

Incremento del tiempo de vida útil en equipos de bombeo electrocentrífugo, aplicados en yacimientos de aceite pesado

Juan Ramón Rojano Reyes

Pemex

Ángel Salazar Munive

Pemex

Artículo recibido en junio 2022-revisado-evaluado-correcto y aceptado en septiembre 2022

Resumen

La aplicación del sistema artificial de producción de bombeo electrocentrífugo ha aumentado durante los últimos años en los yacimientos de crudo pesado en el Golfo de México. Actualmente, se cuenta con un poco más de 40 pozos operando mediante este sistema. Por lo anterior, su confiabilidad operativa es un factor estratégico para el cumplimiento de los programas de producción.

En la industria petrolera, el término de confiabilidad operativa se aplica principalmente a la operación y mantenimiento de equipo dinámico de superficie, como lo son bombas, compresores, turbogeneradores, entre otros. Sin embargo, los análisis de confiabilidad se aplican a cualquier equipo o sistema del cual se requiere evaluar y cuantificar su desempeño, y los equipos de bombeo electrocentrífugo no son la excepción.

El trabajo presente muestra las herramientas utilizadas para la aplicación de los análisis de confiabilidad a los equipos de bombeo electrocentrífugo, mediante curvas de sobrevivencia no paramétricas, trazando las adaptaciones tecnológicas realizadas, logrando clasificar las generaciones de equipos basados en su tecnología disponible y las mejoras realizadas en cada una de ellas para evaluar su desempeño.

De los resultados obtenidos, se pueden identificar los cambios y/o componentes que han tenido un mayor impacto en la confiabilidad del sistema BEC aplicado en yacimientos de crudo pesado, así como los siguientes pasos a realizar para continuar con la mejora e incremento de tiempo de vida del sistema.

Palabras clave: Bombeo electrocentrífugo, sistema artificial de producción, confiabilidad operativa, análisis de supervivencia, estimador Kaplan Meier.

Runlife increase of electrical submersible pumps applied in heavy oil reservoirs

Abstract

The electrical submersible pump artificial lift (ESP) has raised during the last years in heavy oil reservoirs applications in the Gulf of Mexico. Nowadays, there are over 40 oil wells running with ESP. Therefore, their operating reliability is a strategic factor for the production programs accomplishment.

In the oil and gas industry, the reliability term usually refers to downstream facilities' equipment, such as pumps, compressors, turbo generators, etc. However, the reliability analysis can be applied to any equipment or system on which it requires to evaluate and quantify their performance, and the ESP is not the exception.

This work shows the tools used for a reliability analysis of ESP through nonparametric survival curves, tracing technological adaptations applied and several ESP generations were identified based on their technology and improvements made in every generation for their performance evaluation.

From the results obtained, the changes and/or components that have had a greater impact on the reliability of ESP systems applied in heavy oil reservoirs can be identified, as well as the next steps to be taken to continue with the improvement and increase of runlife.

Keywords: ESP, artificial lift, reliability, survivor analysis, Kaplan Meier estimator.

Objetivo

Evaluar y caracterizar el desempeño de las aplicaciones del Sistema BEC en yacimientos de aceite pesado, a través de curvas de supervivencia no paramétricas y el trazado de las adaptaciones tecnológicas que se han realizado, con la finalidad de mejorar el desempeño de la aplicación BEC.

Introducción

Con el objetivo de optimizar el sistema artificial de producción que permita un incremento en producción, así como la reducción en el consumo de gas utilizado para el bombeo neumático continuo (BNC) en los pozos de campos de aceite pesado del Golfo de México. Desde el 2015, se ha implementado el uso del sistema artificial BEC, donde se han realizado más de 100 instalaciones de este sistema mediante un Proyecto Regional para su aplicación, para este tipo de yacimientos se tiene identificado un ahorro en el consumo del gas utilizado para BNC de 5 MMpcd por pozo

convertido a BEC, así como un incremento en la producción del orden de 1500 bpd sobre pozos operando con BNC.

Estos campos productores en formación del Cretácico son yacimientos de aceite negro pesados, con una densidad de que varía desde los 10 a los 13° API, por lo que la aplicación del sistema artificial de producción BEC representa una ventaja sustancial por su mayor eficiencia con respecto a otros. Sin embargo, la aplicación del sistema BEC en yacimientos de aceite pesado y alto caudal, presenta grandes retos tecnológicos para lograr los tiempos de vida útil deseados y consolidar su confiabilidad operativa.

La confiabilidad de un sistema se define como la probabilidad de que opere o desarrolle una cierta función durante un período de tiempo determinado, el cual a su vez se puede conformar por varios componentes.

En la **Tabla 1** se muestran las diferentes características de las aplicaciones del sistema BEC en los yacimientos de aceite pesado.

Características	Campo A	Campo B	Campo C
Frecuencia, Hz	60	60	53
Potencia, Kw	500	350	440
Temp. Motor, °C	150	160	161-170
Corriente, A	95	87	88
Prof. BEC, mv	2,800	2,800	2,544
Nivel de fluido, mv	1,759	1,759	1,780

NMIP, mvbnm	3,450	3,300	3,900
IP, bd/psi	200	100	60
API, °	14	13	10.3
Viscosidad, cp	11.1	7.2	41
Gasto, bpd	6,300	6,080	4,600

Tabla 1. Características de la aplicación BEC para los diferentes campos del Proyecto Regional.

Como se puede apreciar en la Tabla 1, la demanda del gasto de estos campos se encuentra en un rango promedio de los 4,000 a 6,000 bpd; la columna de fluidos que tiene que levantar la bomba BEC es de al menos 1,759 mv, causando que el Sistema BEC opere a condiciones de alta potencia, consumo de corriente y temperatura del motor. En ocasiones, estas condiciones llevan a un límite técnico a los componentes del sistema BEC instalado.

Desarrollo

Flujo de trabajo para el diseño y aplicación del sistema BEC

Para el entendimiento de la evolución del tiempo de vida útil de los equipos BEC instalados, es necesario conocer primero como es el flujo de trabajo para el diseño y la implementación de un sistema BEC y su proceso de mejora.

Este proceso se describe brevemente de la manera siguiente:

1. **Recopilación de Información:** Consiste en analizar y evaluar las condiciones del yacimiento y el gasto esperado para el diseño del equipo BEC.
2. **Diseño detallado del BEC:** Se realiza la Ingeniería a detalle de los equipos BEC, considerando el IP, gastos críticos, número de etapas, etc.
3. **Revisión y pruebas del equipo:** Asegurar que el equipo se encuentra completo y cumple con las especificaciones de diseño.
4. **Supervisión de la instalación en sitio:** Una vez que se han probado los equipos a instalarse de manera satisfactoria, el especialista se encarga

de inspeccionar y supervisar que la instalación se realice conforme a programa.

5. **Supervisión de arranque y puesta en operación:** El especialista se encarga de supervisar el arranque del equipo BEC, así como evaluar su comportamiento durante el periodo de limpieza.
6. **Monitoreo del comportamiento BEC:** Monitoreo y seguimiento de los parámetros operativos del sistema BEC, con el objetivo de mantener los equipos en condiciones óptimas de operación.
7. **Desensamble:** Revisión de la evidencia obtenida durante el desarmado del equipo BEC.
8. **Análisis causa-raíz:** Se aplica el proceso de análisis causa-raíz para identificar la falla asociada del equipo, así como su propuesta de mejora.

¿Curvas de supervivencia, qué son? Método Kaplan Meier

El estimador de Kaplan-Meier (1958), es un estimador no paramétrico de la función de la supervivencia, el cual toma en cuenta la censura. En el ámbito ingenieril se aplica para estimar el tiempo hasta el fallo de una máquina y se considera como no paramétrico al no suponer ninguna función de probabilidad.

Para el caso de la aplicación de la confiabilidad en el sistema BEC, se requiere poder cuantificar la probabilidad de que un equipo BEC alcance un tiempo determinado de vida útil, conociendo su configuración y desempeño en el pasado.

El estimador Kaplan-Meier de supervivencia $S(t)$ se define de la manera siguiente:

$$\hat{S}(t) = \prod_{t_i \leq t} \frac{n_i - d_i}{n_i}$$

donde:

n_i = número de sobrevivientes justo antes del momento i .

d_i = número de muertes en el momento i .

t = tiempo de evaluación.

Con la fórmula anterior, se estima la probabilidad que tiene un equipo BEC de mantenerse en operación durante un tiempo normalizado entre 0 y el número máximo de días conocido, que en este caso es de 1443 días (3.9 años). El cálculo se realiza considerando los equipos sobrevivientes y expuestos a fallar en el periodo evaluado, multiplicado por la probabilidad de supervivencia del periodo inmediatamente anterior.

El estimador de Kaplan-Meier al ser una distribución no paramétrica, es una solución a la falta de normalidad en

los datos y se le puede considerar como un estándar de la industria en los análisis de confiabilidad.

Con los cálculos obtenidos en los diferentes periodos, se construyen las gráficas de supervivencia para los equipos BEC en estudio y evaluar su desempeño, tal como se muestra en la **Figura 1**.

Para este análisis, se utilizó la información de todos los equipos instalados al momento de su realización, el cual considera un poco de más de 70 pozos y alrededor de 140 instalaciones (considerando los rediseños del sistema BEC en los mismos pozos). No se consideran las fallas generadas en el equipo BEC por cuestiones de yacimiento, por lo que el análisis se concentra a fallas asociadas a algún componente del sistema BEC.

Curvas de supervivencia- generales

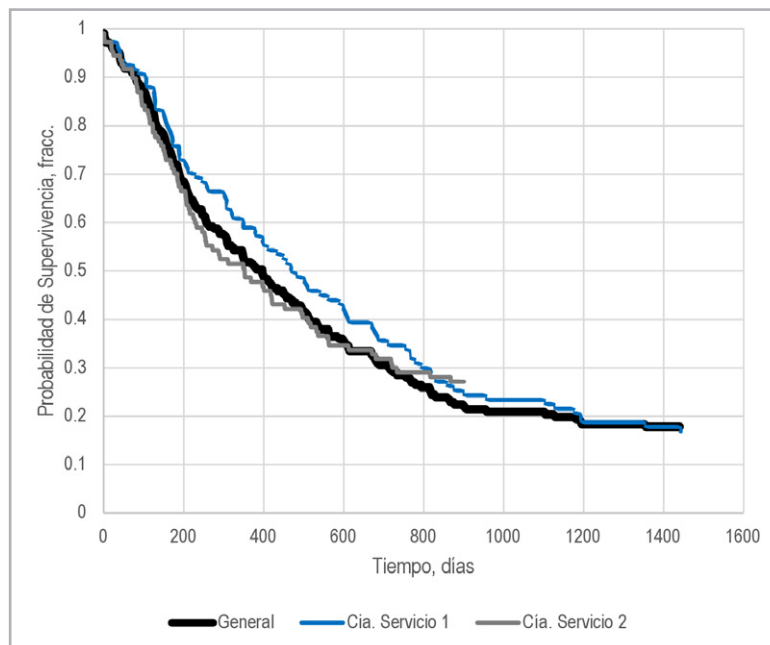


Figura 1. Probabilidad de supervivencia sistema BEC-yacimientos de aceite pesado del Golfo de México.

Caso	Prob. @ 1 año	Prob. @ 1.5 años	Prob. @ 2 años
General	0.52	0.38	0.29
1	0.59	0.45	0.35
2	0.49	0.36	0.30

Tabla 2. Curva de supervivencia general y para las estimaciones 1 y 2.

Con esta curva es posible evaluar el desempeño general de los equipos BEC y su probabilidad de supervivencia para 1, 1.5 y 2 años. Sin embargo, durante la aplicación del sistema BEC, se han realizado adaptaciones tecnológicas que han permitido el incremento de tiempo de vida útil, por lo que se requiere una discretización con base en la tecnología aplicada a cada equipo BEC, para poder evaluar el desempeño de las mejoras realizadas.

Para esto, se realizó una clasificación de los equipos BEC y se identificaron diferentes “generaciones” de equipos, con base en sus componentes adaptados y al trazado de los cambios tecnológicos en cada generación.

Todos estos cambios tecnológicos se generaron como resultado de las causas de fallas, identificadas en los componentes al momento de realizar los desarmados de los equipos BEC y así, aplicar las mejoras en los equipos siguientes.

Desde la puesta de operación del primer equipo BEC en el 2015, se agruparon cuatro generaciones de equipos de bombeo electrocentrífugo, **Figura 2**.

Curvas de supervivencia por generaciones

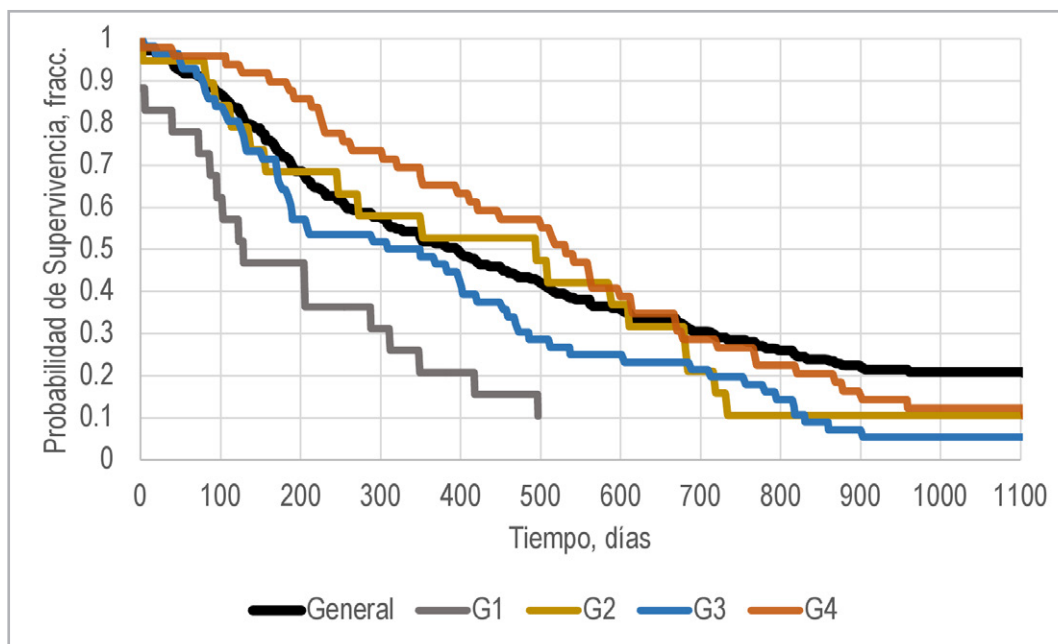


Figura 2. Probabilidad de supervivencia por generación.

Los cambios más significativos por cada generación, se describen a continuación:

Curvas de supervivencia- generación 1, Figura 3.

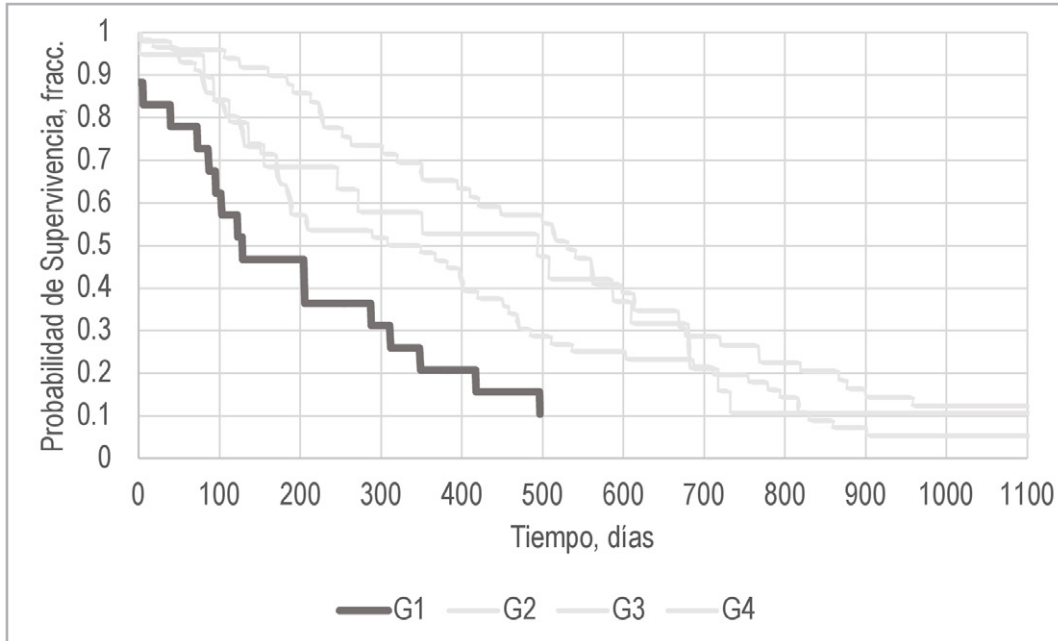


Figura 3. Probabilidad de supervivencia, generación-1.

- **Periodo de tiempo:** febrero a noviembre de 2015.
- **Bombas:** Estabilización estándar (buje cerámico cada tres etapas).
- **Manejador de gas:** bujes dinámicos de material ni-resist.
- **Sellos:** Bolsa elastomérica, sello mecánico sencillo tipo resorte, cojinete de carga de bronce, sin pin de transferencia de carga.
- **Penetrador de empacador:** Capacidad de 130°C y calibre AWG 4, cable tipo plano.

- **Motor:** Potencia de 672 HP/ 3750 volts / 108 Amp, longitud de 6 m.

Esta fue la primera generación de equipos BEC implementada; durante esta etapa se identificaron mecanismos de fallas eléctricas asociados a cortos circuitos en los penetradores de los empacadores, así como mecanismo de fallas mecánicas asociadas a incrustación de carbonatos en la carcasa del motor y etapas de la bomba, lo que ocasionó rupturas de eje en las bombas de algunos equipos.

Curvas de supervivencia- generación 2, Figura 4.

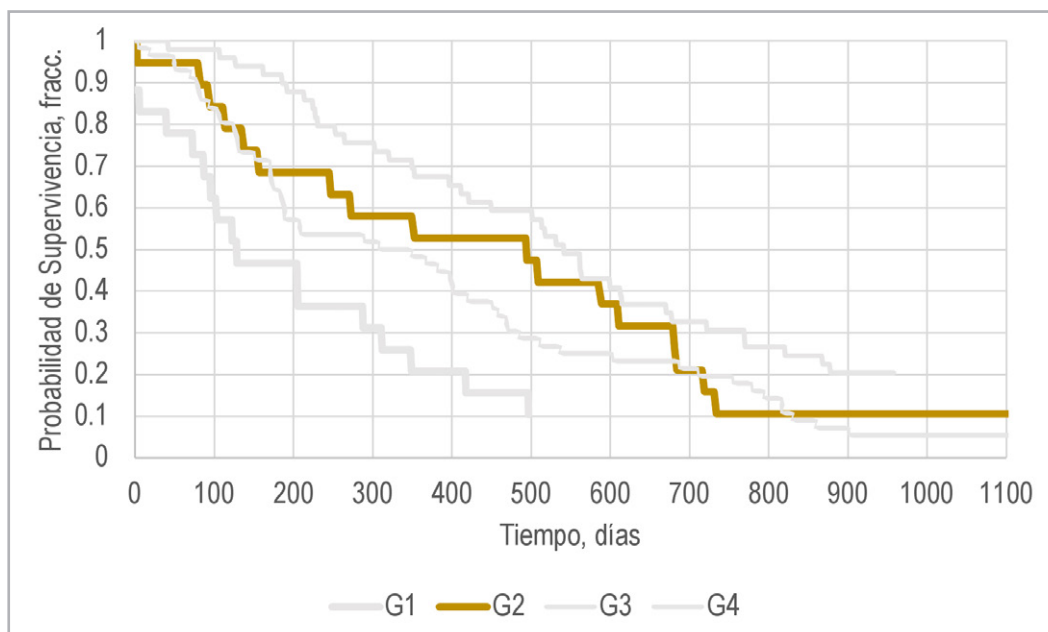


Figura 4. Probabilidad de supervivencia, generación-2.

- **Periodo de tiempo:** diciembre 2015 a enero-2017.
- **Bombas:** Estandarización de ejes de 1.18" Inconel.
- **Manejador de gas:** Sin cambio.
- **Sellos:** Sin cambio.
- **Penetrador de empacador:** Capacidad de 150°C, AWG 4 cable tipo plano.
- **Motor:** Incremento de potencia 760 HP/ 3762volts / 123Amp, así como incremento de su longitud a 9.5 m.

Una vez extraídos los primeros equipos BEC que fallaron y se identificaron las fallas descritas anteriormente, las mejoras aplicadas se concentraron a robustecer el eje de la bomba, así como la capacidad del penetrador del empacador y del motor. Se comenzó con los tratamientos de limpieza para mitigar las incrustaciones de los equipos BEC.

Curvas de supervivencia- generación 3, Figura 5.

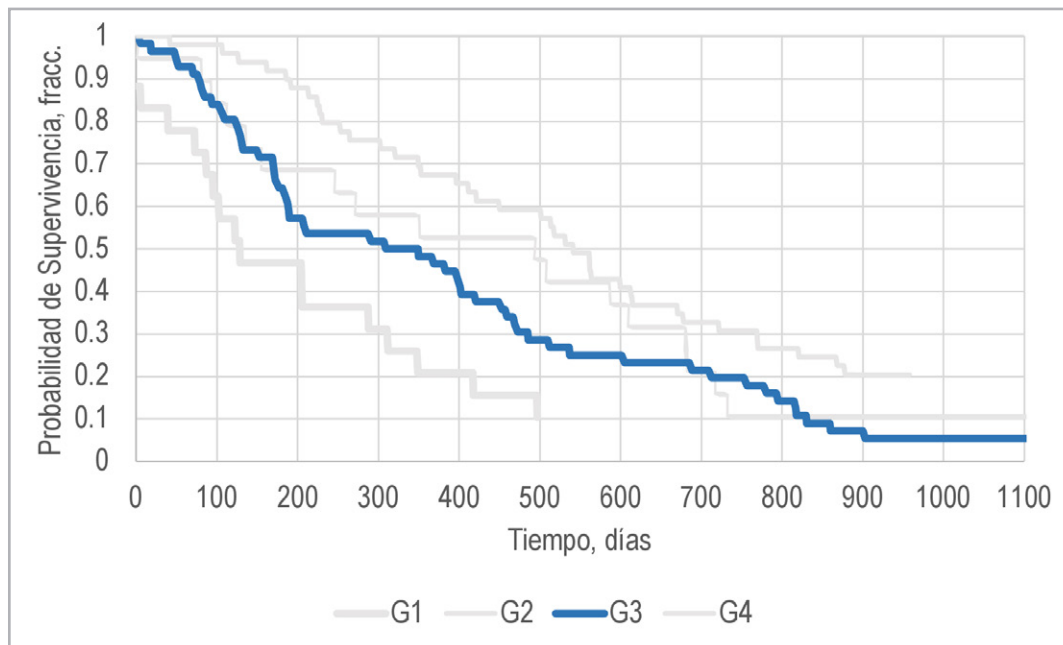


Figura 5 Probabilidad de supervivencia, generación-3.

- **Periodo de tiempo:** Febrero-2017 a mayo-2018.
 - **Bombas:** Estandarización de estabilización con buje cerámico en todas las etapas.
 - **Manejador de gas:** Sin cambio.
 - **Sellos:** Bolsa elastomérica, sello mecánico doble tipo resorte, cojinete de carga de bronce, con pin de transferencia de carga.
 - **Penetrador de empacador:** Capacidad de 150°C AWG2, cable tipo redondo.
 - **Motor:** Incremento de potencia 880 HP/ 4,140 volts / 141 amperios, longitud de 10.6 m.
- Durante esta generación se continuó con el robustecimiento del penetrador del empacador, incremento de la potencia del motor y se modificó la tecnología del sello.

Curvas de supervivencia- generación 4, Figura 6.

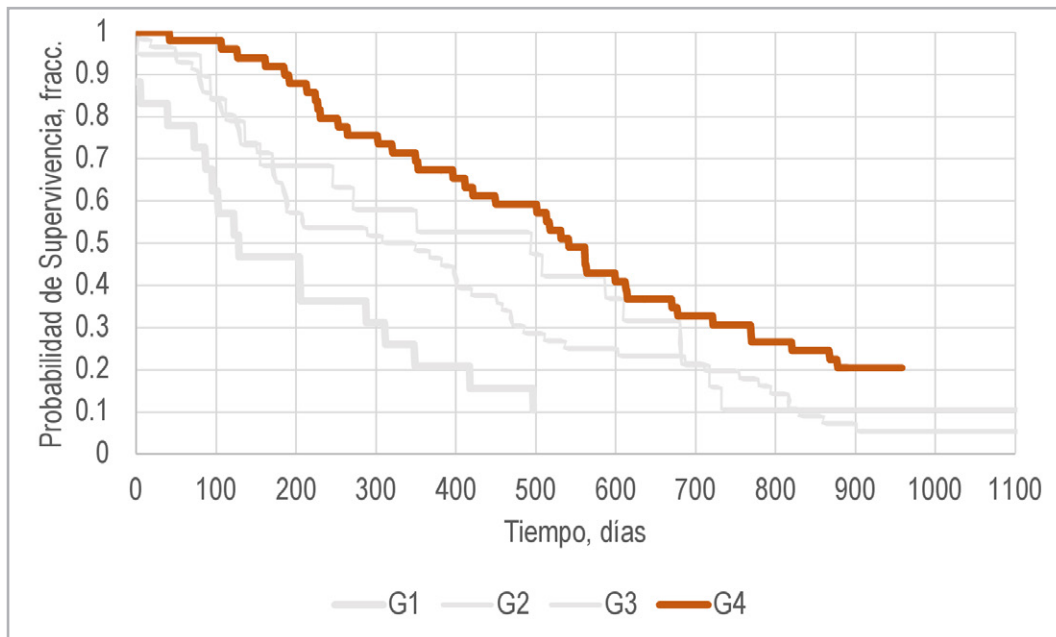


Figura 6 Probabilidad de supervivencia, generación-4.

- **Periodo de tiempo:** Junio-2018 a 2020.
- **Bombas:** Sin cambio con respecto a la generación anterior.
- **Manejador de gas:** Sin cambio.
- **Sellos:** Bolsa superior metálica, sello mecánico tipo fuelle, cojinete de carga de extra carga alta (material Peek); cuenta con pin de transferencia.
- **Penetrador de empacador:** Sin modificación.
- **Motor:** Sin cambio con respecto a generación anterior.
- Se adiciona **tubería capilar***.

Para esta generación, su adaptación principal es el cambio de la tecnología en el sello, así como la aplicación de una tubería capilar para la inhibir la incrustación de inorgánicos.

Resultados

En la **Tabla 3** se muestra un resumen de los resultados observados para las distintas generaciones.

Caso	Prob. @ 1 año	Prob. @ 1.5 años	Prob. @ 2 años
Generación 1	0.20	0.10	---
Generación 2	0.52	0.47	0.15
Generación 3	0.48	0.28	0.19
Generación 4	0.67	0.59	0.31

Tabla 3. Resultados de probabilidad de supervivencia por generación, fracción.

De los resultados obtenidos, se observó que desde los primeros ajustes realizados a la generación 1, se tuvo un incremento significativo del tiempo de vida útil a 1 y 1.5 años; no se registraron equipos de primera generación que alcanzarán los 2 años de tiempo de vida útil.

Con respecto a la comparación de las generaciones 2 y 3, no se tuvo un incremento en el tiempo de vida útil considerable; inclusive se tiene una probabilidad menor de supervivencia a 1 y 1.5 años de la generación 3, asociado a un retardo en la adaptación tecnológica en el sello, lo que incrementó la tasa de falla en este periodo de tiempo.

Ya para la generación 4, se tiene una mejora sustancial del tiempo de vida útil de los equipos de bombeo electrocentrífugo, sobre todo para los periodos de tiempo de 1 y 1.5 años, donde se tiene una alta tasa de supervivencia >69% y >60% respectivamente.

Conclusiones

- Se realizó el trazado de los cambios tecnológicos aplicados en la implementación del sistema BEC, donde se identificaron cuatro generaciones en las cuales se evaluó su tiempo de vida útil a través de curvas de supervivencia de manera independiente.
- Se observó que las adaptaciones tecnológicas aplicadas en las distintas generaciones de equipos

BEC, han tenido un beneficio en cuanto a tiempo de vida útil y su probabilidad de supervivencia a 1 y 2 años.

- Las curvas de supervivencia muestran ser un parámetro para medir y evaluar si las adaptaciones realizadas en los componentes BEC han tenido un beneficio que impacte en el desempeño del sistema.
- La adaptación tecnológica, así como su trazabilidad en el tiempo, constituyen una parte importante del proceso de la aplicación del sistema BEC y su mejora continua.
- Es necesario continuar con la adaptación tecnológica del Sistema BEC para mejorar su confiabilidad operativa, para consolidar su aplicación para aceites pesados a tiempos prolongados.

Referencias

Grupo Regional BEC, Activo de Producción Ku-Maloob-Zaap. 2019. Trazabilidad de Cambios tecnológicos BEC [Presentación].

Kaplan, E. L. y Meier, Paul 1958. Non-Parametric Estimation from Incomplete Observations. *J. Am. Stat. Assoc.* **53** (282): 457-481. <https://doi.org/10.2307/2281868>.

Semblanza de los autores

Juan Ramón Rojano Reyes

Ingeniero Petrolero egresado de la Universidad Autónoma de Nuevo León. En el 2012, ingresó al programa de talento técnico de PEP, siendo asignado al Activo de Producción Ku-Maloob-Zaap, en el cual se desempeñó en primera instancia como asistente generalista; posteriormente en el 2014 fue asignado al área de Productividad de Pozos y al Grupo Regional BEC en el 2015. A partir del 2020, forma parte del Centro de Estudios Regionales de la Región Norte de la Subdirección Técnica de Exploración y Producción.

Actualmente es especialista en Productividad de Pozos de acuerdo con el Plan de Carrera de PEP.

Ángel Salazar Munive

Ingeniero Petrolero egresado del Instituto Politécnico Nacional, con Especialidad en Sistemas Artificiales de Producción y Maestría en Ingeniería Petrolera ambas por la UNAM, con 26 años de experiencia en la industria petrolera como Ingeniero de Diseño y Productividad de pozos, Análisis Nodal y Flujo multifásico. Con amplia experiencia en el desarrollo, implantación y supervisión de proyectos de aplicaciones de Sistemas Artificiales de Producción.

Entre los proyectos en los que ha participado se encuentran, Proyecto BEC Activo integral Ek-Balam; Optimización fuera de línea de la red de Gas de Bombeo Neumático en la RMNE; Documentación, licitación e implantación del Proyecto regional de BEC de la RMNE.