

Optimización de tiempos en operaciones de intervención a pozos petroleros en el Putumayo
mediante la adquisición de datos

Elaborado por:

Daniel Ricardo Beltrán Moreno

Universidad EAN

Especialización en gerencia de proyectos.

Bogotá

10/10/2023

Resumen

La optimización de tiempos de intervención en pozos petroleros es un área fundamental en la industria del petróleo. Una intervención se refiere a todas las operaciones realizadas en un pozo petrolero después de su perforación inicial para garantizar la producción continua de hidrocarburos. La eficiencia en estas intervenciones es crucial para maximizar la producción y minimizar los costos operativos generando una rentabilidad de los pozos productores de crudo y gas. En este informe final, exploraremos los conceptos clave relacionados con la optimización de tiempos de intervención en pozos petroleros, las herramientas identificadas para lograr esas optimizaciones, su aplicación y resultados en las operaciones de subsuelo de Ecopetrol en el Putumayo.

Palabras clave: Optimización, Intervención, Tiempo Real, Adquisición de datos, Costos, Gestión.

Problema de Investigación

Los pozos petroleros desempeñan un papel fundamental en la producción de petróleo y gas, y su mantenimiento es esencial para mantener una producción constante y minimizar los costos operativos. Sin embargo, la duración y los costos de las intervenciones de mantenimiento en estos pozos son un desafío persistente en la industria petrolera. La adquisición de datos en tiempo real se presenta como una solución innovadora que puede abordar este problema de manera eficaz.

Vallejo (2019) señala que “el objetivo de la industria petrolera se ve reflejado en la producción diaria de barriles de petróleo y el costo que implica producir, por lo que la

intervención oportuna, eficiente y eficaz de pozos favorecerá para recuperar y/o incrementar la producción de un campo” (p. 1, párrafo 2).

En el campo petrolero de Ecopetrol en el departamento del Putumayo se realizan las intervenciones de mantenimiento y reacondicionamiento de pozos con equipos de workover con el fin de mantener y aumentar la producción de crudo y gas en el campo. Para ejecutar estas intervenciones a los pozos, se realiza una planeación detallada con tiempos definidos para cada actividad a realizar dentro de la intervención al pozo, donde dicha planeación está alineada a los objetivos establecidos por Ecopetrol de tiempos y costos promedio para este tipo de trabajos con el fin de mantener estable o a la baja el costo de levantamiento del barril de petróleo. Ledesma (2015) señala que “este costo de levantamiento de cada barril producido en un yacimiento se calcula a partir de dos componentes: el nivel de producción y el nivel de gasto. Por lo tanto, para reducirlo se debe incrementar el primer componente o disminuir el segundo” (p. 4, párrafo 2).

Sin embargo, los tiempos de intervención en los pozos del departamento de Putumayo para Ecopetrol son a menudo prolongados y costosos, lo cual se refleja en tiempos y costos de ejecución más altos con respecto a los calculados en la etapa de planeación del pozo, como se puede evidenciar en la divulgación de resultados de las vigencias de los años 2020, 2021 y 2022, en donde no se cumplieron con los Tiempos Promedio de Intervención (TPI) planeados para las intervenciones a pozo en el Putumayo (Ecopetrol, 2022). Los desafíos actuales incluyen:

Costos Elevados: Las intervenciones de mantenimiento pueden representar un costo significativo en el presupuesto operativo. Estos costos incluyen equipo, personal, materiales y pérdida de producción durante el tiempo de inactividad.

Pérdida de Producción: Las intervenciones prolongadas conllevan a una recuperación tardía de la producción de petróleo y gas, lo que se traduce en una reducción de los ingresos de la empresa.

Impacto en la Eficiencia Operativa: Los largos tiempos de intervención pueden afectar la eficiencia operativa y la capacidad de respuesta a problemas imprevistos.

Las tecnologías y prácticas actuales utilizadas en la industria para el monitoreo y mantenimiento de pozos a menudo tienen limitaciones en términos de eficiencia y capacidad para reducir los tiempos de intervención. Más precisamente en la actualidad, en Ecopetrol, la forma de medir y realizar el seguimiento a la duración de las operaciones de intervención a pozo, se basa en reportes en Excel realizados por los supervisores de los equipos de workover, en los cuales realmente no se puede tener certeza de la exactitud de los tiempos reportados y dentro de los que se pueden volver invisibles tiempos no productivos que afectan el rendimiento del equipo y por ende impactan de forma negativa los costos y tiempos totales de la intervención.

Adicionalmente, estas desviaciones negativas en tiempos de intervención no han podido ser corregidas debido a que corresponden a factores que no son fácilmente visibles o identificados debido a que tampoco se cuenta con un sistema de adquisición de datos que permita monitorear la variación de los parámetros o variables críticas durante las intervenciones a pozo

y a que como se mencionó anteriormente, no se cuenta con una cultura de reportes detallados que puedan ayudar a identificar y corregir los tiempos no productivos.

Según Vallejo (2019) “Un control veraz, la determinación del tiempo de ejecución requerido para cada operación de reacondicionamiento y la evaluación de los factores que inciden en la normal ejecución del tiempo de operación, garantizará la optimización de los recursos económicos sin afectar la productividad del pozo ni la integridad humana y ambiental” (p. 3, párrafo 1).

Las variaciones en el precio del petróleo a nivel internacional han llevado a que las compañías que operan en la industria petrolera y las que prestan servicios en este sector busquen de manera más activa la forma de reducir los costos con el fin de maximizar sus beneficios. Esto implica la necesidad de disminuir los costos por barril producido, ya sea aumentando la producción o reduciendo los gastos operativos (Ledesma, 2015).

La adquisición de datos en tiempo real se presenta como una solución innovadora para abordar estos desafíos. Esta tecnología permite el monitoreo continuo de los pozos, la detección temprana de problemas y la toma de decisiones más rápidas y eficientes.

¿Es posible a través de la adquisición de datos, optimizar los tiempos de intervención a pozo en el campo petrolero de Putumayo?

Objetivos

Objetivo general

- Optimizar tiempos en operaciones de intervención a pozos petroleros en el Putumayo a través de la identificación de tiempos no productivos mediante la adquisición de datos en tiempo real.

Objetivos específicos

- Analizar las métricas de intervención a pozo, comparando la planeación contra la ejecución de las intervenciones a través de las bases de datos existentes en Ecopetrol.
- Identificar a través de los datos existentes en las bases de datos de Ecopetrol, cuáles son las actividades en las que se presentan las mayores desviaciones de tiempo en la ejecución.
- Implementar un sistema de adquisición de datos que permita tener acceso al comportamiento de las variables críticas durante las intervenciones a pozo.
- Determinar a través de la adquisición de datos en tiempo real, las causas específicas que generan pérdidas de tiempo durante la ejecución de actividades en las intervenciones a pozo.

Justificación

Conveniencia:

La optimización de los tiempos de intervención en pozos petroleros es un tema de suma importancia en esta industria y cobra aún más relevancia en campos marginales como lo es el de Putumayo para Ecopetrol, en donde el control y reducción del costo de levantamiento del barril de petróleo puede significar la viabilidad económica del campo. Lograr una optimización en los tiempos de intervención puede generar un impacto significativo en la reducción de costos operativos y la maximización de los beneficios económicos, estimulando la inversión y generación de proyectos de gran impacto a nivel regional.

Relevancia social:

El campo petrolero de Ecopetrol en Putumayo genera cientos de empleos directos e indirectos y es un motor económico para las comunidades de las áreas de influencia del departamento. Optimizar los tiempos de intervención en pozos puede contribuir a la creación y retención de empleos, así como a la estabilidad económica de esta región la cual es dependiente de esta industria.

Implicaciones prácticas:

Esta investigación cuyo objetivo tiene la optimización de tiempos de intervención en pozos petroleros, puede llevar a la identificación de mejores prácticas, tecnologías innovadoras y estrategias de gestión más efectivas. Esto puede traducirse en la reducción de tiempo de inactividad en la producción de pozos, minimizando así las pérdidas económicas asociadas con retrasos en la extracción.

Valor teórico:

Adicionalmente, a través de esta investigación se puede contribuir al avance tecnológico de la industria petrolera en el Putumayo, en lo que tiene que ver con servicios de mantenimiento y reacondicionamiento de pozos. La identificación de métodos más eficaces para la intervención de pozos puede llevar al desarrollo de modelos y teorías más precisas que permitan optimizar los tiempos de las operaciones en pozo reduciendo así los costos asociados a cada intervención.

Utilidad metodológica:

La optimización de tiempos de intervención en pozos petroleros involucra la aplicación de diversas técnicas y metodologías, desde la simulación computacional hasta el análisis de datos en tiempo real. Investigar este campo puede mejorar las habilidades y competencias de los profesionales de la empresa que tienen como función planear, evaluar y ejecutar las operaciones de servicio de mantenimiento y reacondicionamiento de pozos, además de fomentar la colaboración entre estos profesionales y las empresas prestadoras de servicio que están involucradas en la operación. Además, puede resultar en el desarrollo de herramientas y metodologías transferibles a otros sectores de la empresa que enfrentan desafíos de gestión y optimización.

Marco Teórico

Posterior a la perforación y completamiento inicial de un pozo productor de petróleo y gas o inyector de agua, es necesario realizar diferentes tipos de intervenciones al pozo con el fin de garantizar la producción o inyección de fluidos a lo largo del tiempo. Estas intervenciones pueden ser:

- *Servicio de mantenimiento a pozo:* Son todas aquellas intervenciones enfocadas en mantener o recuperar la producción básica del pozo. Estas intervenciones pueden ser de tipo reactivo cuando el sistema de levantamiento artificial o la tubería de producción ha fallado o de tipo proactivo cuando de manera preventiva se realiza la atención del pozo de acuerdo con la proyección de vida útil de sus componentes antes de que estos fallen (Ramírez, 2021).
- *Servicio de reacondicionamiento o workover:* Este tipo de operaciones se generan con el fin de aumentar la producción o inyección que tiene actualmente los pozos, mediante la modificación del estado mecánico de este. (Ruiz, 2019).

En algún momento de la vida productiva o de inyección de un pozo, es necesario realizar estas actividades de reacondicionamiento y las validaciones económicas y el tipo de pozo determinan las actividades u operaciones de reacondicionamiento a realizar. (Ken y Stewart, 1987; Spoerker y Doschek, 2005).

Estas intervenciones de mantenimiento de pozos en un campo petrolero pueden tener un impacto económico significativo, tanto en términos de costos como de beneficios, por lo cual es necesario tener un control de los tiempos necesarios para ejecutar cada una de las actividades dentro de la intervención con el fin de cumplir con lo planeado previamente al ingreso al pozo.

La falta de control sobre los tiempos de ejecución de las intervenciones de mantenimiento en los pozos de un campo petrolero puede tener varios efectos económicos negativos, ya que puede generar costos adicionales y interrupciones en la producción (Ledezma, 2015). A continuación, se describen algunas de las formas en que esto puede afectar económicamente a un campo petrolero:

Pérdida de producción: Cuando las intervenciones de mantenimiento no se ejecutan de manera eficiente y se prolongan más de lo previsto, la producción de petróleo y gas en el pozo o en el campo en su conjunto se ve afectada negativamente. Esto puede resultar en una disminución significativa de los ingresos, ya que se dejan de producir barriles de petróleo que podrían haberse vendido en el mercado (Valenzuela, 2015)

Aumento de los costos operativos: Los costos asociados con las intervenciones de mantenimiento, como la movilización de equipos, la contratación de personal y la compra de materiales, pueden aumentar significativamente si las operaciones se prolongan más de lo planeado. Los costos adicionales pueden incluir horas extras, tarifas de alquiler de equipos y mayores costos de logística (Vallejo, 2019). Estos costos adicionales pueden afectar negativamente los márgenes de beneficio del campo petrolero.

Reducción de la eficiencia operativa: Las demoras en las intervenciones de mantenimiento pueden tener un efecto dominó en la operación general del campo petrolero. Por ejemplo, pueden causar cuellos de botella en la programación de otras actividades, retrasar la puesta en marcha de nuevos pozos o proyectos y aumentar la complejidad de la gestión logística. Esto puede llevar a una reducción en la eficiencia operativa y mayores costos generales de operación. (Ruiz, 2017)

Incumplimiento de compromisos contractuales: En algunos casos, las empresas petroleras pueden tener compromisos contractuales con socios, clientes o reguladores con respecto a los tiempos de ejecución de las intervenciones de mantenimiento. El incumplimiento de estos compromisos puede dar lugar a sanciones, multas o penalizaciones económicas adicionales.

Impacto en la planificación financiera: Las demoras en las intervenciones de mantenimiento pueden dificultar la planificación financiera y la proyección de ingresos para la empresa petrolera. Esto puede hacer que sea más difícil cumplir con obligaciones financieras, como el pago de deudas o el retorno de inversiones, lo que a su vez puede afectar negativamente la salud financiera de la empresa (Ledezma, 2015)

En resumen, la falta de control sobre los tiempos de ejecución de las intervenciones de mantenimiento puede tener graves consecuencias económicas negativas para un campo petrolero. Para minimizar estos impactos, es fundamental una planificación cuidadosa, una gestión eficiente de las operaciones y la supervisión continua para garantizar que las intervenciones se realicen de manera oportuna y dentro de los presupuestos previstos.

Actualmente a nivel mundial en la industria, el monitoreo de las operaciones de intervención a pozos petroleros se realiza utilizando una combinación de tecnología avanzada y supervisión en tiempo real por parte de ingenieros y personal especializado. A continuación, se describen algunos de los métodos y tecnologías utilizados en el monitoreo de estas operaciones:

Sensores en tiempo real: Los pozos petroleros modernos están equipados con una variedad de sensores que recopilan datos en tiempo real sobre la presión, la temperatura, el caudal y

otras variables relevantes. Estos sensores transmiten datos a las estaciones de control en la superficie.

Telemetría: La telemetría es el proceso de recopilación y transmisión de datos desde el fondo del pozo hasta la superficie. Esto permite a los operadores de pozos obtener información en tiempo real sobre las condiciones del pozo y la operación de intervención.

Sistemas de adquisición de datos: Las empresas petroleras utilizan sistemas de adquisición de datos para recopilar, almacenar y analizar los datos en tiempo real. Estos sistemas pueden generar gráficos y alertas para indicar cualquier desviación con respecto a los planes de operación.

Monitoreo remoto: Los pozos petroleros pueden ser monitoreados de forma remota desde centros de control en tierra. Los ingenieros y técnicos pueden supervisar las operaciones y tomar decisiones en tiempo real para garantizar el cumplimiento de los tiempos planeados.

Software de simulación y modelado: Se utilizan software especializados para simular y modelar las operaciones de intervención en el pozo. Esto ayuda a predecir el rendimiento y a planificar las operaciones de manera eficiente.

Medición y evaluación de indicadores clave de rendimiento (KPI): Se establecen KPI específicos para medir el cumplimiento de los tiempos planeados y otros aspectos clave de la operación. Estos KPI se comparan con los objetivos establecidos y se toman medidas correctivas si es necesario.

Comunicación en tiempo real: La comunicación efectiva entre el personal en el sitio y los equipos de control en la superficie es esencial para garantizar que se cumplan los tiempos planeados. Esto se logra mediante sistemas de comunicación por radio, satélite y otras tecnologías.

Capacitación y supervisión del personal: El personal que opera en el sitio recibe capacitación adecuada y es supervisado de cerca para asegurar que las operaciones se realicen de acuerdo con los procedimientos planificados.

El monitoreo en tiempo real de las operaciones de intervención a pozos petroleros es esencial para garantizar la seguridad, eficiencia y cumplimiento de los tiempos planeados (Ledezma, 2015). La tecnología y los sistemas de control avanzados desempeñan un papel fundamental en este proceso, permitiendo tomar decisiones informadas y ajustar las operaciones según sea necesario, sin embargo, aunque estas tecnologías se vienen implementando a nivel mundial, en Colombia más precisamente en el campo petrolero del Putumayo, no se han implementado debido a que el costo asociado de las mismas puede ser alto. Por esta razón es importante hacer el balance costo/beneficio y visualizar las oportunidades de mejora y reducción de impacto económico que puede tener la implementación de un sistema de monitoreo en tiempo real durante las intervenciones de pozo en este campo.

Dicha implementación de un sistema de monitoreo en tiempo real de las variables durante una intervención de mantenimiento en un pozo petrolero puede conllevar varios beneficios significativos:

1. Toma de decisiones informadas: El monitoreo en tiempo real proporciona a los operadores y técnicos información actualizada sobre las condiciones del pozo, lo que les permite tomar decisiones informadas y ajustar las operaciones en consecuencia. Esto es fundamental para garantizar la seguridad y eficiencia de la intervención.
2. Seguridad mejorada: El monitoreo constante de variables como la presión, la temperatura y el flujo de fluidos permite detectar de manera inmediata cualquier anomalía o situación peligrosa. Esto ayuda a prevenir accidentes y minimizar riesgos para el personal y el entorno.
3. Optimización de la operación: El acceso a datos en tiempo real permite optimizar la operación en curso. Por ejemplo, si se detecta una caída inesperada en la presión, se pueden tomar medidas correctivas de inmediato, como ajustar las tasas de bombeo o realizar una limpieza más efectiva.
4. Reducción de costos: La capacidad de detectar problemas de manera temprana y tomar medidas correctivas puede evitar paros no planificados y costosos. Esto ayuda a reducir los gastos asociados con las intervenciones de mantenimiento y aumentar la eficiencia de la producción.
5. Mejora de la productividad: El monitoreo en tiempo real permite maximizar la producción durante y después de la intervención. Se pueden ajustar los parámetros operativos para garantizar que se esté extrayendo la mayor cantidad de petróleo o gas de manera segura y eficiente.

6. Reducción del tiempo de inactividad: La detección temprana de problemas y la capacidad de tomar medidas inmediatas pueden acortar significativamente el tiempo de inactividad del pozo, lo que es crítico en la industria petrolera, donde cada día de producción perdido puede tener un alto costo.
7. Mejora en la calidad de los datos: Al monitorear en tiempo real, se pueden identificar problemas de calidad de datos de manera temprana y corregirlos. Esto garantiza que los datos recopilados sean precisos y confiables para su posterior análisis.
8. Cumplimiento regulatorio: Al mantener un monitoreo riguroso de las variables operativas, la empresa puede cumplir de manera más efectiva con las regulaciones y normativas ambientales y de seguridad establecidas por las autoridades gubernamentales.
9. Optimización a largo plazo: Los datos recopilados durante el monitoreo en tiempo real también pueden utilizarse para analizar tendencias a largo plazo y optimizar las estrategias de mantenimiento y producción en el futuro.

Por lo anterior mencionado, la implementación de un sistema de monitoreo en tiempo real durante una intervención de mantenimiento en un pozo petrolero ofrece una serie de beneficios que van desde la seguridad y la eficiencia operativa hasta la reducción de costos y la mejora de la producción, lo que es crucial en una industria tan competitiva y crítica como la del petróleo y el gas.

Adicionalmente solo la adquisición de datos en tiempo real no es suficiente para lograr la optimización de los tiempos de intervención a pozo, es necesario implementar una metodología que permita aprovechar toda esta data obtenida con el fin de identificar en que procesos se pueden realizar mejoras eliminando tiempos no productivos. Para esto el primer pasó es el análisis de los datos en tiempo real, en el cual se deben utilizar técnicas como el procesamiento de señales, para extraer información valiosa de los datos que se recopilan continuamente.

Esto nos conduce a una gestión de procesos y mejora continua a partir de la data adquirida en tiempo real. La filosofía de la gestión de procesos se centra en poner el enfoque en los resultados obtenidos en lugar de las acciones individuales que se realizan. En lugar de analizar minuciosamente cada tarea por separado, se busca simplificar y acelerar el flujo de actividades para lograr un proceso completo y eficiente. La recopilación de datos y documentos se orienta hacia la mejora general de la operación, y todos los miembros del equipo contribuyen manteniendo siempre en mente el resultado deseado. (Fernandez, 2003). Por su parte la mejora continua es el sistema que las organizaciones implementan para mejorar su comprensión de las necesidades cambiantes y ajustarse de manera eficaz a ellas, lo que resulta en un rendimiento mejorado. (Grijalvo, 2002).

Marco institucional

Ecopetrol S.A. es una de las principales compañías petroleras de América Latina. Su marco institucional se establece a través de diversos elementos, como su naturaleza jurídica, sus objetivos y funciones, su gobierno corporativo y su relación con el Gobierno de Colombia.

Ecopetrol es una empresa de economía mixta, lo que significa que es propiedad del Estado colombiano y cotiza en bolsa. Su creación y operación se rigen por la legislación colombiana,

en particular, la Ley 1118 de 2006. Sus principales objetivos son la exploración, producción, refinación, transporte y comercialización de hidrocarburos y sus derivados. Esta empresa busca desarrollar proyectos de exploración y producción de petróleo y gas, tanto a nivel nacional como internacional, para garantizar el suministro de energía al país.

El crecimiento de Ecopetrol está enfocado en el segmento del Upstream. Las principales palancas de crecimiento están asociadas al aprovechamiento de los activos actuales y la exploración en Colombia, la diversificación a través de la internacionalización y el crecimiento inorgánico, y el desarrollo de los Hidrocarburos en yacimientos no convencionales en Colombia y en Estados Unidos. (Ecopetrol 2021, p. 5, párrafo 8)

Su misión es trabajar todos los días para construir un mejor futuro que sea rentable y sostenible, con una operación sana, limpia y segura. Así mismo, Ecopetrol asegura la excelencia operacional y la transparencia en cada una de sus acciones a través de la construcción de relaciones de mutuo beneficio con los grupos de interés. Esta declaración empresarial fue complementada, con la definición de un Propósito Superior que sintetiza la razón de ser Ecopetrol: "Somos energía que transforma a Colombia". Y su visión es llegar a ser una compañía integrada de clase mundial de petróleo y gas, orientada a la generación de valor y sostenibilidad, con foco en Exploración y Producción, comprometida con su entorno y soportada en su talento humano y la excelencia operacional. (Ecopetrol 2021, p. 5, párrafo 3 y 4)

Tiene un gobierno corporativo que incluye una Junta Directiva y una alta dirección ejecutiva encabezada por el Presidente de la empresa. La Junta Directiva es nombrada por el Gobierno de Colombia y está compuesta por miembros independientes y representantes del Estado.

El Estado colombiano es el accionista mayoritario de Ecopetrol y tiene un control significativo sobre las decisiones estratégicas de la empresa. El Ministerio de Hacienda y Crédito Público de Colombia es la entidad encargada de ejercer las funciones de accionista en representación del Estado. Ecopetrol tiene una estrecha relación con el Gobierno Colombiano, ya que sus operaciones tienen un impacto significativo en la economía y el desarrollo del país. La empresa también está sujeta a regulaciones y políticas gubernamentales en el sector de hidrocarburos.

Tiene un compromiso con la responsabilidad social y ambiental y participa en proyectos y programas destinados al desarrollo sostenible de las comunidades en las áreas donde opera. También trabaja en la implementación de prácticas ambientalmente responsables en sus operaciones.

Ecopetrol ha expandido sus operaciones a nivel internacional, participando en proyectos de exploración y producción en otros países. Esta expansión forma parte de su estrategia de diversificación y crecimiento.

La empresa se rige por principios de transparencia y ética en todas sus operaciones y está sujeta a regulaciones y estándares internacionales en materia de gobierno corporativo y sostenibilidad.

Metodología

Primer nivel

Enfoque, alcance y diseño de la investigación

Este proyecto que busca reducir los tiempos de intervenciones de mantenimiento a pozos mediante la adquisición de datos en tiempo real debe tener un enfoque de investigación desde la perspectiva cuantitativa por varias razones importantes:

Medición Objetiva: La adquisición de datos en tiempo real implica la recopilación de información cuantitativa, como tiempos, costos, producción, y eficiencia. Para evaluar la efectividad de esta tecnología, es esencial medir estos datos de manera objetiva y cuantitativa.

Comparación Antes y Después: Un enfoque cuantitativo permite comparar datos antes y después de la implementación de la adquisición de datos en tiempo real de manera precisa. Esto es crucial para determinar si la tecnología ha tenido un impacto positivo en la reducción de los tiempos de intervención.

Análisis Estadístico: La investigación cuantitativa utiliza análisis estadísticos que pueden revelar relaciones significativas entre las variables. Esto es fundamental para identificar patrones, tendencias y correlaciones que pueden ayudar a comprender mejor la eficacia de la tecnología y tomar decisiones informadas.

Generalización de Resultados: Los resultados cuantitativos son generalizables, lo que significa que los hallazgos obtenidos en un número suficientemente grande y representativo de pozos pueden aplicarse a poblaciones más amplias de pozos en condiciones similares. Esto brinda una base sólida para la toma de decisiones y la aplicación a gran escala.

Medición de KPIs: Al interior de la organización se utilizan Key Performance Indicators (KPIs) para evaluar el rendimiento. Un enfoque cuantitativo permite la medición de KPIs específicos que están relacionados con la reducción de tiempos de intervención y otros aspectos operativos.

Rendición de Cuentas Financiera: La medición cuantitativa es esencial para evaluar el impacto financiero de la implementación de la adquisición de datos en tiempo real. Permite calcular el retorno de la inversión (ROI) y justificar los gastos en términos financieros.

El alcance del proyecto podría abarcar múltiples enfoques dependiendo de los objetivos específicos y las etapas de este, sin embargo, para este caso el alcance debe tener un enfoque explicativo ya que se busca entender no solo la relación entre variables, sino también las razones detrás de esas relaciones. Se explorarán las causas y efectos de la implementación de la tecnología de adquisición de datos en tiempo real, y se buscará explicar por qué ciertos cambios ocurren. Este enfoque puede requerir un análisis más profundo y la identificación de factores causales.

Para un proyecto que busca reducir los tiempos de intervenciones de mantenimiento a pozos mediante la adquisición de datos en tiempo real, un diseño de investigación cuantitativa adecuado podría ser un "Diseño Experimental". Este tipo de diseño es especialmente útil cuando se busca evaluar el impacto de una intervención o tratamiento en una variable dependiente específica, en este caso, la reducción de tiempos de intervención. A continuación, explico por qué este diseño sería apropiado y cómo podría estructurarse:

Razones para un Diseño Experimental:

Causalidad: Un diseño experimental permite establecer relaciones de causa y efecto al manipular una variable independiente (la implementación de la adquisición de datos en tiempo real) y observar cómo afecta a una variable dependiente (los tiempos de intervención). Esto es esencial para evaluar si la tecnología tiene un impacto significativo en la variable de interés.

Control de Variables: Los diseños experimentales permiten un alto grado de control sobre las variables que podrían influir en los resultados. Esto ayuda a aislar el efecto de la variable independiente y a minimizar la interferencia de otros factores.

Replicación: Los experimentos pueden replicarse en múltiples pozos o en diferentes momentos para aumentar la confiabilidad de los resultados y la generalización de las conclusiones.

Un diseño experimental bien estructurado permite evaluar de manera rigurosa y cuantitativa el impacto de la adquisición de datos en tiempo real en la reducción de los tiempos de intervención en pozos, lo que es fundamental para tomar decisiones informadas y justificar inversiones en esta tecnología.

Definición de Variables

Tiempo de intervención en los pozos: Esta variable mide la duración de las intervenciones de mantenimiento antes y después de la implementación de la tecnología de adquisición de datos en tiempo real. La medida de unidad será en horas.

Costos de mantenimiento: Registra los costos asociados con las intervenciones de mantenimiento, incluyendo materiales, mano de obra y equipo, antes y después de la implementación. La unidad de medida de esta variable será en dólares.

Eficiencia operativa (Tiempo): Evalúa la eficacia de las operaciones de mantenimiento antes y después de la implementación de la tecnología en términos de tiempo y recursos utilizados. La unidad de medida será un indicador de relación (Tiempo de ejecución sin seguimiento en tiempo real / Tiempo de ejecución con seguimiento en tiempo real).

Eficiencia operativa (Costos): Evalúa la eficacia de las operaciones de mantenimiento antes y después de la implementación de la tecnología en términos de tiempo y recursos utilizados. La unidad de medida será un indicador de relación (Costo de ejecución sin seguimiento en tiempo real / Costo de ejecución con seguimiento en tiempo real).

Población y Muestra

La población en este proyecto está compuesta por todos los pozos de Ecopetrol en el área de Putumayo los cuales se encuentran dentro de la ruta de intervención en un periodo específico de tiempo para realizar una intervención de mantenimiento o reacondicionamiento y en los cuales se busca reducir los tiempos de intervenciones de mantenimiento mediante la adquisición de datos en tiempo real.

Características de la Población: La población está compuesta por una variedad de pozos que pueden diferir en ubicación geográfica, profundidad, estado mecánico y condiciones geológicas, y otras características técnicas y operativas.

Número de Individuos en la Población: El número de pozos en la población puede variar significativamente dependiendo del número de intervenciones realizadas en el periodo de tiempo objeto del estudio. Principalmente el estudio se basara en las 40 intervenciones a

pozo realizadas en el 2022 y a 9 realizadas en el 2023, estas últimas con el sistema de adquisición de datos.

Muestreo:

Para llevar a cabo una investigación en una población de esta magnitud, generalmente es impracticable estudiar a todos los pozos. Por lo tanto, se utilizará un enfoque de muestreo.

Tipo de Muestreo Elegido: En este caso, se podría utilizar un muestreo aleatorio estratificado. Los pozos se dividen en categorías según ciertas características, como ubicación geográfica, profundidad o tipo de pozo. Luego, se selecciona una muestra aleatoria de pozos de cada categoría. Este enfoque garantiza que se obtenga una representación adecuada de los diferentes tipos de pozos.

Tamaño de la Muestra: El tamaño de la muestra dependerá de varios factores, incluyendo la variabilidad esperada en los tiempos de intervención y el nivel de confianza deseado. Se podría calcular utilizando técnicas estadísticas para asegurar que los resultados de la muestra sean representativos y generalizables a la población en su conjunto. Principalmente el estudio se basará en las 40 intervenciones a pozo realizadas en el 2022 y a 9 realizadas en el 2023, estas últimas con el sistema de adquisición de datos.

Segundo nivel

Selección de métodos o instrumentos para recolección de información

Dado que se ha establecido previamente que el enfoque de esta investigación es cuantitativa, en donde se van a medir y comparar datos numéricos, los métodos e instrumentos de recolección de información más adecuados para este caso son:

Análisis de Registros y Documentación: A través de esto, se pueden examinar registros existentes de la empresa, como informes de mantenimiento, registros de tiempo, informes financieros y registros de producción. Estos documentos pueden proporcionar datos históricos y actuales que son esenciales para evaluar la eficacia de la adquisición de datos en tiempo real.

Sensores y Tecnología de Monitoreo en Tiempo Real: La implementación de sensores y tecnología de monitoreo en tiempo real en los equipos durante la intervención de pozos proporcionará datos cuantitativos directamente desde la fuente. Estos sensores pueden recopilar datos sobre en tiempo real, lo que permite una medición precisa y continua.

Registros de Costos y Finanzas: Proporcionará información financiera relacionada con los costos de mantenimiento antes y después de la implementación de la adquisición de datos en tiempo real. Esto puede incluir registros de gastos, facturas de proveedores, y otros datos financieros relacionados con el mantenimiento de los pozos.

Técnicas de análisis de datos

La elección de la técnica adecuada de análisis de los datos recolectados para generar resultados y hallazgos dependerá de la naturaleza de los datos y los objetivos específicos del proyecto. Dado que se está trabajando en un proyecto de investigación cuantitativa para

evaluar el impacto de la adquisición de datos en tiempo real en la reducción de los tiempos de intervención en pozos, estas son las técnicas de análisis de datos que podrían ser relevantes para este trabajo de investigación:

Análisis Estadístico Descriptivo: Inicialmente, se podría realizar un análisis estadístico descriptivo para resumir y presentar los datos de manera concisa. Esto incluye la creación de estadísticas resumen, como promedios, desviaciones estándar, y gráficos (histogramas, gráficos de barras, diagramas de caja) para visualizar la distribución de los datos.

Pruebas de Hipótesis: Se puede llevar a cabo pruebas de hipótesis, como un análisis de varianza (ANOVA), para determinar si existen diferencias significativas entre los grupos, como el grupo de pozos con adquisición de datos en tiempo real y el grupo de control sin esta tecnología. Estas pruebas ayudarán a evaluar si la implementación ha tenido un impacto significativo en los tiempos de intervención.

Análisis de Regresión: Para entender las relaciones entre variables y cómo influyen unas en otras, un análisis de regresión puede ser útil. Se puede realizar regresiones lineales o múltiples para evaluar cómo variables independientes, como la adquisición de datos en tiempo real, se relacionan con variables dependientes, como los tiempos de intervención.

Análisis de Series Temporales: Como se tienen datos que se recopilan a lo largo del tiempo, como los tiempos de intervención en diferentes momentos, un análisis de series temporales puede revelar patrones y tendencias a lo largo del tiempo. Esto es útil para evaluar el impacto a lo largo de diferentes períodos.

Análisis de Correlación: Un análisis de correlación puede ayudar a identificar relaciones entre variables sin necesariamente establecer causalidad. Se puede utilizar coeficientes de correlación para evaluar si existe una relación entre la implementación de la adquisición de datos en tiempo real y la reducción de los tiempos de intervención.

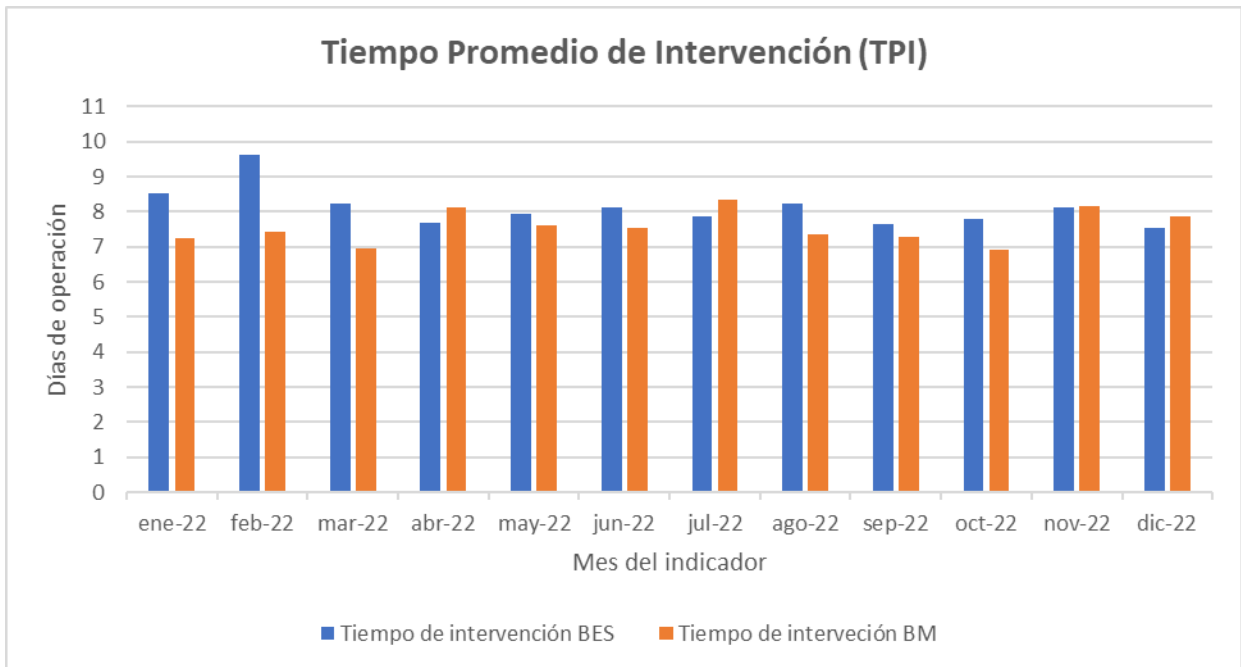
Análisis de Varianza de Dos Factores (ANOVA): Al trabajar con múltiples variables independientes o factores que podrían influir en los tiempos de intervención (por ejemplo, ubicación geográfica y tipo de pozo), el ANOVA de dos factores puede ayudar a evaluar la influencia de estos factores en conjunto.

La elección de la técnica adecuada de análisis dependerá de la estructura de los datos y de las preguntas de investigación que se están tratando de responder. En algunos casos, se realizará una combinación de estas técnicas para obtener una imagen completa y responder a tus objetivos de investigación.

Análisis y discusión de los resultados

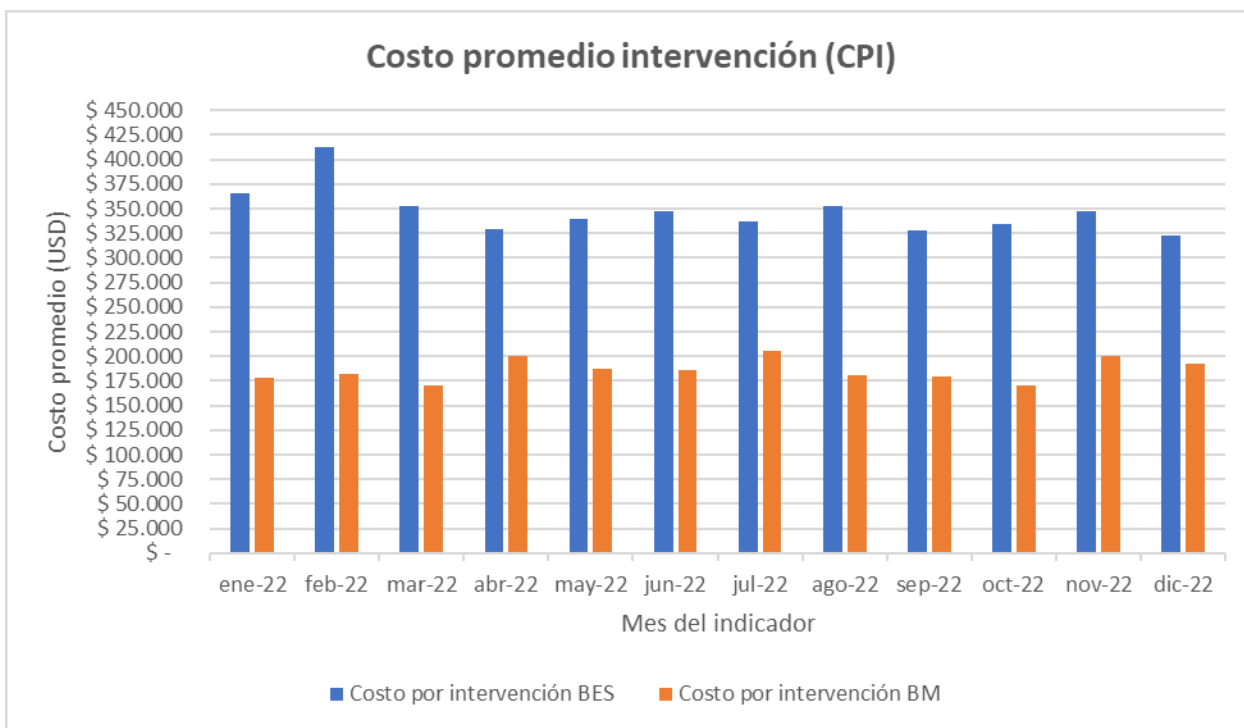
En primera instancia se realizó un análisis de los tiempos y costos promedio de intervención en todo el año 2023, teniendo en cuenta todos los pozos a los cuales se le realizaron operaciones de mantenimiento con equipo de Workover en el Putumayo. En la gráfica No.1 se observan los tiempos promedios de intervención para el año 2022 antes de la aplicación del sistema de monitoreo y adquisición de datos en tiempo real; para el año en mención se intervinieron un total de 40 pozos productores, de los cuales 23 se encontraban con un sistema de levantamiento artificial de bombeo mecánico y 17 con un sistema de bombeo electrosumergible. En ambos casos los tiempos reales de intervención estuvieron por

encima de los tiempos meta establecidos por la gerencia los cuales eran en el caso de pozos con bombeo mecánico 6.1 días de intervención y para los pozos con bombeo electrosumergible un tiempo meta de 7 días de intervención por pozo.



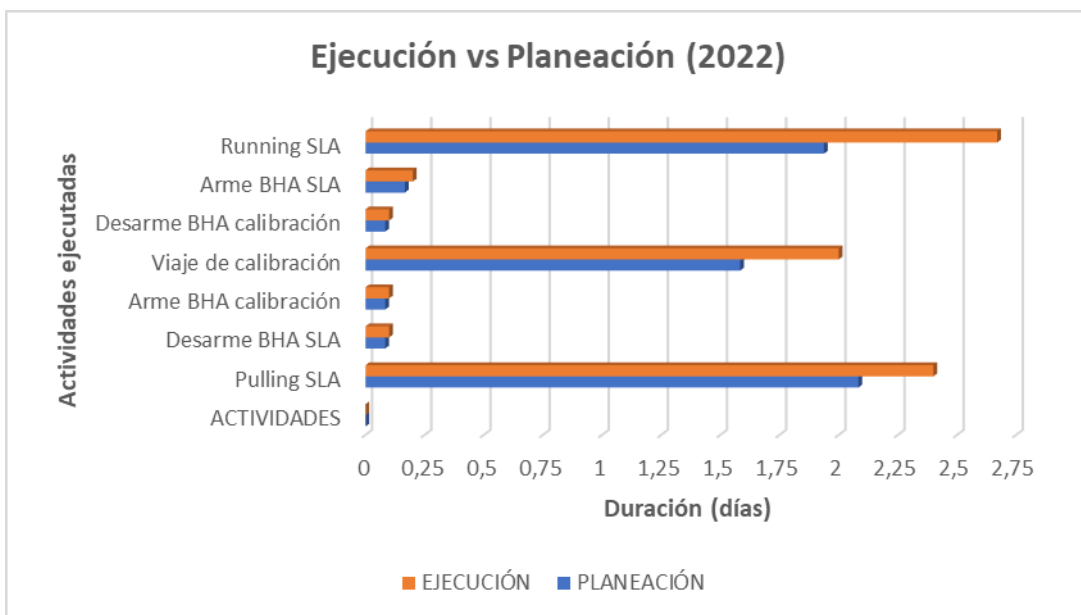
Gráfica 1. Tiempo promedio de intervención mensual 2022

En la gráfica No.2 se observan los costos promedios de intervención para el año 2022 antes de la aplicación del sistema de monitoreo y adquisición de datos en tiempo real; teniendo en cuenta el total de pozos intervenidos para el año en mención. En ambos casos los costos reales de intervención estuvieron por encima de los costos meta establecidos por la gerencia los cuales eran en el caso de pozos con bombeo mecánico USD\$ 150.000 y para los pozos con bombeo electrosumergible un costo meta de USD\$ 300.000 por pozo.

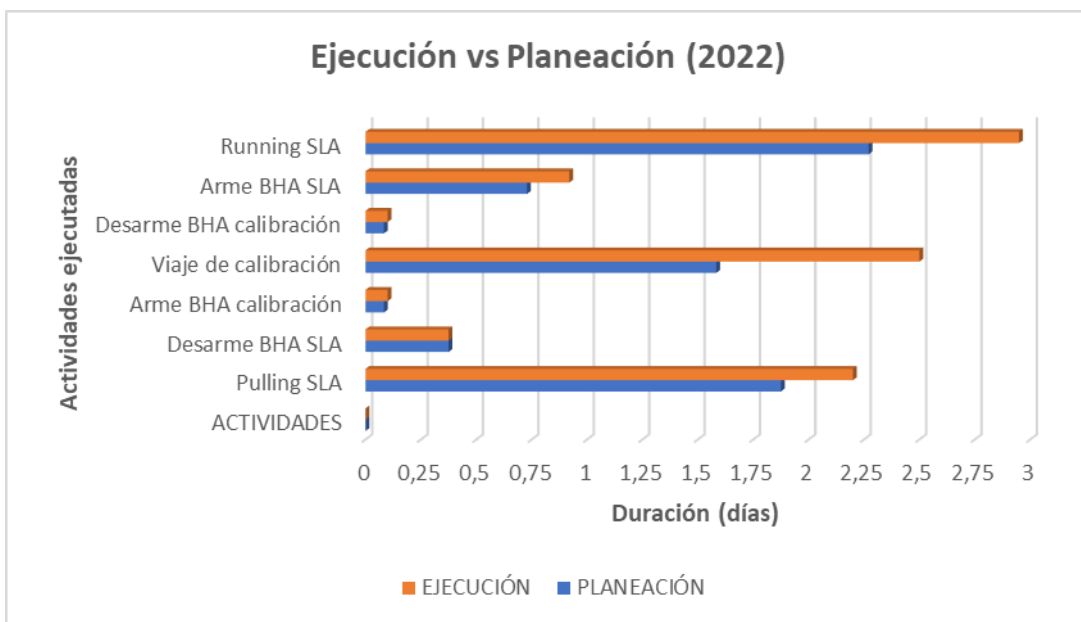


Gráfica 2. Costos promedio mes de intervenciones en pozos de Bombeo Mecánico y Bombeo Electrosumergible

Una vez evidenciado el incumplimiento de las metas establecidas en términos de tiempos y costos, se realizó un análisis de la duración de los tiempos de la operación discriminando por actividades para cada una de las intervenciones y segregando los pozos entre sistemas de levantamiento artificial (bombeo mecánico y bombeo electrosumergible). Esto permitió identificar que para ambos tipos de pozo, las operaciones con una duración en ejecución mayor a la planeada se presentan en las actividades relacionadas con pulling y running de tubería, tal como se puede observar en las gráficas No. 3 y No.4.



Gráfica 3. Comparación de tiempos planeados versus los ejecutados en pozos con Bombeo Mecánico



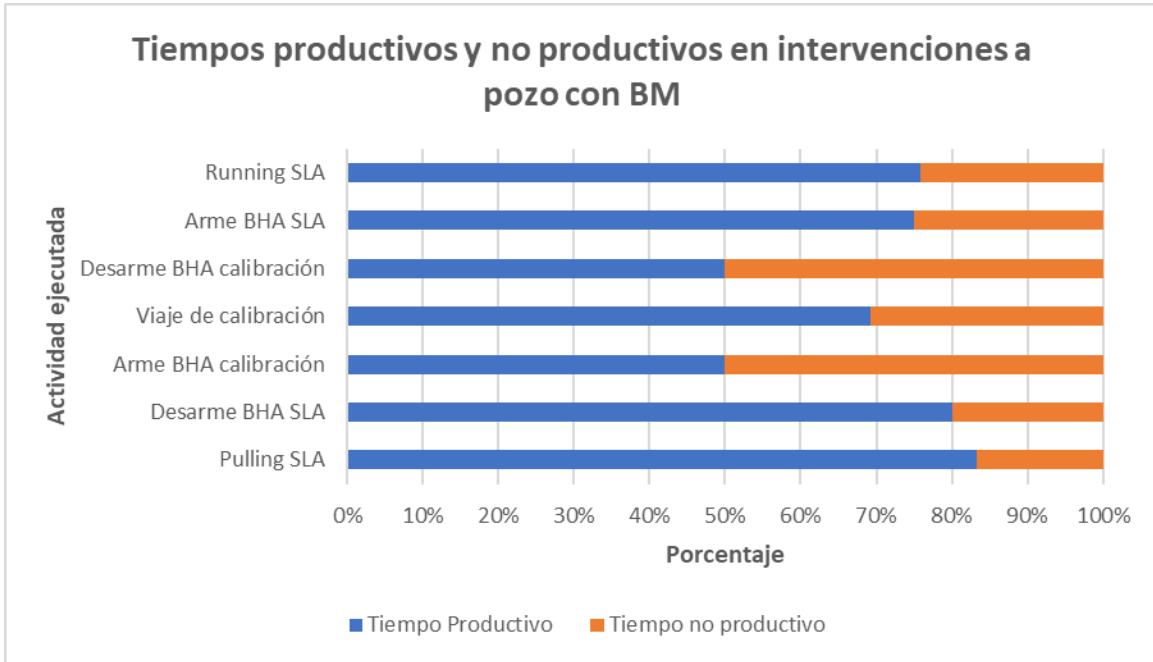
Gráfica 4. Comparación de tiempos planeados versus los ejecutados en pozos con Bombeo Electrosumergible

Sin embargo, al realizar un análisis a los datos consignados en los reportes diarios de operación, no se evidenció relación de tiempo operativos no productivos que pudieran estar generando esta diferencia entre la duración de las operaciones planeadas y ejecutadas.

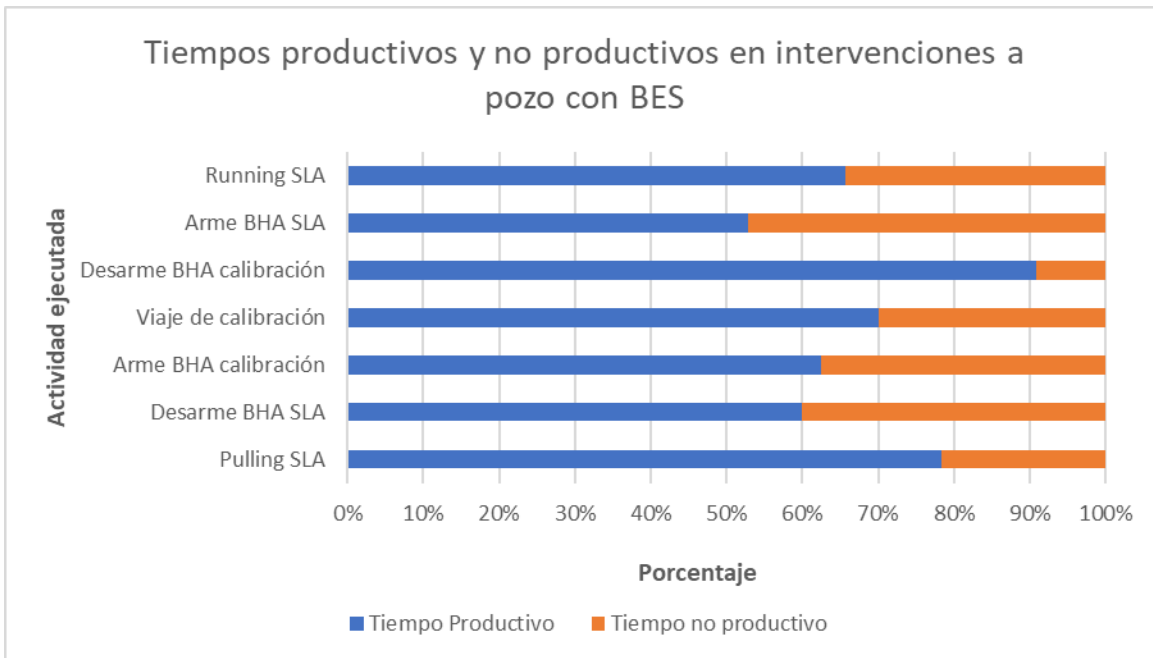
Adicionalmente se evidencia un incremento directamente proporcional de los costos con respecto a las operaciones en las que existe una mayor duración de ejecución. Dado esto se decide implementar un sistema de adquisición de datos que permita monitorear en tiempo real las variables más importantes durante una operación de intervención a pozo y las cuales son determinantes en el análisis de rendimiento y efectividad operativas en términos de tiempos y costos. Estas variables son:

- Velocidad de bloque viajero.
- Posición del bloque viajero
- Peso en el gancho.
- Presión.
- Caudal
- Torque.
- Profundidad.

Una vez implementado el sistema de adquisición de datos y teniendo una muestra de 8 pozos se realizó el análisis de la data obtenida como se puede observar en las gráficas No. 5 y No. 6, identificando que en todas las actividades ejecutadas existen tiempos no productivos sistemáticos que no son reportados y que en la muestra de pozos del año 2023 no eran visibles.



Gráfica 5. Identificación mediante adquisición y analítica de datos de tiempos productivos y no productivos durante las operaciones de intervención en pozos de BM

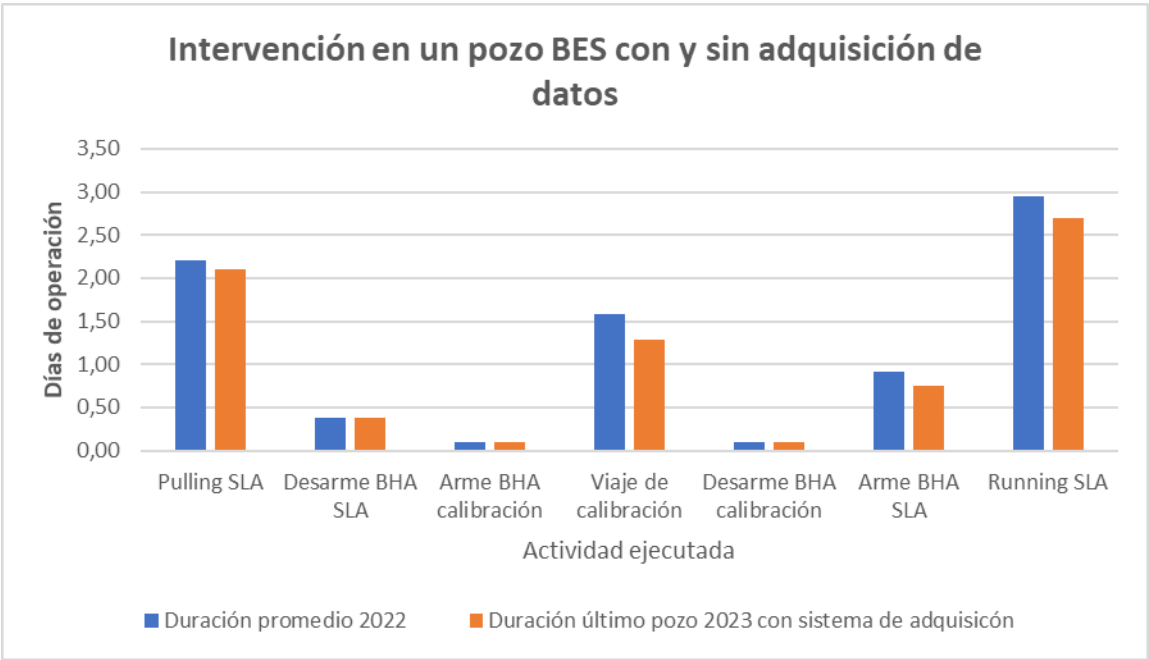


Gráfica 6. Identificación mediante adquisición y analítica de datos de tiempos productivos y no productivos durante las operaciones de intervención en pozos de BES

Al realizar el análisis específico de estos tiempos no productivos, se identifican las siguientes causas específicas:

- No cumplimiento de velocidades de corrida de tubería durante viajes con BHA de calibración y BHA de sistema de levantamiento artificial.
- Demora en toma de decisiones ante eventos operacionales.
- Tiempos perdidos por falla de equipos incluidos durante los tiempos de viaje de tubería.
- Terminación de turnos de trabajos de las cuadrillas de forma anticipada a la hora oficial de finalización.
- Condiciones meteorológicas y de entorno no anticipables.

A partir de este análisis en el pozo número 9 en el cual se cuenta con el sistema de adquisición de datos se realiza la implementación de un seguimiento estricto a las operaciones, identificando y notificando en tiempo real al personal del pozo sobre los rendimientos no esperados en las operaciones teniendo en cuenta las causas específicas identificadas en el estudio, logrando optimizar en un 10% el tiempo total de ejecución de la intervención en dicho pozo, como se puede observar en la gráfica No. 7.



Gráfica 7. Optimización de tiempos en operaciones de intervención en un pozo con equipo BES.

Conclusiones

La implementación de tecnologías avanzadas de adquisición de datos ha demostrado ser fundamental para optimizar los tiempos de intervención en pozos petroleros. La automatización de procesos y la disponibilidad de datos en tiempo real han llevado a una mejora significativa en la eficiencia operativa.

Los resultados obtenidos indican una reducción sustancial a futuro en los tiempos de intervención, gracias a la implementación de sistemas automatizados y la toma de decisiones basada en datos en tiempo real. Esto permite una respuesta más rápida a los desafíos operativos y una mayor eficacia en las operaciones de mantenimiento de pozos.

La adquisición continua de datos en tiempo real proporciona una base sólida para la toma de decisiones informada y precisa. La capacidad de monitorear constantemente el estado de los pozos permite identificar problemas potenciales antes de que se conviertan en situaciones críticas, mejorando así la confiabilidad y la seguridad operativa.

Este trabajo ha demostrado que la optimización de tiempos de intervención conduce a una utilización más eficiente de los recursos y una reducción significativa de los costos operativos. La implementación de tecnologías avanzadas permite realizar intervenciones planificadas de manera más efectiva, minimizando el tiempo de inactividad y optimizando el uso de personal y equipos.

El uso del sistema de adquisición de datos no se debe detener en la implementación inicial, sino que se deben buscar oportunidades para mejorar continuamente a través de la adopción de tecnologías emergentes. La integración de sensores más avanzados, análisis predictivo y soluciones basadas en inteligencia artificial se presenta como una ruta prometedora para seguir mejorando la eficiencia en el futuro.

La combinación de eficiencia operativa mejorada y reducción de costos tiene un impacto positivo en la rentabilidad de las operaciones petroleras. Además, la optimización de tiempos de intervención contribuye a la sostenibilidad a largo plazo al minimizar el impacto ambiental y garantizar la gestión eficiente de los recursos.

La implementación de esta tecnología en las operaciones de intervención a pozo sumado a otros métodos utilizados sirve como base para el desarrollo de un modelo replicable en la industria. Las lecciones aprendidas y las mejores prácticas que se identifiquen durante el

proceso pueden ser compartidas y aplicadas en diferentes contextos, brindando la oportunidad de mejorar la eficiencia en una variedad de operaciones en pozos petroleros.

Lista de referencias

Ramírez Soto, C.A.. (2021). *Mantenimiento de pozos petroleros*. Claudio Antonio Ramírez Soto. <https://claudioantonioramirezoto.com/construccion/mantenimiento-de-pozos-petroleros/>.

Ruiz Pozo, R. Gallegos Eras, A. (2019). Optimización del tiempo de proceso en el reacondicionamiento de pozos en un campo de la cuenca oriente ecuatoriana aplicando herramientas de mejoramiento continuo. *FIGEMPA Revista de Investigación y Desarrollo*, 8(2), 11-16.

<https://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/RevFIG/article/view/2054#:~:text=El%20reacondicionamiento%20de%20pozos%20es.menores%20a%20su%20valor%20%C3%B3ptimo.>

Spoerker, H.F. Doschek, M. (2005), Performance drilling onshore Iran – introducing new concepts to a mature area, Working Paper No. 91892, Society of Petroleum Engineer.

Ken, A. Stewart, M. (1987), *Surface Production Operation - Design of Oil Handling Systems and Facilities* (3° ed). Gulf Professional Publishing.

Fernández, M. (1996), *El control, fundamento de la gestión por procesos y la calidad total*. ESIC Editorial.

Grijalvo M., et al. (2002). La gestión por procesos y la mejora continua: nuevas expectativas abiertas por la ISO 9000 (Versión2000). *Revista de dirección, organización y administración de empresas*, 28, 5-11. http://www.cepade.es/Ademas/fr_pdf.asp?num=28&artic=1

Ledesma, F. (2015). *Análisis de costos para la toma de decisiones en la industria petrolera*. (Trabajo de investigación, Universidad Nacional de Cuyo). Biblioteca digital UNCUIYO. https://bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/7546/ledesma-facundo.pdf

Ecopetrol. (2022) *Informe de cumplimiento de Tiempos y Costos promedio de intervención en el Departamento de Producción Putumayo*. Información no publicada.

Ecopetrol. (2021) *Plan Anticorrupción y atención al ciudadano*.

Vallejo Culqui, K A. (2019). *Optimización de tiempos reacondicionamiento mediante la gestión por procesos y mejora continua*. Tesis de Maestría, Escuela Politécnica Nacional.

Valenzuela, R., Chavez, M., Landazuri, Y., & Ochoa, B. (2015). *La planeación de tiempos y costos con estrategia en la administración de proyectos*.

Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., & Anderson, R. E. (2019). *Multivariate Data Analysis* (8th ed.). Cengage Learning.

Field, A. (2013). *Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics* (4th ed.). SAGE Publications.

Bryman, A., & Cramer, D. (2011). *Quantitative Data Analysis with IBM SPSS 17, 18 & 19: A Guide for Social Scientists* (1st ed.). Routledge.

Tabachnick, B. G., & Fidell, L. S. (2013). *Using Multivariate Statistics* (6th ed.). Pearson.

Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2017). *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches* (4th ed.). SAGE Publications.

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación*. McGraw-Hill.

Arias, F. (2006). *El proyecto de investigación: Introducción a la metodología científica* (5ta ed.). Episteme.

Tamayo, y Tamayo, M. (2003). *El proceso de la investigación científica* (5ta ed.). Limusa.

Sabino, C. (1992). *El proceso de investigación* (4ta ed.). Panapo.

Valles, M. S. (2008). *Técnicas cualitativas de investigación social: Reflexión metodológica y práctica profesional* (6ta ed.). Síntesis.

Acosta, J., & Lira, J. (2009). *Optimización en la programación de intervenciones de pozos petroleros*. En Memorias del Congreso Internacional Petróleo y Gas, Maracaibo, Venezuela.

Villamizar, N., Gutiérrez, L., & Núñez, N. (2015). *Optimización de intervenciones en pozos petroleros con métodos heurísticos*. En Memorias del Congreso Latinoamericano de Control Automático, San José, Costa Rica.

Delgado, A., & Guerrero, M. (2017). *Modelo de optimización para la programación de intervenciones en pozos petroleros*. En Memorias del Congreso Internacional de Ingeniería Industrial, Lima, Perú.

Echeverría, F., & Sánchez, C. (2016). *Optimización de tiempos en la perforación de pozos petroleros utilizando algoritmos genéticos*. En Memorias del Congreso de Investigación y Desarrollo, Bogotá, Colombia.

López, E., & Fernández, G. (2013). *Optimización de tiempos en intervenciones de pozos petroleros con enfoque en la logística*. En Memorias del Congreso Internacional de Ingeniería Industrial, Medellín, Colombia.