

Piloto Reducción de Diferida por Fluctuaciones de Tensión Mediante Compensador Dinámico de Tensión en el Sector Petrolero

Álvaro Jacome, Laura Rodriguez

Ecopetrol, alvarojacome@ecopetrol.com.co, laurama.rodriguez@ecopetrol.com.co

Resumen

En el sector de petróleo y gas, las fluctuaciones de tensión en la red eléctrica pueden provocar paradas inesperadas en los sistemas de levantamiento artificial, afectando la producción de los pozos. En este trabajo, se presenta un piloto realizado en un pozo con sistema de levantamiento artificial tipo BES, donde se instaló un compensador dinámico de tensión que proporciona hasta un 40% de corrección en la magnitud de tensión para mitigar paradas no programadas.

Introducción

El aumento de los sistemas automatizados en la industria petrolera ha incrementado la sensibilidad operativa a los eventos eléctricos. Debido a la naturaleza de estos equipos, se requiere que el suministro eléctrico sea constante y de calidad, ya que cualquier variación en la frecuencia, tensión y forma de onda pueden afectar negativamente el rendimiento de los diferentes dispositivos electrónicos.

Las fluctuaciones de tensión en la red eléctrica son una de las principales causas de paradas repentinas en los sistemas de levantamiento artificial, lo que afecta negativamente la producción de los pozos y contribuye al aumento de diferida en el campo. Estas fluctuaciones pueden ser provocadas por la fuente externa, como el operador de red, o por causas internas en las instalaciones. Comúnmente, las fluctuaciones pueden ser ocasionadas por condiciones climáticas como tormentas

eléctricas, pero también pueden ser causadas por fauna, comunidad, e incluso el arranque de cargas significativas.

En la extracción de crudo generalmente se utilizan técnicas para elevar el fluido del reservorio hasta la superficie del pozo cuando la energía de este no es suficiente para la producción de petróleo con flujo natural. Uno de los métodos de levantamiento artificial son las bombas eléctricas sumergibles (BES), las cuales pueden ser utilizadas en pozos de más de 15000 pies y son capaces de manejar diferentes fluidos, como la mezcla de agua y petróleo.

Sin embargo, las BES son susceptibles a las variaciones de tensión debido a la naturaleza de su funcionamiento, pues están diseñadas para operar dentro de un rango específico de velocidades y condiciones de flujo. Al utilizar la bomba fuera de sus límites, la eficiencia hidráulica y eléctrica disminuye significativamente [1], lo que no solo reduce el rendimiento del sistema, sino también aumenta el riesgo de fallos mecánicos y fallos en el equipo. Este sistema de levantamiento tiene una tasa de falla de una vez cada tres años, relacionada con paradas no programadas a causa de la interrupción del suministro eléctrico.

Uno de los dispositivos comúnmente utilizados para ajustar la velocidad de giro del eje de la bomba son los variadores de velocidad (VSD), porque proporcionan una solución efectiva para la mejora de la eficiencia operativa y la reducción de costos energéticos hasta en un 60% [2]. Así mismo, contribuye a prolongar la vida útil del equipo al reducir el estrés mecánico y eléctrico durante el arranque y las paradas, minimizando la acumulación de arena en los impulsores [3].

En este trabajo se presenta un piloto que se llevó a cabo en un pozo que cuenta con sistema de levantamiento artificial tipo BES, ubicado a una profundidad total de 8,206 pies, mientras que la bomba se encuentra a una profundidad de alrededor de 5000 pies y cuenta con un motor de imanes permanentes (PMM). En este pozo se instaló un compensador dinámico de tensión, del cual el rendimiento será monitoreado durante seis meses y se espera que haya una reducción entre el 70% y 95% en los apagados causados por fluctuaciones de tensión. Se estima que el equipo optimizará el funcionamiento continuo del sistema BES, no solo mitigando la pérdida de producción, sino también disminuyendo los elevados costos asociados a los trabajos de mantenimiento en el subsuelo del pozo.

De manera preliminar, está proyectado que esta tecnología se pueda implementar en 12 pozos y sea económicamente viable.

Selección del pozo

La elección del pozo para llevar a cabo el piloto se basa en los antecedentes operativos ante las fluctuaciones de tensión de la zona. El pozo seleccionado se encuentra en una de las áreas que están más alejadas del punto de conexión con la red eléctrica del operador que ofrece el servicio en el lugar, lo que ha provocado una mayor vulnerabilidad ante las fluctuaciones de tensión.

En el año 2023 se presentaron un total de 26 fluctuaciones provenientes de la red externa que afectaron a los pozos de la zona. De estas 26 fluctuaciones, el pozo en selección salió de servicio 24 veces, lo cual representa un 92% de salidas ante este evento eléctrico en específico. Esta cifra es significativamente alta.

En este mismo escenario, se encontró que los pozos adyacentes o en la misma área de seguimiento tuvieron un 66% promedio de salidas de servicio. Estos datos ponen en manifiesto negativamente la operación del pozo ante las fluctuaciones de tensión.

Cabe resaltar que el pozo fue intervenido un poco antes de la implementación del piloto, lo cual también hace del pozo un buen candidato, dado que se encuentra en óptimas condiciones desde una vista general.

Características y funcionamiento del compensador dinámico de tensión

El compensador de tensión instalado en el skid del pozo es un dispositivo electrónico de potencia con sistema basado en inversores, que tiene como objetivo principal proteger cargas industriales que sean sensibles a perturbaciones eléctricas y proveer inmunidad ante eventos de calidad de energía. El hardware de este equipo es visualmente similar al de un variador.

Este equipo cuenta internamente con un transformador de inyección, un bypass, un inversor y un rectificador, que son los que se encargan de realizar la corrección de tensión, alcanzando hasta un 40%. El equipo activamente corrige fluctuaciones de tensión $\pm 10\%$ del valor nominal y elimina perturbaciones.

Además, no requiere baterías y su costo de mantenimiento es bajo. Tiene una vida útil de 20 años y su primer mantenimiento importante se realiza hasta el año 10.

De acuerdo con estas premisas, el equipo podría ser seleccionado para operar en más pozos de acuerdo con su rentabilidad. Se estima que se podría recuperar la inversión inicial en 3 años en relación a la diferida promedio del pozo.

Montaje y estado del sistema eléctrico

La configuración eléctrica de la alimentación y el control de velocidad del motor está compuesta por los siguientes elementos: en primer lugar, se encuentra la subestación eléctrica, seguida por el compensador de tensión, luego el variador de velocidad, el transformador elevador y finalmente, el motor.

La ubicación del compensador permite que cualquier fluctuación presentada en la subestación sea corregida antes de alimentar el variador de velocidad.

De acuerdo con el estado de los equipos, el variador de velocidad de este pozo ha recibido apropiadamente el mantenimiento preventivo y predictivo y ha sido operado dentro de sus parámetros de funcionamiento. Presenta una frecuencia promedio de funcionamiento de 47,43 Hz y cargabilidad promedio de 23,42% durante el último año.

En lo que respecta al motor, es un motor de imanes permanentes con una potencia y tensión nominal de 165 HP y 2585 V, respectivamente. Este motor se instaló en el último año.

Evaluación de calidad de la energía previo a la implementación del compensador dinámico de tensión

Se realizó una medición de calidad de energía previo a la instalación del equipo, en donde se presentó un evento que distorsionó mayormente la fase 3, con una caída de tensión del 10,5% e ilustrada en la figura 1.

Estos incidentes afectan la producción y el funcionamiento de los equipos, pese a que el suministro se restablezca rápidamente y recupere sus condiciones normales de onda.

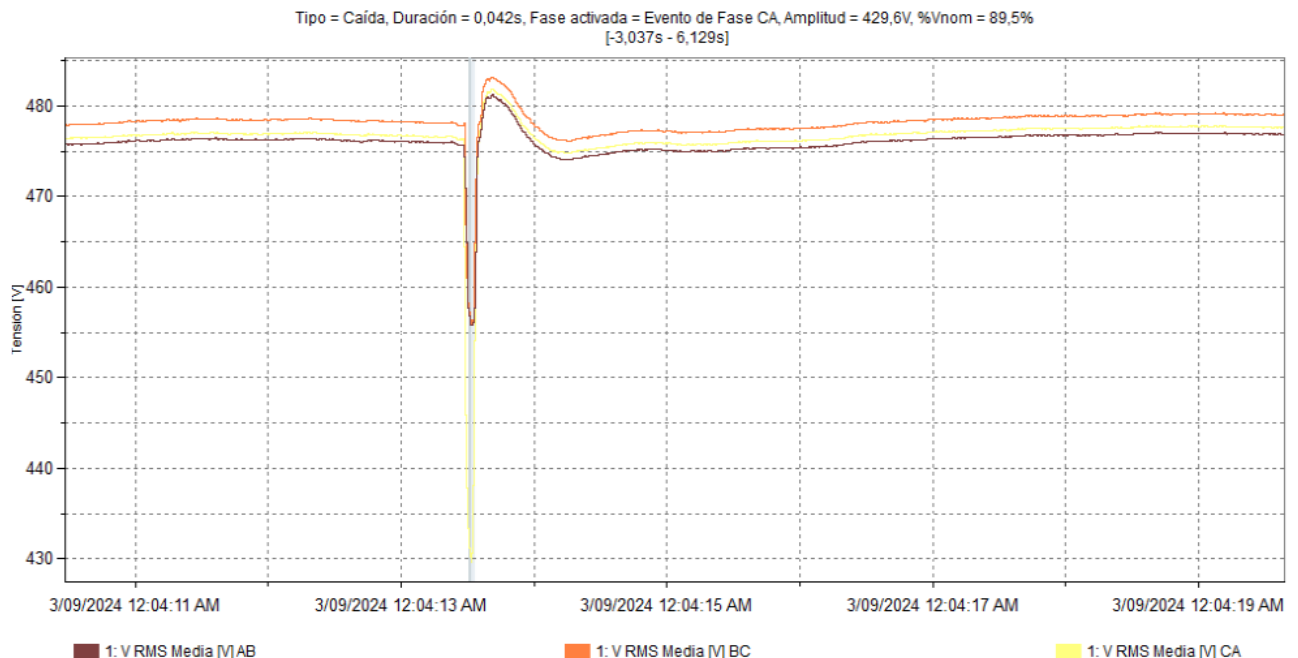


Figura 1. Evento perturbación de tensión

Evaluación calidad de energía posterior a la implementación del compensador dinámico de tensión

Se realizó una medición de calidad de energía posterior a la instalación del equipo para evaluar su desempeño. En la medición se situaron dos analizadores de red, uno en la subestación y otro en la entrada del variador, para poder contrastar el comportamiento de las ondas.

La figura 2 muestra la onda de tensión de la subestación y la figura 4 muestra la onda

de tensión del variador, en donde se puede evidenciar la efectividad de operación del compensador, que logró mitigar aumentos y caídas en la tensión.

En la figura 2 se muestra el pico de tensión de 506,58 V, un incremento del 5,53%, y una caída de tensión a 462,86 V, una disminución del 3,57%. En la figura 3 se muestra como el equipo es capaz de compensar hasta el 99,79%.

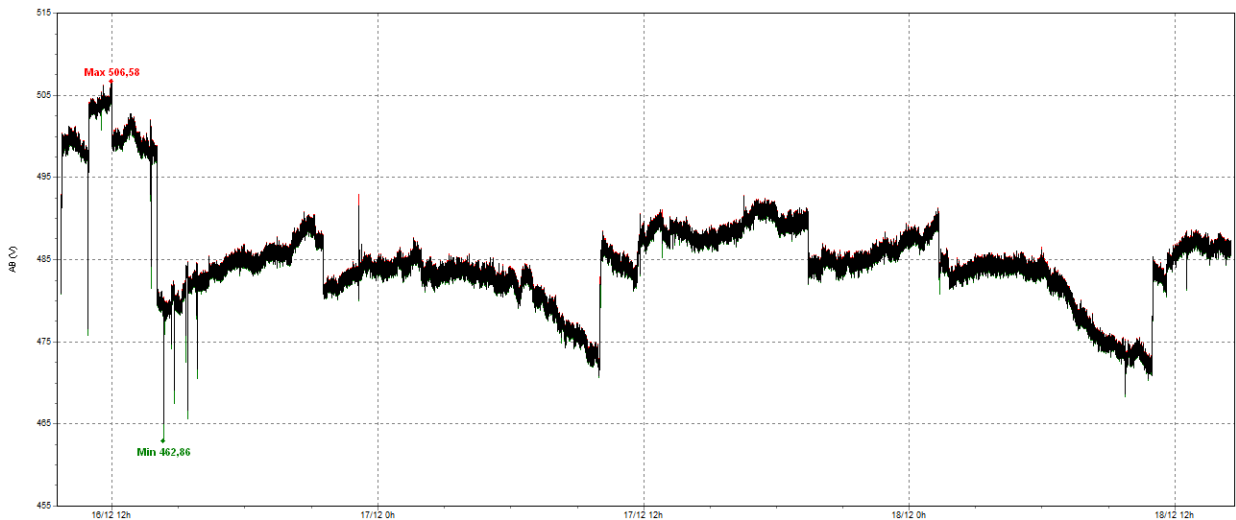


Figura 2. Comportamiento onda de tensión en la subestación

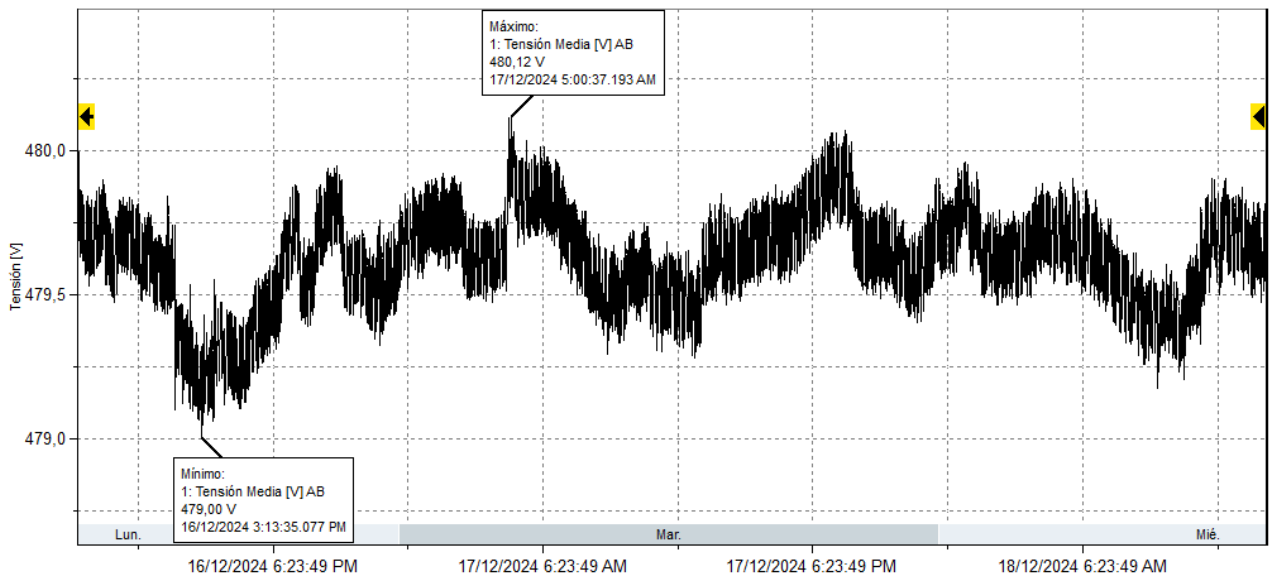


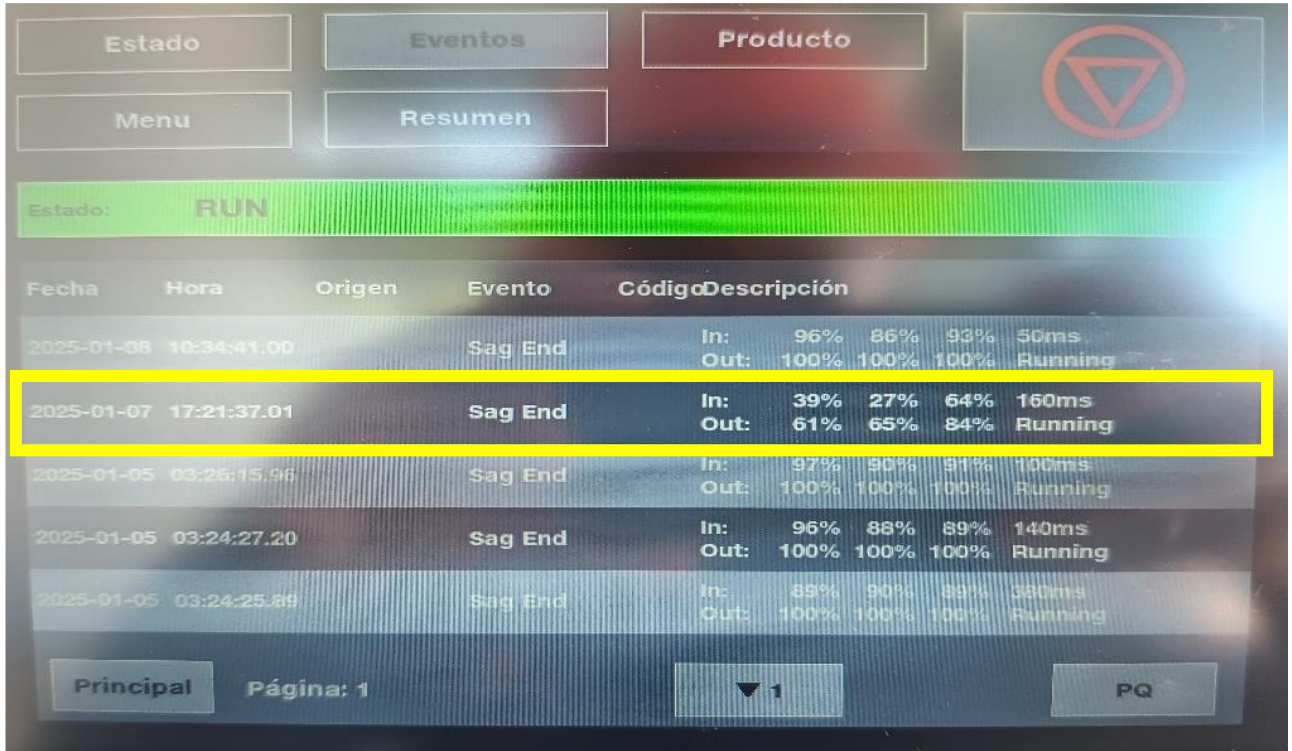
Figura 3. Comportamiento onda de tensión en el variador

Evaluación del comportamiento del compensador en eventos significativos de fluctuaciones de tensión

Dentro de la evaluación y el seguimiento del comportamiento del equipo, se presentó un evento de fluctuación de la red en media tensión que afectó la operación de los pozos productores, así como el funcionamiento de las plantas y estaciones.

Se realizó una inspección en el pozo seleccionado para evaluar el funcionamiento del equipo ante este evento y pudo examinar que el pozo continuó operando sin interrupciones.

Posteriormente, se revisaron los datos del compensador, donde se pudo determinar la duración del evento y el porcentaje de compensación, que se muestran en la figura 4.



Fecha	Hora	Origen	Evento	Código	Descripción
2025-01-08	10:34:41.00		Sag End	In: 96% Out: 100%	86% 93% 50ms 100% 100% 100% Running
2025-01-07	17:21:37.01		Sag End	In: 39% Out: 61%	27% 64% 160ms 65% 84% Running
2025-01-05	03:26:15.96		Sag End	In: 97% Out: 100%	90% 91% 100ms 100% 100% 100% Running
2025-01-05	03:24:27.20		Sag End	In: 96% Out: 100%	88% 89% 140ms 100% 100% 100% Running
2025-01-05	03:24:25.89		Sag End	In: 89% Out: 100%	90% 89% 380ms 100% 100% 100% Running

Figura 4. Interfaz HM del compensador dinámico de tensión.

El evento tuvo una duración de 160 ms y la fase que se encontró mayormente afectada fue la fase 2, que tuvo una caída de tensión de fase del 73,03%.

Conclusiones

Se ha evidenciado la efectividad del compensador, el cual ha sido capaz de compensar al 100% fluctuaciones mínimas de tensión. En situaciones más críticas, ha logrado mitigar el impacto de las fluctuaciones

permitiendo que el motor de la bomba electro sumergible siga en funcionamiento. Esto ha permitido mejorar la eficiencia operativa, ya que brinda una mayor confiabilidad del suministro de energía y consigo la estabilidad en la producción, además de contribuir en la vida útil de los equipos. Adicionalmente, se evidenció que el compensador reduce los armónicos generados en la cadena de suministro, lo que mejora la eficiencia energética.

REFERENCIAS

[1] G. Takacs, "How to improve poor system efficiencies of ESP installations controlled by surface chokes," *J Petrol Explor Prod Technol*, vol 1, pp. 89-97, Oct 2011.

[2] R. Saidur, S. Mekhilef, M.B. Ali, A. Safari, H.A. Mohammed, "Applications of variable speed drive (VSD) in electrical motors energy savings," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol 16, pp. 543-550, Jan 2012.

[3] C. Schmehl, M. McKinley, W. McBride, J. Kavanaugh, R. Paes, "Adjustable speed drive selection for electric submersible pumps," *2014 IEEE Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (PCIC)*, San Francisco, CA, USA, 2014, pp. 201-2026.

Alvaro Leonardo Jácome Perez ingeniero electricista de la Universidad Industrial de Santander, especialista en Gerencia de Mantenimiento y Gestión de Recursos Energéticos, magister en Administración de Empresas e Ingeniería de la Energía. Con treinta años de experiencia laboral, diez como aliado en Ecopetrol y 20 años como empleado directo. La mitad de su carrera profesional estuvo enfocada en el mantenimiento y cumplió el rol de coordinador, luego estuvo enfocado en ingeniería, en donde se desempeña como líder de confiabilidad eléctrica, líder de energía eléctrica y líder de la mesa de seguridad eléctrica de la Vicepresidencia Regional Central.

Laura Marcela Rodriguez Rico ingeniera electricista de la Universidad Industrial de Santander, recibió el título en el año 2025. Su interés de investigación incluye la confiabilidad eléctrica, el análisis de la calidad de la energía y la integración de energías renovables en la red.

Alvaro Leonardo Jácome
+57 317 3826875
Barrancabermeja
Refinería de Barrancabermeja, Bloque 2
alvarojacome@ecopetrol.com.co

Laura Marcela Rodriguez
+57 314 2385008
Barrancabermeja
Refinería de Barrancabermeja, Bloque 2
laurama.rodriguez@ecopetrol.com.co
laura.rdz.rollin@gmail.com