b>	<b>25-may-19</b>	<b>7-ago-19</b>	<b>74</b>	<b>950</b>	<b>97,0</b>	<b>28,5</b>	<b>Sí</b>	<b>Sí</b>
LCIG&C-4	8-jul-19	20-nov-19	135	450	99,0	4,5	Sí	No
<b>LCIG&amp;C-8</b>	<b>13-ene-20</b>	<b>8-mar-20</b>	<b>55</b>	<b>900</b>	<b>97,5</b>	<b>22,5</b>	<b>Sí</b>	<b>Sí</b>
LCIG&C-9	27-nov-19	23-mar-20	117	750	97,5	18,8	Sí	No
LCIG&C-10	4-nov-19	2-abr-20	150	990	98,0	19,8	Sí	No
LCIG&C-17	1-mar-20	28-jul-20	149	950	98,0	19,0	Sí	No
<b>LCIG&amp;C-20</b>	<b>11-ago-20</b>	<b>8-oct-20</b>	<b>58</b>	<b>950</b>	<b>96,5</b>	<b>33,3</b>	<b>Sí</b>	<b>Sí</b>
LCIG&C-26	13-may-21	14-may-21	1	150	87,0	19,5	Sí	No

**Nota.** La Tabla 3 presenta un resumen de la identificación de pozos basada en el run life y la producción de crudo neto. Destaca ocho pozos con run life menor o igual a 150 días, además, se resaltan tres pozos con producción de crudo neto igual o superior a 20 BOPD. Tomado de una empresa del sector petrolero, [Acceso: octubre, 2023].

## **6.2 Análisis del pozo LCIG&C-1**

### **6.2.1 Análisis del problema. Pozo perforado el día 23 de junio de 2008, el cual fue contemplado como pozo productor iniciando su operación con sistema de bombas con cavidades progresivas para el Campo La Cira Infantas**

En su historial de fallas, desde el 2008 hasta el 2019, se logró observar que el pozo siempre ha operado con este tipo de levantamiento artificial, así mismo ha presentado diversidad de fallas durante su operación, entre ellos se destaca, la falla por varilla, la falla en tubería, la falla en bomba y otro tipo de clasificación de falla que en su momento no fue catalogada.

Durante su operación con sistema PCP la falla que más ha predominado en este pozo ha sido la falla en la sarta de varillas, la cual ha estado asociado a diversos factores de la operación del pozo y así mismo a las diferentes condiciones de los fluidos que han afectado las propiedades mecánicas de los materiales, ocasionando la respectiva falla. En total este pozo ha generado seis (6) fallas en varilla donde ha sido necesario intervenir el pozo con equipo de *workover* para ejecutar un trabajo mayor para la recuperación de este.

Con respecto a la falla objetivo en este trabajo de grado, la cual corresponde a la falla en la sarta de varillas, se tiene que el pozo fue instalado en el mes de mayo del 2019, trabajó hasta el mes de agosto de 2019, para un *run life* de 74 días. En condiciones estabilizadas, el pozo mantuvo velocidades de 106 RPM para una producción total de 950 BFPD y 97% BSW, 320 ft de sumergencia efectiva y 69% del torque disponible. Hacia el final del *run life* se puede evidenciar sostenimiento de sumergencia e incremento de velocidad por encima de las 200 RPM hasta 245 RPM.

En la tabla 4 se presenta una lluvia de ideas del análisis de causa raíz que se realizó del pozo LCIG&C-1, así como las respectivas preguntas orientadores que llevan a identificar cual es la causa raíz del problema



**Tabla 4**

*Variables identificadas en el pozo LCIG&C-1 con sus respectivas preguntas*

<b>Hipótesis</b>	<b>Preguntas</b>	<b>Evidencia/Soporte</b>
El técnico soldador no tiene las competencias para realizar el procedimiento de soldadura (criterio del técnico para hacer el proceso de soldadura)	¿Cuántos años de experiencia tiene el técnico soldador? ¿Son técnicos soldadores certificados?	Revisión de las hojas de vida de los técnicos soldadores para validar la respectiva certificación. Se evidencia que los técnicos cumplen con la experiencia, pero no cumplen con la certificación. Se requiere que la empresa realice capacitaciones a los técnicos soldadores.
El supervisor de la unidad flush by no cuenta con conocimientos profundos sobre el proceso de soldadura, lo que dificulta la realización del control de calidad del proceso.	¿El supervisor tiene las competencias para hacer seguimiento al proceso de soldadura? ¿Se cuenta con un procedimiento que indique el paso a paso del proceso de soldadura?	Revisión del procedimiento para la realización de la soldadura. Se evidencia que el procedimiento debe ser ajustado para mejorar este proceso
El equipo de "Fire Blade" utilizado para el proceso de soldadura cumple con los criterios de calidad.	¿El equipo se encuentra certificado? ¿El equipo se encuentra calibrado? ¿El equipo cuenta con las especificaciones técnicas para realizar el proceso de soldadura? ¿El equipo permite aplicar variedad de soldaduras, de acuerdo con el tipo de varilla a utilizar?	Validación del equipo utilizado para el proceso con la respectiva certificación, así como de todos los instrumentos de medición que se encuentren calibrados.

**Tabla 4.** (Continuación)

<b>Hipótesis</b>	<b>Preguntas</b>	<b>Evidencia/Soporte</b>
Se cuenta con las fichas de especificaciones técnicas de las varillas de otras empresas.	¿La competencia (otras empresas) facilita las fichas de especificaciones técnicas de sus varillas?	Habilitación de una biblioteca técnica o un banco de información digital disponible en red para realizar las respectivas consultas.
La varilla seleccionada para la simulación del diseño cumple para la operación del pozo.	¿Se tiene registro de que se ha utilizado este tipo de varilla anteriormente?	Validación del histórico de falla del pozo y evaluación del tipo de acero con mejor desempeño de acuerdo a las condiciones de fluido y operación actuales.
El material usado no cumple con las especificaciones técnicas requeridas por el pozo.	¿Se cuenta con los certificados de calidad de las varillas instaladas?	Verificación de los certificados de calidad de las varillas instaladas.
No hay un procedimiento establecido para corroborar que se alcanza la temperatura de fusión de las varillas al realizar el proceso de soldadura.	<p>¿Se tiene un procedimiento establecido para identificar la temperatura de fusión a la cual se pueden soldar las varillas?</p> <p>¿Se cuenta con las fichas de especificaciones técnicas de las varillas para identificar sus propiedades y las recomendaciones del fabricante?</p>	Revisión del procedimiento de soldadura. Se evidencia que no se utiliza un instrumento de medición para identificar la temperatura de fusión de la varilla. Por el contrario, el técnico identifica que el proceso de soldadura se puede realizar al observar la primera gota de material que se forma por el calentamiento del material.
Los pin end a soldar en la sarta de varilla no corresponden a la misma marca o fabricante de la varilla.	<p>¿Los pin end a soldar son del mismo diámetro de la sarta de varilla?</p> <p>¿El material o acero de este componente es similar o igual al de la varilla?</p> <p>¿Los pin end son elementos suministrados como nuevos o usados?</p>	Existencia del formato de remisión de despacho y entrega del material por parte del fabricante, especificando diámetro y referencia de los accesorios.

**Tabla 4.** (Continuación)

Hipótesis	Preguntas	Evidencia/Soporte
Se cuenta con un procedimiento o recomendación de los componentes y accesorios por parte del fabricante.	<p>¿Cuál es la longitud mínima permitida entre soldaduras?</p> <p>¿Cuántas soldaduras de empalme puede tener una sarta de varilla?</p>	Se cuenta con un procedimiento o recomendación de los componentes y accesorios por parte del fabricante.
Al realizar el proceso de soldadura no se lleva un registro de medición de las temperaturas obtenidas.	<p>¿Se cumple con la toma de la temperatura inicial del material?</p> <p>¿Se lleva un registro donde queda consignado la toma de estas variables durante el proceso?</p> <p>¿El instrumento para tomar la lectura de temperatura se encuentra calibrado?</p> <p>¿Qué tipo de termómetro o termocupla se utiliza para garantizar estas mediciones?</p>	Diligenciamiento de un formato de calidad que entrega el contratista en el que solo se especifica la temperatura de enfriamiento y del tratamiento térmico, sin embargo, no se reporta la temperatura a la cual se debe fundir el material.
El pin end no es lo suficientemente largo para permitir el proceso de soldadura.	<p>¿El pin end es lo suficientemente largo para la aplicación de la soldadura?</p> <p>¿De qué longitud llegan de planta los pin end?</p> <p>¿Cuánta longitud se corta del pin end antes de realizar la fusión?</p> <p>¿Se lleva un registro de estas medidas antes y después del proceso de soldadura por fusión?</p>	Lista de verificación y de registro fotográfico de las mediciones realizadas a los accesorios.

**Tabla 4.** (Continuación)

Hipótesis	Preguntas	Evidencia/Soporte
No se cuenta con las diferentes pruebas y mediciones tomadas durante el proceso de soldadura, según los criterios establecidos por los fabricantes para determinar si los diámetros finales obtenidos luego de la soldadura cumplen con las especificaciones técnicas de la norma API 11B.	¿Se aplica la norma API 11B para determinar el acabado en el cuerpo de la varilla?	Registro fotográfico y formato diligenciado con los resultados medidos luego de haber realizado la soldadura.
Las pruebas o diámetros no fueron los esperados durante el proceso de fusión de los materiales y la verticalidad de la soldadura no se cumplió.	¿La mesa de trabajo del equipo de soldadura se encuentra alineada antes y durante el proceso de fusión? ¿Se validó la nivelación antes y después del proceso?	Lista de verificación del equipo de soldadura a utilizar revisado y aprobado por el supervisor de la operación.
La prueba de tintas penetrantes que se le realizó a la sarta de varillas no fue exitosa.	¿Con que criterio se seleccionó el producto para realizar las pruebas de tintas penetrantes? ¿Se cuenta con la matriz o evaluación para seleccionar los diferentes productos para realizar estas pruebas?	Realización de la prueba para certificar la soldadura en presencia del supervisor.

**Nota.** Resumen de las hipótesis, preguntas y evidencia recolectada.

En la siguiente figura se presenta el registro fotográfico de la falla por varilla partida del pozo LCIG&C-1 con 74 días de *run life*, donde la causa raíz que se identificó fue en el proceso de soldadura del *pin end* inferior de la sarta.

**Figura 17**

*Evidencia fotográfica de la falla por varilla partida del pozo LCIG&C-1*

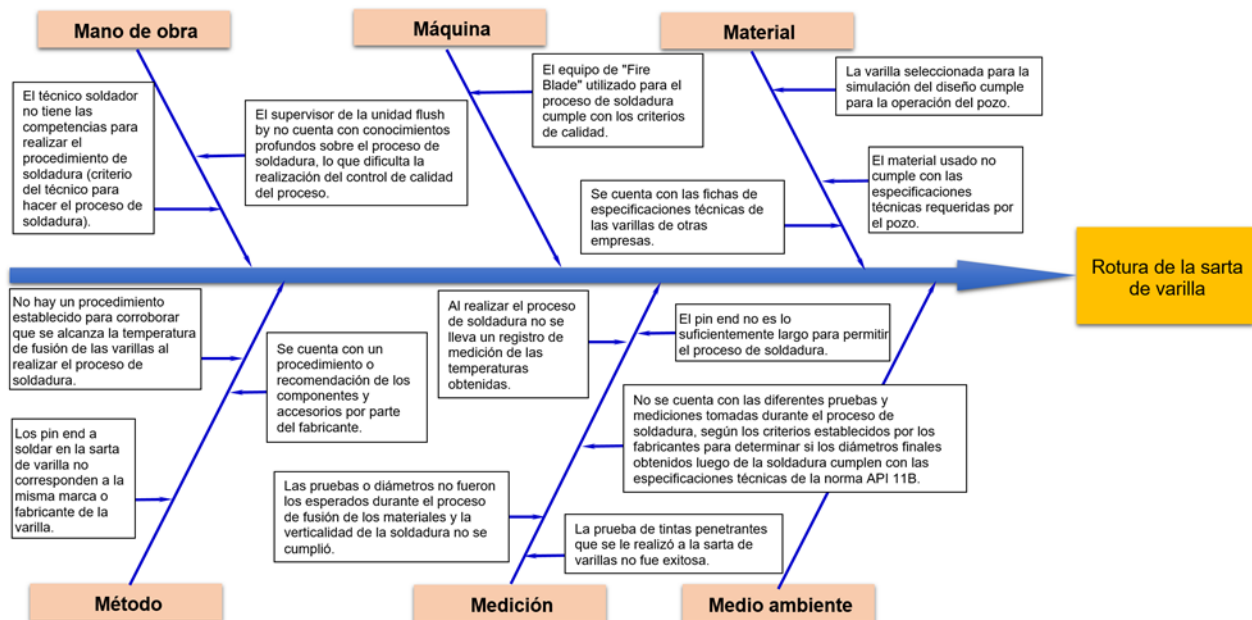


**Nota.** Tomado de una empresa del sector petrolero, [Acceso: octubre, 2023].

A continuación, se presenta el diagrama de espina de pescado el cual muestra las diversas causas identificadas en el análisis de la falla en la sarta de varilla.

**Figura 18**

*Diagrama de causa-efecto del pozo LCIG&C-1*



**Nota.** Se presenta las diferentes hipótesis de la falla mediante un diagrama de pescado.

### **6.2.2 Alternativas de solución. Finalmente, se identificaron las acciones correctivas para disminuir la frecuencia de la falla en la sarta de varillas en el pozo LCIG&C-1, entre ellas se destaca**

- Mejorar el proceso de soldadura proporcionando los controles necesarios y buenas prácticas, según la norma ISO 3884, así mismo implementar la lista de revisión y verificación de los componentes a soldar e incluir en el formato de calidad o reporte de soldadura emitido el dato medido de la temperatura a la cual el material se funde o alcanza su punto de fusión.
- Capacitar y certificar al personal para fortalecer sus competencias en la aplicación de la soldadura, implementando más horas prácticas que teóricas.
- Revisar las recomendaciones de planta en relación con el proceso de soldadura para cada tipo o modelo de varilla a soldar.
- Generar una biblioteca técnica con información relacionada con las varillas en donde el técnico pueda ubicar las fichas con las especificaciones de los diferentes fabricantes para hacer las respectivas consultas.

### **6.3 Análisis del pozo LCIG&C-8**

#### **6.3.1 Análisis del problema. Pozo perforado en el día 14 de junio de 1947, el cual fue contemplado como pozo productor en la formación Mugrosa para el Campo La Cira Infantas**

En su historia el pozo, desde el 2008 hasta el 2019, muestra diversidad de fallas en los siguientes componentes: falla por tubería, falla en varilla y falla por bomba, siendo la falla por tubería la que más predomina, seguida de la falla por varilla con un total de cinco (5) fallas acumuladas. El total de fallas presentadas durante la operación del pozo corresponde a 15 intervenciones con ingreso de equipo de *workover*.

Para el objeto de este trabajo de grado se tomó como referente la falla en la sarta de varillas como el problema principal del pozo en general. Estas fallas ocurrieron en operación del pozo por diversas situaciones de operación como configuración del sistema, fluidos presentes en pozo y construcción del pozo en general.

El pozo fue instalado en el mes de enero del 2020, trabajó hasta el mes de marzo de 2020, para un *run life* de 55 días. En condiciones estabilizadas el pozo mantuvo velocidades de 165 RPM para una producción de 900 BPD y 97% BSW, con 671 ft de sumergencia efectiva y 43% del torque disponible. Hacia el final del *run life* se evidencio sostenimiento de sumergencia e incremento de velocidad por encima de las 200 RPM hasta 210 RPM.

En la tabla 5 se presenta una lluvia de ideas del análisis de causa raíz que se realizó del pozo LCIG&C-8, así como las respectivas preguntas orientadores que llevan a identificar cual es la causa raíz del problema.

**Tabla 5**

*Variables identificadas en el pozo LCIG&C-8 con sus respectivas preguntas*

Hipótesis	Preguntas	Evidencia/Soporte
El técnico no tiene las competencias para realizar el procedimiento de espaciamento (criterio del técnico para hacer el espaciamento, factor de seguridad)	¿Cuántos años de experiencia tiene el técnico en la realización de espaciamento de bombas?	Revisión de las hojas de vida de los técnicos.
Ingeniería no cuenta con la experiencia para seleccionar la configuración de la bomba con respecto a las condiciones iniciales de diseño solicitadas para el pozo.	¿Se cuenta con una lista de chequeo para determinar el tipo de bomba que puede aplicar para las condiciones del campo y el pozo solicitado por el cliente?	Validación de las cargas de contacto y de los esfuerzos sobre la varilla que no excedan los límites permitidos para la operación del pozo, teniendo en cuenta que las condiciones del pozo pueden variar a lo largo del tiempo.

**Tabla 5.** (Continuación)

Hipótesis	Preguntas	Evidencia/Soporte
<p>El proceso de fabricación de las bombas no cumple con los criterios de calidad. Este tipo de bomba en su longitud el estator es 1 ft menor que el rotor. La excentricidad de la bomba no cumple con lo permitido por el fabricante.</p>	<p>¿Se evidencia fallas en la fabricación de los estatores y rotores?</p> <p>¿Se cuenta con las respectivas inspecciones de calidad, fabricación e inspecciones locales (revisión con equipo boroscope para visualizar deformación interna del elastómero)?</p> <p>¿Cada fabricante de bombas PCP cuenta con su propio modelo de fabricación y se diferencia con la competencia?</p>	<p>Solicitud de certificados de calidad a planta y las respectivas revisiones ejecutadas en el proceso de fabricación. Se debe implementar inspecciones con equipo boroscope antes y después de cada prueba de bombas nuevas para validar el estado interno del elastómero.</p>
<p>Subespaciamiento en la bomba seleccionada en este pozo lo que genera desgaste por rozamiento en el pin de paro.</p>	<p>¿Cuántas bombas de este modelo se han instalado en la Cira Infantas?</p> <p>¿Cuáles han sido las fallas?</p>	<p>Validación en el Campo La Cira Infantas del porcentaje de estas bombas que han fallado por rozamiento en el pin de paro.</p>
<p>Utilización de excelentes materiales para la fabricación de varillas de diferentes fabricantes: PRO ROD, COROD SWR y WFT no cumple para la operación del pozo.</p>	<p>¿Cuál es el material de fabricación de las varillas PRO ROD?</p> <p>¿Cuál es el material de fabricación de las varillas COROD SWR?</p> <p>¿Cuál es el material de fabricación de las varillas WFT?</p>	<p>Verificación del material de fabricación de las varillas.</p>
<p>El software no es preciso para el diseño de la bomba.</p>	<p>¿El valor dado por el software es el valor real de la elongación de la sarta de varilla?</p>	<p>Verificar el dimensionamiento de la bomba en el software para corroborar la deformación de la varilla.</p>



**Tabla 5.** (Continuación)

Hipótesis	Preguntas	Evidencia/Soporte
No se cuenta con un factor de seguridad para aplicar durante el cálculo del espaciamiento según lo recomendado por el programa de diseño.	¿El programa permite contemplar alguna variable para obtener una variación en el espaciamiento?	Validación que el programa cuenta con la opción de activar el perfil de temperatura del pozo, la cual está asociado al cálculo del espaciamiento.
Criterio de espaciamiento diferente según fabricante de la varilla.	¿Cuáles son las recomendaciones de planta para hacer el espaciamiento?	Verificación de si se puede cambiar la longitud del pin de paro de acuerdo al criterio mínimo establecido del factor de seguridad dado por planta.
Variables de las condiciones de operación: dimensionamiento del material con el que se diseñó, máxima carga de contacto de la sarta.	¿Se tiene establecido un criterio para hacer el diseño de las bombas en el Campo La Cira Infantas? ¿Cuáles son las condiciones de operación de la sarta de varilla según planta?	Revisión de los estados mecánicos de los diseños que se han presentado en el Campo La Cira Infantas para revisar los valores de espaciamiento.
No se tiene establecido un criterio mínimo recomendado por planta para hacer el espaciamiento.	¿Cuál es la condición mínima de diseño para hacer el espaciamiento?	Verificar el criterio mínimo recomendado por planta para hacer el espaciamiento.
Las mediciones de caudal tomadas en el pozo son criterios para determinar el correcto funcionamiento de los equipos.	¿Este tipo de mediciones efectuadas en los pozos son realizados con equipos especializados o con medición en tanques?	Validación de pruebas en los pozos durante la operación y verificación de la eficiencia volumétrica con el diseño presentado al cliente.
Las variables de operación no fueron las esperadas por el sistema según los cálculos efectuados por el programa.	¿El variador de frecuencia contaba con la respectiva programación para la operación del pozo? ¿Se efectuó el debido protocolo de arranque?	Formato de programación en el que se deja registro del reporte de servicio, así mismo se descarga la data de programación y de operación.

**Tabla 5.** (Continuación)

Hipótesis	Preguntas	Evidencia/Soporte
El producto de tratamiento químico aplicado al pozo es el indicado, según las condiciones de este.	<p>¿Con qué criterio se seleccionó el producto químico a dosificar en el pozo?</p> <p>¿Se cuenta con la matriz o evaluación para seleccionar los diferentes productos químicos, así como definir el volumen a aplicar?</p>	Análisis del tipo de fluido que se aplica al pozo, así mismo realización de los respectivos cálculos para determinar las dosificaciones de los productos químicos.

**Nota.** Se presenta las diversas hipótesis de la falla.

En la figura 19 y figura 20 se presenta el registro fotográfico de la falla por varilla partida del pozo LCIG&C-8 con 55 días de *run life*, así como la deformación del rotor por el rozamiento sobre el pin de paro, donde la causa raíz se identificó en el procedimiento de espaciamento.

**Figura 19**

*Evidencia fotográfica de la falla por varilla partida del pozo LCIG&C-8*



**Nota.** Tomado de una empresa del sector petrolero, [Acceso: octubre, 2023].

**Figura 20**

Evidencia fotográfica del rotor con rozamiento sobre el pin de paro en el pozo LCIG&C-8

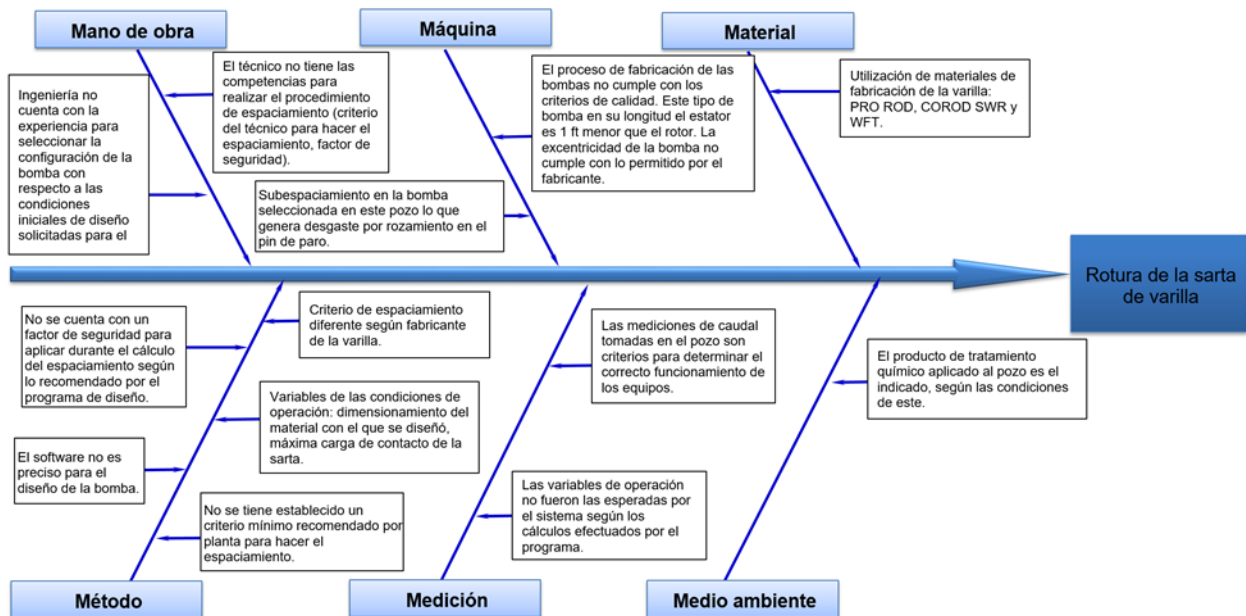


**Nota.** Tomado de una empresa del sector petrolero, [Acceso: octubre, 2023].

A continuación, se presenta el diagrama de espina de pescado el cual muestra las diversas causas identificadas en el análisis de la falla en la sarta de varilla.

**Figura 21**

Diagrama de causa-efecto del pozo LCIG&C-8



**Nota.** El diagrama de pescado representa las causas de lo que causó la falla.

**6.3.2 Alternativas de solución. Finalmente, se identificaron las acciones correctivas para disminuir la frecuencia de la falla en la sarta de varillas en el pozo LCIG&C-8, entre ellas se destaca**

- Programar una capacitación para validar los criterios mínimos establecidos para calcular el factor de seguridad para el espaciamiento en las bombas en el Campo La Cira Infantas, dado que se requiere estandarizar los procedimientos en el equipo de trabajo de ingeniería.
- Definir el factor de campo de la longitud del pin de paro que se debe tener en cuenta en la simulación realizada con el software que la empresa utiliza para los diseños.
- Actualizar el procedimiento de espaciamiento que permita confirmar o validar una correcta recuperación de peso de la sarta de varillas por medio de un medidor de peso.
- Como recomendaciones operativas para el campo de estudio se cuenta con la información inicial tomada de la solicitud de diseño donde el campo establece que la velocidad máxima para operar la PCP es de 220 RPM, por tal motivo durante la operación del pozo se valida y se verifica este parámetro en el documento de monitoreo o dinason evidenciando que el sistema estuvo muy cerca a esta velocidad crítica.
- Establecer niveles críticos recomendados durante la operación del pozo para evidenciar decrementos en el valor de esfuerzo que arroja las simulaciones con respecto a la varilla.

**6.4 Análisis del pozo LCIG&C-20**

**6.4.1 Análisis del problema. Pozo perforado en el día 26 de noviembre de 2008, el cual fue contemplado como pozo productor iniciando su operación con sistema de bombeo mecánico para el Campo La Cira Infantas**

De acuerdo con su historial reportado desde el inicio de su operación y la información recopilada en el campo a comparación con el anterior pozo, no se posee un historial exacto de las fallas que ha acumulado el pozo. Su inicio de extracción de petróleo fue contemplado con un sistema con bombeo mecánica el cual opero desde el mes de diciembre del año 2008 hasta el mes de mayo de 2009 con este tipo de

levantamiento. Las fallas presentadas con este tipo de levantamiento no quedaron definidas dado que para la fecha no se contaba con una trazabilidad de la estadística de fallas.

Su inicio de operación con sistema de levantamiento con bombas de cavidades progresivas fue en el mes de mayo de 2009, estuvo enmarcado con la aparición de las fallas por tubería, falla por varilla y otro tipo de fallas reportadas por cambio o modificación de las zonas productoras y cambio preventivo de varillas. Según el historial de este pozo, la falla que más predomina es la falla por varilla, con un total reportado de intervenciones por esta causa de ocho (8) en total.

Con respecto a la última falla presentada por este motivo, se cuenta que el pozo fue instalado en el mes de agosto del 2020, trabajó hasta el mes de octubre de 2020, para un run life de 58 días. En condiciones estabilizadas, el pozo mantuvo velocidades de 180 RPM para una producción de 950 BFPD y 96,5% BSW, con 453 ft de sumergencia efectiva. Hacia el final del run se puede evidenciar sostenimiento de sumergencia e incremento de velocidad por encima de las 200 RPM hasta 230 RPM.

En la tabla 6 se presenta una lluvia de ideas del análisis de causa raíz que se realizó del pozo LCIG&C-20, así como las respectivas preguntas orientadores que llevan a identificar cual es la causa raíz del problema.

**Tabla 6***Variables identificadas en el pozo LCIG&C-20 con sus respectivas preguntas*

<b>Hipótesis</b>	<b>Preguntas</b>	<b>Evidencia/Soporte</b>
El técnico no tiene las competencias para realizar el procedimiento de espaciamento (criterio del técnico para hacer el espaciamento, factor de seguridad).	¿Cuántos años de experiencia tiene el técnico en la realización de espaciamento de bombas?	Revisión de las hojas de vida de los técnicos.
Ingeniería no cuenta con la experiencia para seleccionar la configuración de la bomba con respecto a las condiciones iniciales de diseño solicitadas para el pozo.	¿Se cuenta con una lista de chequeo para determinar el tipo de bomba que puede aplicar para las condiciones del campo y el pozo solicitado por el cliente?	Validación de las cargas de contacto y de los esfuerzos sobre la varilla que no excedan los límites permitidos para la operación del pozo, teniendo en cuenta que las condiciones del pozo pueden variar a lo largo del tiempo.
El proceso de fabricación de las bombas no cumple con los criterios de calidad. Este tipo de bomba en su longitud el estator es 1 ft menor que el rotor. La excentricidad de la bomba no cumple con lo permitido por el fabricante.	¿Se evidencia fallas en la fabricación de los estatores y rotores? ¿Se cuenta con las respectivas inspecciones de calidad, fabricación e inspecciones locales (revisión con equipo boroscope para visualizar deformación interna del elastómero)? ¿Cada fabricante de bombas PCP cuenta con su propio modelo de fabricación y se diferencia con la competencia?	Solicitud de certificados de calidad a planta y las respectivas revisiones ejecutadas en el proceso de fabricación. Se debe implementar inspecciones con equipo boroscope antes y después de cada prueba de bombas nuevas para validar el estado interno del elastómero.

**Tabla 6.** (Continuación)

Hipótesis	Preguntas	Evidencia/Soporte
Este modelo de bomba analizado ha presentado inconvenientes en otros pozos o campos.	<p>¿Cuántas intervenciones se han atendido con este modelo de bomba y que tipo de falla se ha registrado durante estos trabajos?</p> <p>¿Se ha confirmado que presenta desgaste en la punta del rotor por rozamiento con el pin de paro?</p>	Validación de la data histórica de intervenciones de la cantidad de pulling realizados con este modelo de bomba e identificación del modelo de falla por presencia de rozamiento del rotor.
La varilla seleccionada para la simulación del diseño no cumple para la operación del pozo.	¿Se tiene registro de que se ha utilizado este tipo de varilla anteriormente?	Implementación de inspección de certificados de calidad de los carretos instalados. Validación con la data histórica del pozo del tipo de acero que se ha implementado durante la operación de este y verificación de los tiempos de vida registrados para seleccionar la mejor alternativa.
No se cuenta con un factor de seguridad para aplicar durante el cálculo del espaciamiento según lo recomendado por el programa de diseño.	¿El programa permite contemplar alguna variable para obtener una variación en el espaciamiento?	Validación que el programa cuenta con la opción de activar el perfil de temperatura del pozo, la cual está asociado al cálculo del espaciamiento.
El programa de diseño usado para las simulaciones cuenta con las librerías actualizadas para todos los modelos de las bombas de los diferentes proveedores.	<p>¿Los valores que arroja la simulación son reales para el tipo de bombas usadas durante la simulación de los diseños?</p> <p>¿El valor calculado de espaciamiento y elongación están acordes a otros casos expuestos?</p>	Verificación de la actualización del software utilizado para diseñar.

**Tabla 6.** (Continuación)

Hipótesis	Preguntas	Evidencia/Soporte
<p>La longitud de los pin de paro es suficiente para definir el factor de espaciamento calculado.</p>	<p>¿Se cuenta con un factor de seguridad para el espaciamento? ¿Se tiene en cuenta la longitud del pin de paro para la medida del espaciamento?</p>	<p>Revisión de los procedimientos de espaciamento.</p>
<p>Por parte del fabricante de bombas se cuenta con una guía o recomendación que establezca la distancia mínima recomendada para los espaciamentos.</p>	<p>Estimar con los fabricantes de bombas, ¿cuál sería el valor mínimo permitido para aplicar el espaciamento de las bombas según el tipo de varilla a instalar?</p>	<p>Revisión de los procedimientos de espaciamento.</p>
<p>Las mediciones de caudal tomadas en el pozo son criterios para determinar el correcto funcionamiento de los equipos.</p>	<p>¿Este tipo de mediciones efectuadas en los pozos son realizados con equipos especializados o con medición en tanques?</p>	<p>Validación de pruebas en los pozos durante la operación y verificación de la eficiencia volumétrica con el diseño presentado al cliente.</p>
<p>Las variables de operación no fueron las esperadas por el sistema según los cálculos efectuados por el programa.</p>	<p>¿El variador de frecuencia contaba con la respectiva programación para la operación del pozo? ¿Se efectuó el debido protocolo de arranque?</p>	<p>Formato de programación en el que se deja registro del reporte de servicio, así mismo se descarga la data de programación y de operación.</p>



**Tabla 6.** (Continuación)

Hipótesis	Preguntas	Evidencia/Soporte
El producto de tratamiento químico aplicado al pozo es el indicado, según las condiciones de este.	<p>¿Con qué criterio se seleccionó el producto químico a dosificar en el pozo?</p> <p>¿Se cuenta con la matriz o evaluación para seleccionar los diferentes productos químicos, así como definir el volumen a aplicar?</p>	Análisis del tipo de fluido que se aplica al pozo, así mismo realización de los respectivos cálculos para determinar las dosificaciones de los productos químicos.

**Nota.** La Tabla 6 se presenta una lluvia de ideas del análisis de causa raíz que se realizó del pozo LCIG&C-8, así como las respectivas preguntas orientadores que llevan a identificar cual es la causa raíz del problema.

En las siguientes figuras se presenta el registro fotográfico de la falla por varilla partida del pozo LCIG&C-20 con 58 días de *run life*, así como la deformación del rotor por el rozamiento sobre el pin de paro, donde la causa raíz que se identificó fue en el procedimiento de espaciamiento. La deformación en el rotor es un indicio de una corta longitud aplicada en el espaciamiento obtenidos en la simulación, lo que conllevó a la falla de la varilla debido a las cargas adicionales que causa el rozamiento que presentó el rotor transmitiendo estos esfuerzos a la sarta de varilla.

**Figura 22**

*Evidencia fotográfica de la falla por varilla partida del pozo LCIG&C-20*



**Nota.** Tomado de una empresa del sector petrolero, [Acceso: octubre, 2023].

**Figura 23**

Evidencia fotográfica del rotor con rozamiento sobre el pin de paro en el pozo LCIG&C-20

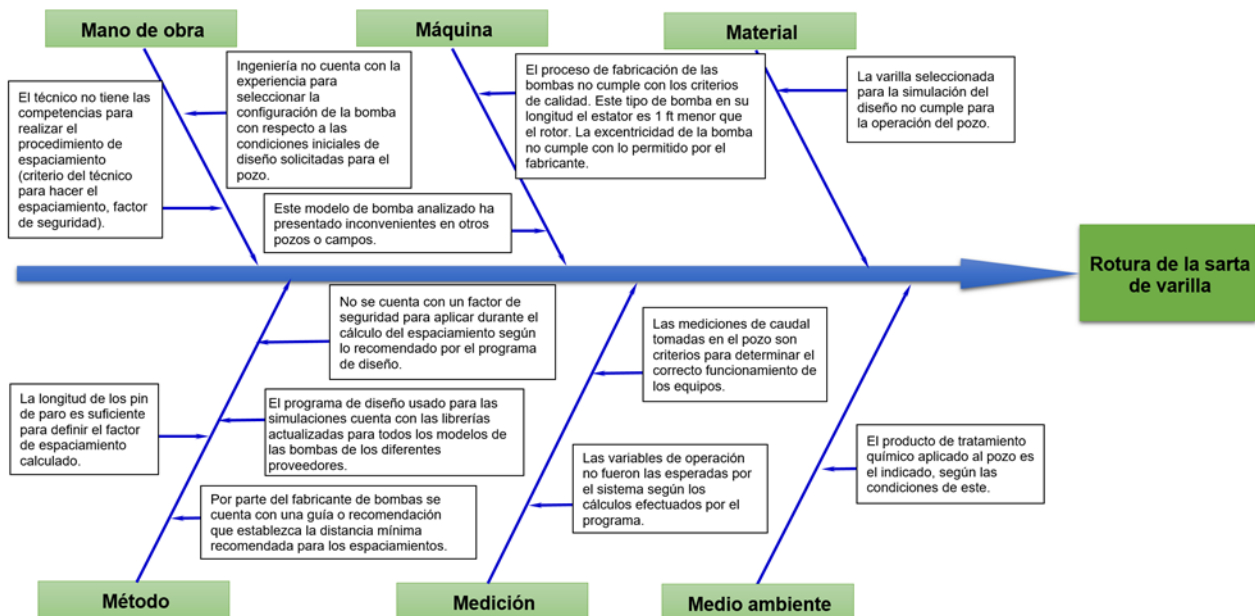


**Nota.** Tomado de una empresa del sector petrolero, [Acceso: octubre, 2023].

A continuación, se presenta el diagrama de espina de pescado el cual muestra las diversas causas identificadas en el análisis de la falla en la sarta de varilla.

**Figura 24**

de causa-efecto del pozo LCIG&C-20



**Nota** Diagrama de pescado representa las posibles causas que determinaron el pozo a fallar.

**6.4.2 Alternativas de solución. Finalmente, se identificaron las acciones correctivas para disminuir la frecuencia de la falla en la sarta de varillas en el pozo LCIG&C-20, entre ellas se destaca**

- Conocer el dimensionamiento de los equipos (bombas de cavidades progresivas por fabricante) para establecer los criterios del pin de paro a instalar y así definir la longitud de aplicación en el espaciamento.
- Programar una capacitación para validar los criterios mínimos establecidos para calcular el factor de seguridad para el espaciamento en las bombas en el Campo La Cira Infantas.
- Definir el factor de campo de la longitud del pin de paro que se debe tener en cuenta en la simulación realizada con el software que la empresa utiliza para los diseños.
- Actualizar el procedimiento de espaciamento que permita confirmar o validar una correcta recuperación de peso de la sarta de varillas por medio de un medidor de peso.
- Realizar inspecciones con equipo boroscope a los estatores para detectar cualquier anomalía interna.
- Realizar el esquemático de la instalación de la bomba y dejar consignadas longitudes y diámetros para corroborar la posición en la cual se estima que trabaje el rotor.

**6.5 Resultados de las simulaciones de los pozos**

Cabe destacar que para el pozo LCIG&C-1 no se pudo mostrar los resultados de simulación dado que las acciones de mejora establecidas en el numeral 6.2.2 están enfocadas a la realización de procedimientos que no pueden ser validados a través del uso del software PC – PUMP.

Para las simulaciones optimizadas de los pozos LCIG&C-8 y LCIG&C-20 se tuvo en cuenta el perfil de temperatura que ofrece el software, con el fin de obtener una longitud estimada del espaciamento ideal, así como las medidas establecidas por el fabricante de las bombas. Esto permitió ubicar el rotor sobre las etapas del estator para mejorar el desempeño de la bomba.

En la tabla 7 se presentan los resultados de la simulación del pozo LCIG&C-8 en el que se evidencia un análisis de este antes y después de la falla. Se evidenció que el desempeño de la bomba muestra una deficiencia prematura, con valores de -7% y -4%, en un tiempo de un (1) mes, siendo un indicativo de que el sistema presenta una falla interna asociada a uno de sus componentes.

Según data histórica del pozo, no se realizó mediciones en el tiempo en que se presentó la falla, de manera que no se cuenta con una ventana operativa que permita la evaluación profunda de la falla. El diagnóstico inicial de la falla determinó que la causa está asociada a un trabajo sobre el pin de paro, así mismo se evidenció que el rotor presenta desgaste en las últimas etapas o crestas, como lo muestra la figura 14 y figura 15, siendo un indicativo de que se presentó un subespaciamiento.

Posterior a la intervención se realizó el respectivo plan de trabajo y la validación del diseño instalado lo que permitió identificar que la longitud propuesta del espaciamento para este tipo de bomba instalada es insuficiente, así como la falta de especificación de uno de los pasos en el procedimiento (recuperación de peso).

Con respecto al cálculo del espaciamento, el ingeniero o el encargado de realizar la simulación evaluó todas las condiciones iniciales como condiciones operativas del pozo antes de la falla, lo que permitió evidenciar que la longitud usada inicialmente en el espaciamento se encuentra dentro del rango de aceptación; sin embargo, se solicitó soporte técnico al especialista del software con el fin de evaluar otros parámetros adicionales que puedan afectar el cálculo del espaciamento.

Este análisis conllevó a la inclusión en los diseños de la activación del perfil de temperatura que ofrece el software, logrando que la longitud mínima recomendada del programa de un mayor estimado de la longitud en los espaciamentos.

**Tabla 7***Análisis de las variables obtenidas del pozo LCIG&C-8*

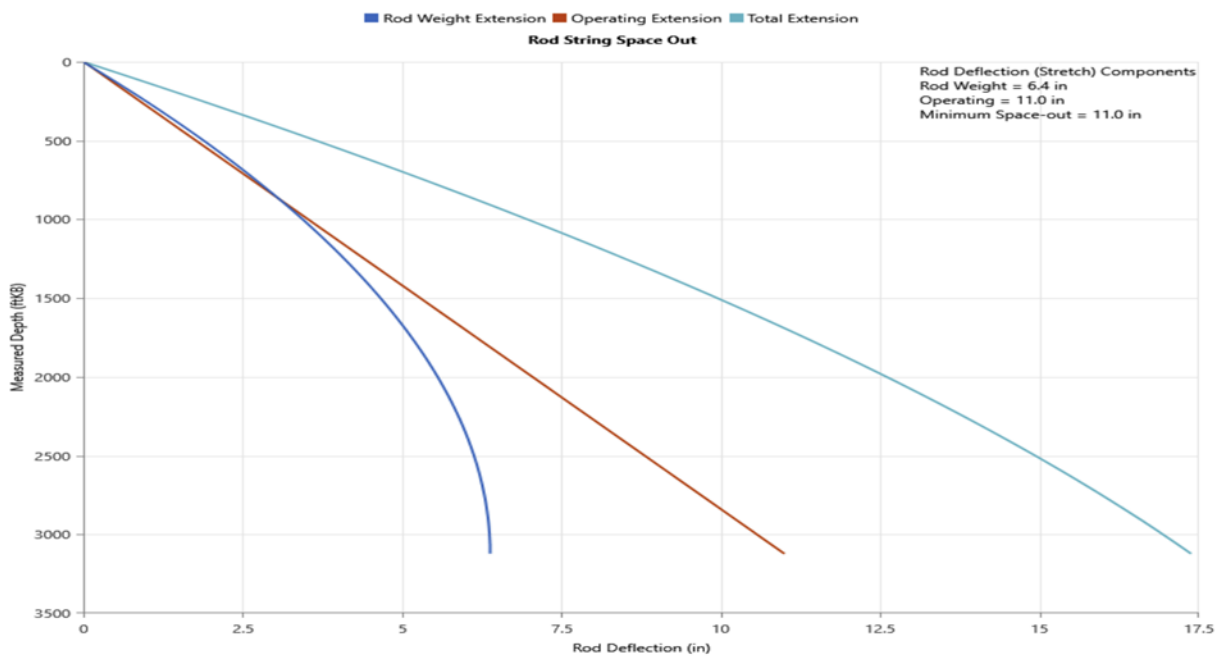
N°	Descripción	Fecha	BSW	Caudal (BFPD)	Velocidad RPM	Velocidad RPM*	Sumergencia	THP	CHP	Eficiencia volumétrica (%)	IP Min	IP Max	Eficiencia a match (%)	Diferencia de eficiencia
1	Antes de la falla	28-ene-20	83,5 1	858 BFPD	174	180,59	797	121	0,7	65%	900	1200	72%	-7%
2		20-feb-20	83,5 1	1245 BFPD	220	244,65	650	90	18,4	75%	900	1200	79%	-4%
3	Después de la falla	29-mar-20	92,3	1032 BFPD	159	193,86	884	119	0,2	86%	900	1200	74%	12%
4		30-mar-20	95,4 2	1157 BFPD	199	212	761	118	0,3	77%	900	1200	75%	2%
5		5-abr-20	96,7 4	1147 BFPD	200	210	756	135	0,8	76%	900	1200	74%	2%
6		25-abr-20	95	1255 BFPD	199	232,51	595	117	2	84%	900	1200	76%	8%
7		4-jul-20	99,3 1	1179 BFPD	180	212,14	723	113	1,2	87%	900	1200	75%	12%

**Nota.** \*Velocidad calculada por el software usando el dato reportado en la prueba de producción. Tomado de una empresa del sector petrolero, [Acceso: octubre, 2023].

En la figura 25 se presenta los resultados obtenidos de la simulación sin tener en cuenta el perfil de temperatura dentro del proceso de esparcimiento del pozo. De izquierda a derecha, la primera línea azul representa la extensión del peso de la varilla, la línea roja representa la extensión de la varilla en operación y la línea azul celeste representa la resultante de la extensión total de la varilla, la cual contempla la sumatoria de la línea azul y roja.

**Figura 25**

*Espaciamiento de la varilla del pozo LCIG&C-8 sin el perfil de temperatura*



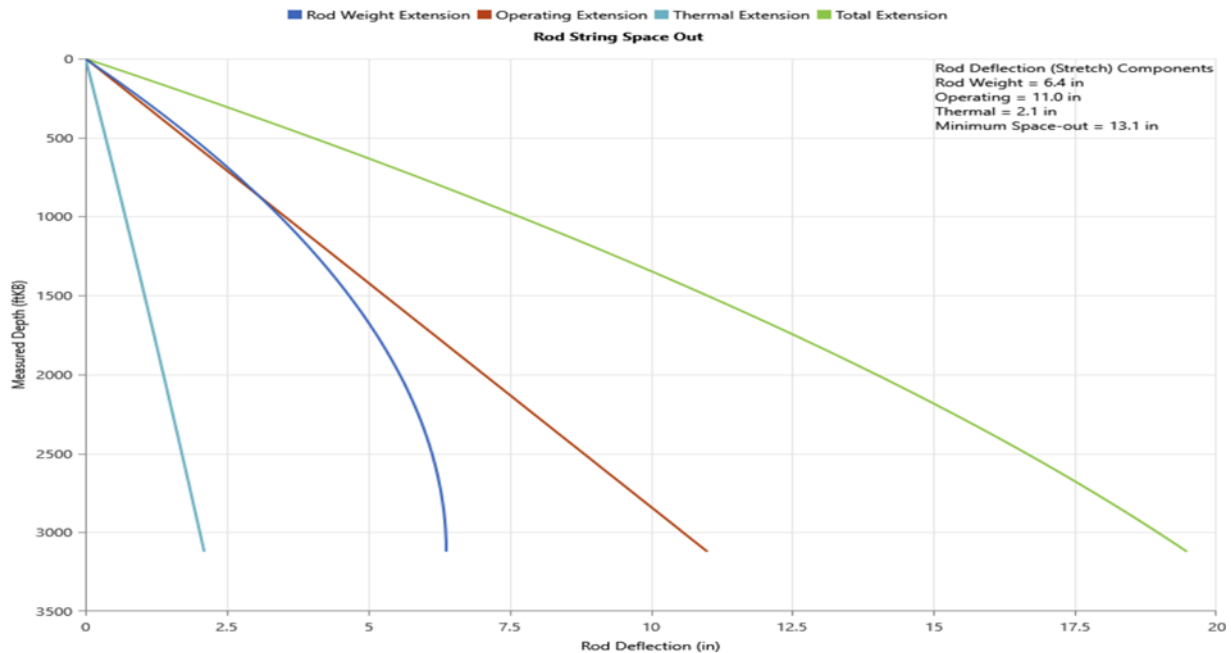
**Nota.** En la anterior figura se presentan los resultados obtenidos de la simulación teniendo en cuenta el perfil de temperatura dentro del proceso de esparcimiento del pozo.

De izquierda a derecha, la primera línea azul celeste representa la extensión térmica de la varilla, la línea azul representa la extensión del peso de la varilla, la línea roja representa la extensión de la varilla en operación y la línea verde representa la resultante de la extensión total de la varilla, la cual contempla la sumatoria de la línea azul celeste, azul y roja.

La inclusión de este parámetro ayudó a definir la longitud adecuada para los espaciamientos en los sistemas con levantamiento artificial con bombas con cavidades progresivas, de igual forma permitió el mejoramiento del procedimiento.

**Figura 26**

*Espaciamiento de la varilla del pozo LCIG&C-8 con el perfil de temperatura*



**Nota.** Con la mejora realizada incluyendo el perfil de temperatura se evidencia que el pozo LCIG&C-8 aumenta la productividad en un 9%, pasando de un promedio de 1.052 BFPD a 1.154 BFPD, logrando la mejora y optimización de este pozo (ver tabla 7).

En la tabla 8 se presentan los resultados de la simulación del pozo LCIG&C-20 en el que se evidencia un análisis de este antes y después de la falla. Se evidenció que el desempeño de la bomba muestra una deficiencia prematura, con valores de -2%, -22% y -34%, en un tiempo de un (1) mes, siendo un indicativo de que el sistema presenta una falla interna asociada a uno de sus componentes. Se evidencia que presenta un mismo comportamiento que el pozo LCIG&C-8.

**Tabla 8***Análisis de las variables obtenidas del pozo LCIG&C-20*

N°	Descripción	Fecha	BSW	Caudal (BFPD)	Velocidad RPM	Velocidad RPM*	Sumergencia	THP	CHP	Eficiencia volumétrica (%)	IP Min	IP Max	Eficiencia match (%)	Diferencia de eficiencia
1	Antes de la falla	15-ago-20	83,51	432 BFPD	79	102	676	93	3,4	76%	850	1.150	61%	14%
2		18-ago-20	83,51	444 BFPD	95	95	949	78	2	65%	850	1.150	67%	-2%
3		20-ago-20	92,3	475 BFPD	155	105	646	93	7,4	42%	850	1.150	64%	-22%
4		20-sep-20	95,42	441 BFPD	229	103	453	93	19,9	27%	850	1.150	61%	-34%
5	Después de la falla	22-oct-20	93,33	1.176 BFPD	175	206	617	91	19,19	93%	850	1.150	81%	12%
6		8-dic-20	96,3	1.174 BFPD	170	209	485	90	19	95%	850	1.150	80%	16%
7		10-mar-21	96,3	960 BFPD	150	181	313	80	20,7	88%	850	1.150	76%	13%
8		20-may-21	9,25	891 BFPD	145	166	420	99	20,1	85%	850	1.150	76%	9%

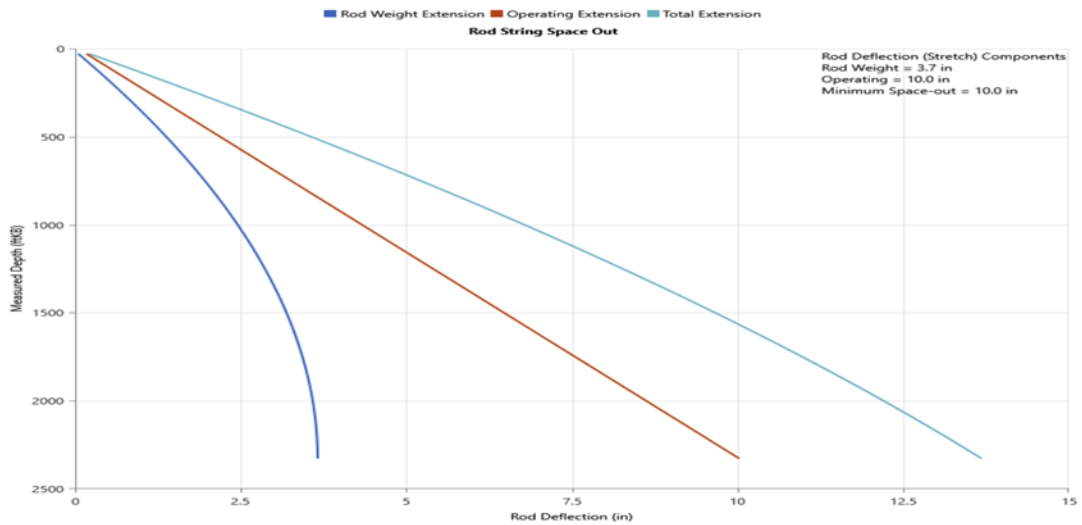
**Nota.** \*Velocidad calculada por el software usando el dato reportado en la prueba de producción. Fuente: Información suministrada por una empresa del sector petrolero, [Acceso: octubre, 2023].



En la Figura 27 se presenta los resultados obtenidos de la simulación sin tener en cuenta el perfil de temperatura dentro del proceso de esparcimiento del pozo.

**Figura 27**

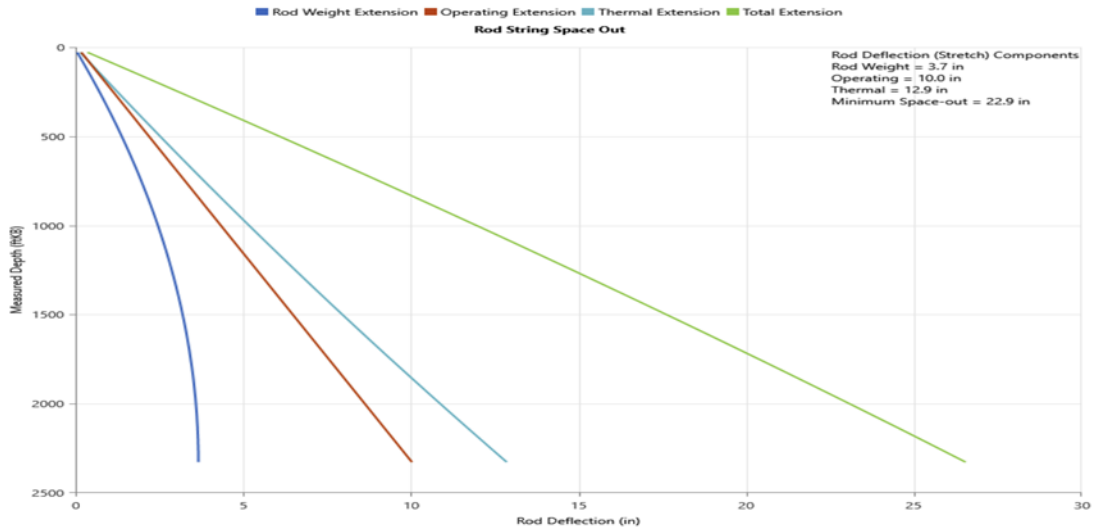
*Espaciamiento de la varilla del pozo LCIG&C-20 sin el perfil de temperatura*



**Nota.** Aquí se presenta los resultados obtenidos de la simulación teniendo en cuenta el perfil de temperatura dentro del proceso de esparcimiento del pozo. Tomado del simulador PC-PUMP.

**Figura 28**

*Espaciamiento de la varilla del pozo LCIG&C-20 con el perfil de temperatura*



**Nota.** Con la mejora realizada incluyendo el perfil de temperatura se evidencia que el pozo LCIG&C-20 aumenta la productividad en un 57%, pasando de un promedio de 448 BFPD a 1.050 BFPD, logrando la mejora y optimización de este pozo. Tomado del simulador PC-PUMP.

## 7. CONCLUSIONES

La implementación de la metodología de Análisis Causa Raíz (ACR) permitió el estudio de fallas en la sarta de varillas con bombeo de cavidades progresivas en el Campo La Cira Infantas en la Cuenca del Valle Medio del Magdalena de los pozos LCIG&C-1, LCIG&C-8 y LCIG&C-20, obteniéndose causa raíz asociado al proceso de soldadura del *pin end* y al procedimiento de espaciamiento.

En el caso del pozo LCIG&C-8 se evidenció que la falla por varilla partida con 55 días de *run life*, está asociada a la causa raíz en el proceso de espaciamiento. La longitud propuesta inicialmente en este pozo fue de 36", aplicando el nuevo método de espaciamiento se evidencia que la nueva medida que se le aplicó al pozo fue de 42", evidenciándose una mejora en el desempeño, de acuerdo a las pruebas de producción tomadas en las que se evidenció un aumento del 9%. Como alternativas de solución se planteó la programación de capacitaciones con el personal especializado para establecer el factor de seguridad del espaciamiento y la longitud del pin de paro que se debe tener en cuenta en los diseños mediante el uso del software de PC –PUMP.

Para el caso del pozo LCIG&C-20 que falló por varilla partida con 58 días de *run life*, se evidenció que la causa raíz del problema es el proceso de espaciamiento, el cual inicialmente fue de 32"; aplicando el nuevo método de espaciamiento se evidencia que la nueva medida que se le aplicó al pozo fue de 46", evidenciándose una mejora en el desempeño de operación, de acuerdo a las pruebas de producción tomadas en las que se evidenció un aumento del 57%. Las alternativas de solución que se plantearon fueron similares a las del pozo LCIG&C-8.

Por otra parte, solo se pudo validar las acciones correctivas planteadas de los pozos LCIG&C-8 y LCIG&C-20 mediante el uso del software PC – PUMP dado que se incluyó dentro de las corridas de los pozos los perfiles de temperatura. Como resultados se evidencia que los flujos de crudo producidos aumentan considerablemente una vez se ajusta ese parámetro en la corrida de los diseños; para el caso del pozo LCIG&C-8 pasa de un promedio de producción de 1.052 BFPD a 1.154 BFPD, incrementando su

productividad en un 9%; para el caso del pozo LCIG&C-20 pasa de un promedio de producción de 448 BFPD a 1.050 BFPD, incrementando su productividad en un 57%.

## REFERENCIAS

- [1] M. Pérez, J. Chirinos. “Método de diagnóstico de fallas en el sistema de levantamiento artificial por bombeo de cavidad progresiva”. Revista arbitrada venezolana del Núcleo LUZ-Costa Oriental del Lago, vol. 8, N° 2, pp. 373-389, 2013.
- [2] Norris - Dover Company. “Análisis de las fallas de las varillas de bombeo”. Informe especial de Norris, 2000.
- [3] J. A. Posada Piedrahita. Aplicación de la metodología de Análisis de Causa Raíz (ACR) para la reducción de las fallas en los componentes de subsuelo de los sistemas de bombeo PCP en pozos de campo Velásquez (Tesis de especialista). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2016.
- [4] H. E. Freire Araujo. Diseño de un programa de Análisis Causa Raíz (ACR) para el tratamiento de productos no conformes en una planta (Tesis de maestría). Escuela Superior Politécnica del Litoral, Quito, Ecuador, 2015.
- [5] O. O. Figueroa Ricaurte, D. A. Tibaduisa Carrillo. Selección del método de levantamiento artificial y la concentración de un reductor de viscosidad en fondo de pozo para la extracción de crudo pesado en el pozo Torcaz 3 (Tesis de grado). Fundación Universitaria de América, Bogotá, Colombia, 2016.
- [6] N. J. Forero Durán. Estudio de confiabilidad a partir de un análisis estadístico de fallas aplicado al sistema de levantamiento artificial de cavidades progresivas (PCP) (Tesis de grado). Universidad Surcolombiana, Neiva, Colombia, 2008.
- [7] Dingnuo Oilfield International (s.f.). “Sucker Rod Centralizador - Ampliar la vida y reducir la fricción”. [En línea]. <https://www.drinol.com/es/products/sucker-rod-centralizer.html> [Acceso: noviembre, 2023].
- [8] F. A. Álvarez Lacayo, J. M. Vega Castro. *Análisis de falla en los sistemas de bombeo mecánico del campo Cantagallo* (Tesis de grado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2008.
- [9] Tenaris Siderca (s.f.). “Fallas”. [En línea]. <https://baixardoc.com/preview/fallas-en-varillas-de-bombeo-pcp-5c8d5ccaf3b14> [Acceso: noviembre, 2023].

[10] Fuente: H. E. Freire Araujo. Diseño de un programa de Análisis Causa Raíz (ACR) para el tratamiento de productos no conformes en una planta (Tesis de maestría). Escuela Superior Politécnica del Litoral, Quito, Ecuador, 2015.

## **ANEXOS**

## **ANEXO 1.**

### **RECOMENDACIONES**

Se debería aplicar otro método de análisis para la identificación de fallas por varilla de los pozos LCIG&C-1, LCIG&C-8 y LCIG&C-20 con el fin de comparar los resultados obtenidos por las diferentes metodologías.

Se recomienda ampliar la metodología de Análisis de Causa Raíz para analizar otros tipos de falla que se presenten en los diferentes campos petroleros, estos tipos de falla pueden ser tubería rota, falla en bombas de subsuelo, falla en equipos de superficie, entre otros.

Se sugiere implementar mejoras en la técnica de soldadura, incluyendo la revisión de los parámetros utilizados y la capacitación del personal involucrado.

Se recomienda realizar evaluaciones continuas de esta variable en el diseño de los pozos. La realización de pruebas adicionales y la consideración de factores como el factor de seguridad del espaciamiento pueden contribuir a la prevención de futuras fallas y al aumento del rendimiento operativo.

Se sugiere la implementación de programas de capacitación para el personal especializado, centrándose en la determinación del factor de seguridad del espaciamiento y la longitud del pin de paro. Esto ayudará a mejorar la precisión en los diseños y reducirá la probabilidad de fallos prematuros.

Se recomienda continuar utilizando la herramienta el software PC – PUMP, en la evaluación y diseño de pozos, aprovechando la información detallada que proporciona para mejorar la productividad y prevenir fallas.

Se recomienda implementar un sistema de monitoreo continuo de la productividad de los pozos, considerando la inclusión de perfiles de temperatura en las corridas de diseño.

Esto permitirá realizar ajustes proactivos y mantener un rendimiento óptimo a lo largo del tiempo.