

Pulsos Sónicos como Metodología para Estimulación y Desarrollo de Pozos

LINO DEL CAMPO CASTAÑEDA

RESUMEN

El estado actual de la estimulación de pozos, ya sean de captación o de inyección de aguas, se basa en una combinación de principios físicos y químicos, como el brushing, pistoneo, jetting, airlift y/o adición de agentes químicos. Estas técnicas a menudo presentan eficiencias variables y requieren tiempos prolongados de ejecución, además de acarrear costosas acciones para mitigar su impacto ambiental. En este contexto, la utilización de generadores de pulsos sónicos para la estimulación de pozos, combinado con el bombeo por airlift y el uso de un sistema de doble packer cuando sea necesario, demuestra la posibilidad de superar estas limitaciones.

La generación de **pulsos sónicos** se logra mediante la liberación súbita de **gas a presión** en el interior del pozo y simultaneado con un bombeo por arfil. Esta combinación de dispositivos permite la aplicación simultánea de tres principios físicos. El generador de pulsos produce una **onda compresiva** focalizada de alta potencia, seguida de una **onda regresiva** debido al colapso de la burbuja de aire en el interior del pozo y la evacuación instantánea de partículas extraídas del conjunto de la capacidad a superficie mediante airlift. Este proceso resulta en la **agitación exhaustiva** de las zonas filtrantes, facilitando la eliminación de partículas que reducen la porosidad del lecho de grava y, en consecuencia, la eficiencia de captación.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el avance en el desarrollo y mejora de técnicas para la estimulación de pozos recién perforados o en servicio ha sido limitado. Esto se debe en parte a la falta de conciencia entre los usuarios sobre la importancia de una estimulación completa después de la perforación y a la falta de comprensión sobre cómo el rendimiento de las captaciones disminuye con el tiempo, resultando en mayores costos operativos.

Tampoco ha contribuido al cambio de mentalidad de los usuarios el hecho de que el enfoque de mantenimiento correctivo sea más común que el preventivo, ya que este último implica costos considerables y a menudo ofrece un retorno económico limitado en comparación con los métodos tradicionales de mantenimiento de las estructuras de captación.

Los usuarios de pozos y el mercado en general tienden a creer que la eficiencia y los ahorros potenciales se obtienen principalmente mediante mejoras en el sistema conjunto de bombas y equipos eléctricos. Sin embargo, según la experiencia de Fadelpo, estos beneficios suelen ser mucho menores que los logrados mediante un mantenimiento adecuado de las obras de captación.

En la actualidad, las técnicas de estimulación de pozos se basan en enfoques mecánicos, químicos o en una combinación de ambos. Los métodos mecánicos incluyen el cepillado, la inyección de agua a alta presión, la aplicación de aire comprimido, el uso de pistones, la inyección de CO2 líquido, el hielo seco, entre otros. Por otro lado, los enfoques químicos involucran la acidificación y el uso de dispersantes, entre otros. La implementación de estas técnicas conlleva la movilización de múltiples equipos y personal, además de requerir diversas acciones y materiales para mitigar los impactos ambientales y, en el caso de los métodos de acidificación conlleva riesgos de seguridad asociados. Estos trabajos suelen llevar varios días e incluso semanas, dependiendo de la profundidad del pozo y de la longitud del tramo filtrante. Esta duración tan prolongada en el tiempo no solo hace que las estimulaciones sean costosas, sino que también interrumpe el suministro del agua de la captación y en los casos, que no exista una fuente alternativa de suministro de agua, en algunos casos se hace imposible hacer los mantenimientos con los sistemas tradicionales.

En resumen, aunque se han desarrollado técnicas de estimulación de pozos, tanto mecánicas como químicas, la falta de comprensión sobre su importancia y los desafíos logísticos y ambientales asociados han limitado su adopción generalizada y efectiva en el sector.



Figura 1: Estado de las zonas filtrantes en captaciones.

OBJETIVOS

Con el propósito de aumentar la eficiencia en los procesos de estimulación de pozos y reducir los tiempos de ejecución, FADELPO ha desarrollado un procedimiento y un equipo específico de estimulación/desarrollo para llevarlo a cabo, denominado Unidad de Rehabilitación de Pozos (WRU, por sus siglas en inglés).

Generador Sónico:

El Generador Sónico es un dispositivo diseñado para liberar aire comprimido de forma repentina y controlada hasta una presión de trabajo de 350 bares en un lapso de 0.08 milisegundos. Esta liberación de aire se dirige perpendicularmente a las secciones filtrantes de la captación. La acción genera una onda expansiva de alta energía seguida de una onda regresiva. La magnitud de energía liberada se mide en equivalentes de TNT, que varían desde algunos gramos hasta medio kilogramo por pulso. La zona de impacto de cada pulso abarca aproximadamente 35 centímetros del tramo filtrante del pozo. Fadelpo dispone de varios tipos de generadores de pulsos estándar y tiene la capacidad de fabricar generadores adaptados a las condiciones y necesidades de cada pozo o proyecto.

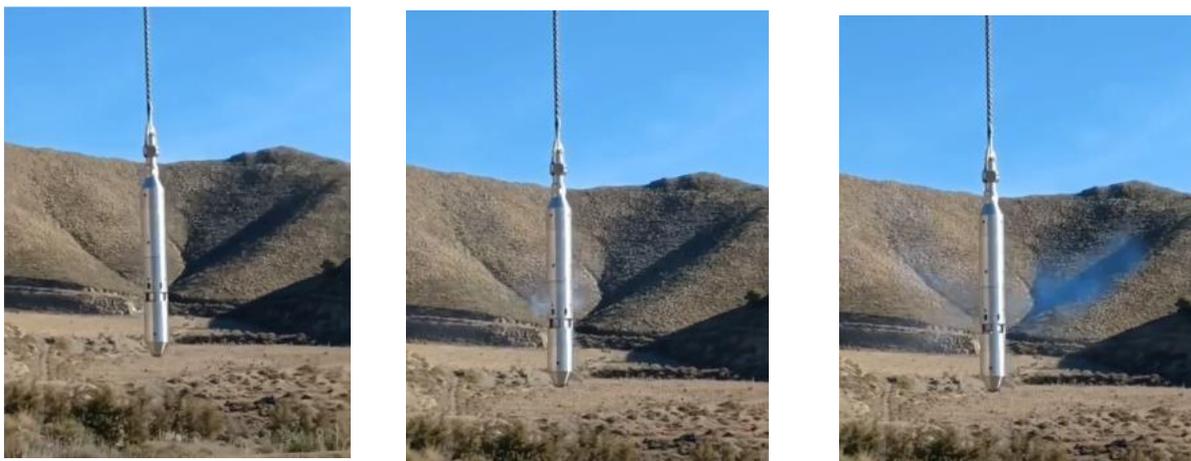


Figura 2: Ilustración de la secuencia de generación de la descarga de aire comprimido a 150 bares, mediante el generador de pulsos.

Proceso de Estimulación:

La energía liberada en la forma de onda expansiva, penetra la tubería ranurada y el empaque de gravas, llegando a adentrarse varios metros en la formación acuífera. La onda de choque de alta energía desprende cualquier partícula adherida a los filtros, al empaque de gravas y a la interfase con la formación acuífera. La subsiguiente onda regresiva, generada cuando la burbuja de aire colapsa en el interior del pozo, induce un flujo rápido hacia el interior del mismo, permitiendo que las partículas desprendidas fluyan al interior del pozo.

Este proceso de va-y-ven en la zona filtrante provoca una agitación intensa en el lecho de gravas, lo que facilita la ruptura y movilización de las partículas incrustadas o precipitadas que han reducido la permeabilidad original del filtro. También se logra remover lodos y finos que no fueron eliminados durante la limpieza inicial del pozo, sí como re-compactar el empaque de gravas.

Sistema de Airlift y Monitoreo:

El generador de pulsos se introduce y opera a través de la tubería de airlift. Simultáneamente, el material extraído, por el pulsado sónico de las zonas filtrantes se remueve a la superficie a través del sistema airlift, permitiendo un control eficiente del contenido sólido del agua. La tubería de airlift se coloca lo más cerca posible del intervalo de filtros a estimular, maximizando la succión de las partículas sólidas del intervalo de filtros. Después de estimular un filtro, se procede al siguiente intervalo y se repite el proceso. Durante este procedimiento, el agua que llega a la superficie disminuye su carga sólida y turbidez a medida que avanza el proceso. Se puede introducir una cámara de video en la tubería de airlift para visualizar el estado del tratamiento en el intervalo.



Figura 3: Muestra la introducción del generador en el interior de la tubería de airlift, junto con el cabezal de descarga y la extracción del material incrustado.

Casos Específicos y Químicos:

En situaciones particulares donde sea necesario aislar un tramo acuífero o trabajar con productos químicos, el extremo de la tubería de airlift está equipado con un sistema de doble packer que permite crear una ventana entre los dos empaques para realizar pulsos en esa zona. Al aislar esta región, si se requiere la utilización de químicos, la cantidad necesaria será mínima y solo afectará el tramo aislado.

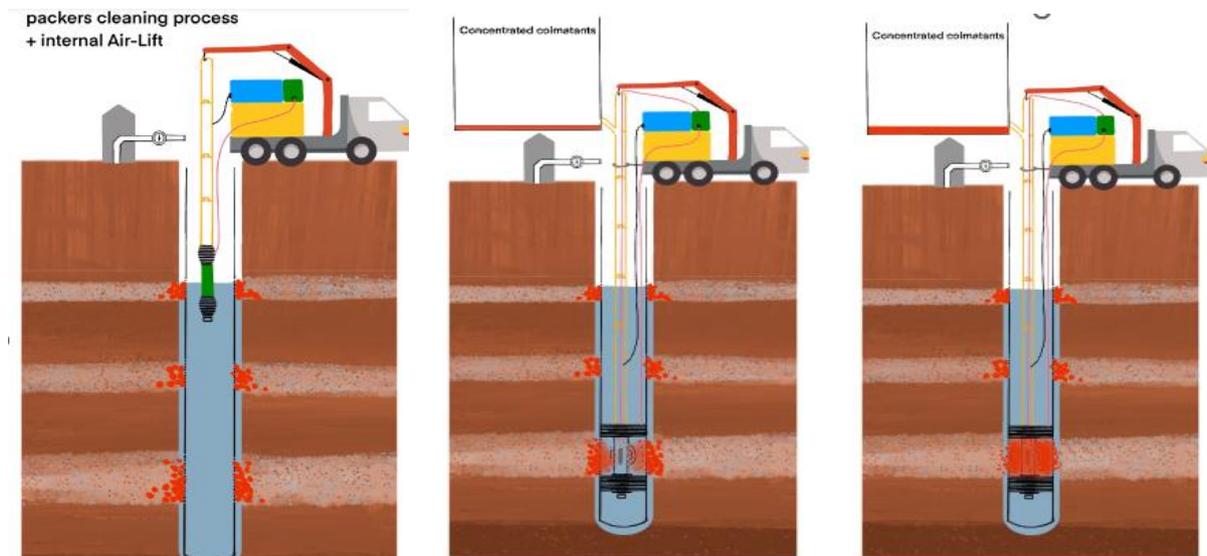


Figura 4: Secuencia de introducción, inflado y pulsado a través del doble packer.

Conjuntos de Equipos Involucrados en el Proceso

El proceso completo involucra la operación de dos conjuntos independientes de equipos, el WRU y el sistema de airlift detallados a continuación:

Unidad de Rehabilitación de Pozos (WRU):

1. Cabrestante de Maniobra del Generador de Pulsos:

- Capacidad de línea: 1500 metros.
- Asistido por motor eléctrico de 7.5 Kw, con variador de frecuencia.
- Capacidad de cambio de gama corta/larga.
- Velocidad de operación desde menos de 0.5 cm/seg hasta más de 3 mts/seg.
- Embrague con ajuste de deslizamiento según tensión.
- Caída libre controlada por freno hidráulico.
- Sistema de bloqueo mediante freno hidráulico.
- Control de enrollado con rodillo pisador ajustable.

- Profundidad controlada mediante encoder óptico, célula de carga (0-1000 kgs) para la tensión de la línea, parámetros eléctricos del motor y control y ajuste de las presiones del sistema neumático.
- 2. Panel de Control Neumático de Alta Presión:**
 - Utilizado para modular la presión de trabajo del generador de pulsos en un rango de 0 a 350 bares.
- 3. Sistema Compresor de Alta Presión y Cilindros de Acumulación:**
 - Capacidad: 48 m³/hora a 330 bares.
- 4. Elementos Auxiliares:**
 - Incluye herramientas específicas, iluminación, etc.
- 5. Generadores de Pulsos y Sistemas de Centrado Abatibles:**
 - Equipados con dispositivos para mantener la alineación adecuada durante la operación.
- 6. Sistema de Video Cámara Lateral/Frontal:**
 - Capacidad para inspección visual hasta 800 metros.



Figura 5: Panel de Control de presiones (izquierda) y Cabrestante de Operaciones (derecha).

Sistema de Air-Lift:

- 1. Cabezal de Superficie con Sistema de Elevación:**
 - Utilizado para el montaje y manipulación de la tubería.
- 2. Tubería de Air-Lift DN4:**
 - Utilizada para el bombeo neumático, API N80, 4" de diámetro libre interior, con puntas roscadas formando acoplamientos rápidos mediante doble cordón flexible.
- 3. Válvula de Insuflado:**
 - Regula la inyección de aire en el proceso de air-lift.
- 4. Centradores:**
 - Mantienen la tubería en la posición adecuada.
- 5. Carrete de Manguera para Inyección de Aire:**
 - 300 mts de manguera SAE100 R1. Utilizado para inyectar aire en el proceso de air-lift.
- 6. Rack de Superficie Alimentador para Tubería DN4:**
 - Organiza y suministra la tubería de air-lift. Asistencia completa en el montaje y desmontaje de la tubería.

7. Manguerote de Descarga de 5":

- Utilizado para la conducción del flujo de agua bombeado fuera de la instalación del pozo al ciclón final de línea.

8. Ciclón Tranquilizador y Vertedero en V para Toma de Muestras:

- Utilizados para controlar el flujo y tomar muestras del proceso.

9. Sistema Doble Packer:

- Permite el aislamiento de zonas específicas del pozo para trabajos particulares, como inyección de químicos.

RESULTADOS

Se ha configurado todo el equipo de superficie, herramientas y recursos según el procedimiento descrito. Tanto adaptando herramientas ya existentes como diseñando y fabricando nuevas para asegurar la máxima eficiencia del procedimiento. El tiempo necesario para llevar a cabo el proceso es de uno o dos días, dependiendo de la profundidad y el estado del sistema filtrante. Importante es que este proceso no afecta en absoluto la estructura e instalación superficial del pozo, utilizando la misma grúa que desinstala la bomba para llevar a cabo el proceso.

Los resultados obtenidos por FADELPO utilizando este sistema han demostrado en todos los casos incremento de caudal superiores al 30% así como un incremento significativo en el nivel dinámico del pozo y en algunos casos variaciones positivas del nivel estático.

Ejemplos de Resultados:

Antes: Caudal 12 m³/h



Después: Caudal 45.0 m³/h



Antes: Caudal 21.0 m³/h



Después: Caudal 65.0 m³/h



Antes: Caudal 20.0 m³/h



Después: Caudal 33.0 m³/h



Figura 6: Resultados del antes y después de la estimulación por pulsos sónicos.

Esta tecnología ha demostrado su eficacia tanto en el mantenimiento de pozos existentes, como en pozos recién perforados. Por ejemplo, en un pozo recién perforado con filtros a 700 metros de profundidad, tras una estimulación tradicional de 7 días consecutivos, se logró un caudal de 77 m³/h. Tras esta etapa, se aplicó el proceso de pulsos sónicos durante 7 horas en la longitud de los filtros, resultando en un caudal de 108 m³/h.



Figura 7: Estimulación con pulso sónico (derecha)expulsa gran cantidad de partículas que la estimulación tradicional no pudo (izquierda).

Se ha comprobado que esta tecnología ofrece una durabilidad de la limpieza aproximadamente cuatro veces mayor en comparación con sistemas tradicionales. Debido fundamentalmente a que la limpieza es profunda y afecta a la rejilla, el empaque de gravas, la interfaz de la formación con el taladro y a la propia formación, dentro de un radio de afección variable, que dependerá de las propias características hidráulicas de la formación litológica.

Se ha demostrado la eficacia de este sistema incluso en casos de tuberías con fuertes incrustaciones, como se ilustra en la Figura 8.



Figura 8: Antes y después de la aplicación de pulsos sónicos en una tubería de 600mm con incrustaciones de carbonato cálcico con un grosor de 9cm.

Este enfoque también se ha aplicado con éxito a drenajes sub-verticales de captación, logrando incrementos de caudal superiores al 200%, como se ve en la figura 9.



Figura 9: Efecto de la aplicación de pulsos en drenes sub-verticales en el interior de un túnel.

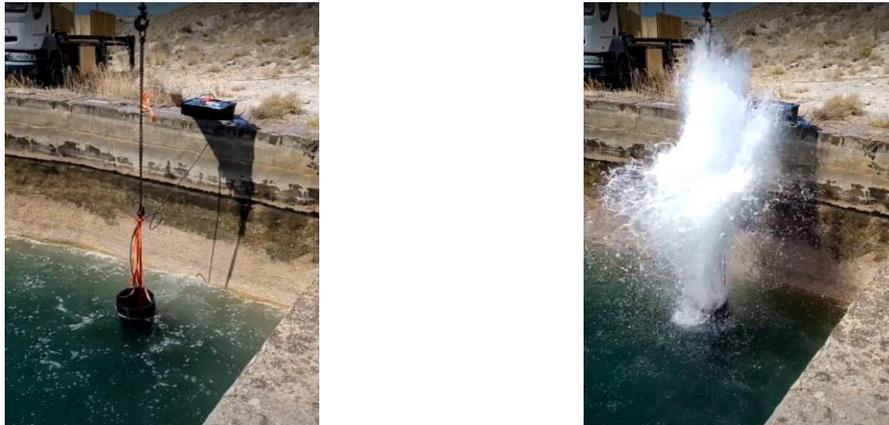


Figura 10: Demostración del pulsado en tubería abierta.

Conclusiones

Este sistema de pulsos, integrado con la técnica de airlift, ha demostrado una eficiencia superior a las técnicas existentes, con reducción muy significativa en los tiempos de intervención, no afección a la instalación de superficie y una mayor durabilidad en los efectos de limpieza. La manipulación del caudal bombeado con abundante carga sólida se simplifica, y se minimiza la necesidad de utilizar productos químicos, lo que a su vez reduce los costos operativos.

En resumen, este enfoque innovador ha demostrado ser altamente eficiente y rentable, con resultados notables en términos de mejora de caudal (eficiencia del sistema filtrante), así como una mayor durabilidad de la limpieza frente a métodos tradicionales, que son más costosos y con mayor tiempo de aplicación.