

Terminaciones inteligentes modulares

Kevin Beveridge
Clamart, Francia

Joseph A. Eck
Rosharon, Texas, EUA

Gordon Goh
Kuala Lumpur, Malasia

Ronaldo G. Izetti
Petrobras
Rio de Janeiro, Brasil

Maharon B. Jadid
Willem Ruys Sablerolle
PETRONAS
Kuala Lumpur, Malasia

Gabriela Scamparini
Ravenna, Italia

Las ventajas de las terminaciones inteligentes están demostradas; sin embargo, la percepción que se tiene de sus altos costos iniciales de diseño, instalación y mantenimiento, las mantienen excluidas de los planes de desarrollo de muchos operadores. Es probable que una nueva propuesta modifique esta percepción; estos sistemas modulares más pequeños, disminuyen los costos pero mantienen todas las ventajas de los sistemas de alto nivel más grandes y más complejos.

Los sistemas de pozos inteligentes fueron concebidos originalmente como respuesta a los costos extremos asociados con ciertas operaciones de intervención de pozos en áreas críticas o remotas, especialmente en aguas profundas y ultra profundas. Los costos de las reparaciones de pozos, reterminaciones e incluso algunos tipos de mantenimientos básicos en pozos ubicados en tirantes de agua (profundidad del lecho marino)

de más de 150 m [500 pies] son a menudo prohibitivos debido a que estas operaciones sólo pueden llevarse a cabo desde plataformas flotantes.

Como el costo de alquiler y traslado de estas embarcaciones es elevado, y los trabajos de reparación de pozos submarinos generalmente son a largo plazo, los operadores se resisten a contratar un equipo de aguas profundas para una simple operación de reparación o reterminación de pozo que

Traducción del artículo publicado en *Oilfield Review*, Otoño de 2011: 23, no. 3.

Copyright © 2012 Schlumberger.

Por la colaboración en la elaboración de este artículo, agradecemos a Claire Bullen y David Núñez, Houston; y Farid Hamida, Rosharon, Texas.

IntelliZone Compact, UniConn y WellBuilder son marcas de Schlumberger.

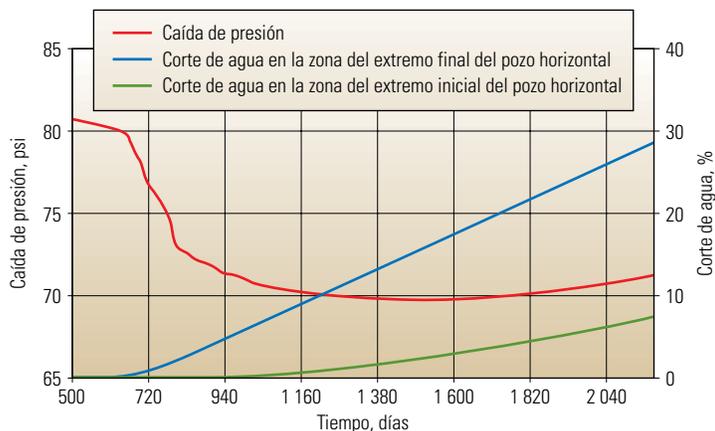
1. Para mayor información acerca de las terminaciones inteligentes: Algeroy J, Morris AJ, Stracke M, Auzeais F, Bryant I, Raghuraman B, Rathnasingham R, Davies J, Gai H, Johannessen O, Malde O, Toekje J y Newberry P: "Control remoto de yacimientos," *Oilfield Review* 11, no. 3 (Otoño de 1999): 18–29.

Dyer S, El-Khazindar Y, Reyes A, Huber M, Raw I y Reed D: "Terminaciones inteligentes: Manejo automatizado de pozos," *Oilfield Review* 19, no. 4 (Primavera de 2008): 4–17.

2. Aggrey GH, Davies DR y Skarsholt LT: "A Novel Approach of Detecting Water Influx Time in Multizone and Multilateral Completions Using Real-Time Downhole Pressure Data," artículo SPE 105374, presentado en la Exhibición y Conferencia de Petróleo y Gas de Medio Oriente de la SPE, Manama, Bahrain, 11 al 14 de marzo de 2007.

Aggrey G y Davies D: "Real-Time Water Detection and Flow Rate Tracking in Vertical and Deviated Intelligent Wells with Pressure Sensors," artículo SPE 113889, presentado en la Conferencia y Exhibición Anual de la SPE Europe/EAGE, Roma, 9 al 12 de junio de 2008.

3. Sakowski SA, Anderson A y Furui K: "Impact of Intelligent Well Systems on Total Economics of Field Developments," artículo SPE 94672, presentado en el Simposio de Evaluación y Rentabilidad de Hidrocarburos de la SPE, Dallas, 3 al 5 de abril de 2005.



▲ Detección de invasión de agua utilizando sensores de fondo de pozo. Debido a que el influjo de agua en una determinada zona produce una reducción de la tasa de producción en la misma, los regímenes aumentarán en las otras zonas para asegurar que el pozo alcance las restricciones totales establecidas por el operador, tales como tasas de producción de líquidos o presión de cabezal de tubería de producción. Este cambio se manifiesta en un correspondiente aumento o disminución de la caída de presión entre zonas. En este escenario de producción, alrededor del día 700, el avance del agua en el extremo final (azul) de un pozo horizontal de dos zonas creó un descenso brusco en la caída de presión (rojo) entre esa zona y el sensor ubicado en el extremo inicial del pozo horizontal. A medida que aumentaba la producción de agua desde el extremo inicial del pozo horizontal, alrededor del día 1 160 (verde), la caída de presión comenzó a descender más lentamente. Alrededor del día 1 700, con el aumento de producción de agua desde el extremo inicial del pozo horizontal, la caída de presión aumentó. (Adaptado de Aggrey et al, 2008, referencia 2.)



no promete retornos de inversión significativos. Además, como a menudo éstos son pozos de altas tasas de producción, el costo de la producción perdida durante el cierre puede ser una consideración crítica cuando el operador analiza los beneficios de una intervención. Considerados en conjunto, estos factores a menudo hacen que los operadores pospongan las intervenciones necesarias. Tales demoras pueden disminuir el régimen de producción durante un período prolongado, causar daños permanentes a la productividad del yacimiento y reducir la producción total estimada, todo lo cual repercute en la rentabilidad total del campo.

Una terminación inteligente (IC) puede ofrecer una alternativa a las intervenciones. Las terminaciones inteligentes incluyen sensores de fondo de pozo que permiten a los operadores obtener datos de flujo y del yacimiento de forma remota. Están equipadas con válvulas de control de flujo de fondo de pozo accionadas en forma remota (FCV) con las cuales los operadores pueden regular el flujo de cada zona de producción en forma individual.¹

Los sensores remotos eliminan la necesidad de las intervenciones más frecuentes en pozos de múltiples zonas: identificar la ubicación de los problemas que inhiben la producción, tales como las entradas de agua, gas o arena. Los sensores que miden cambios de producción, temperatura y presión a profundidades específicas en el pozo

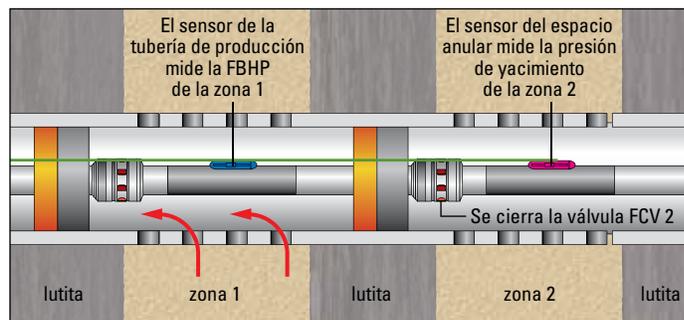
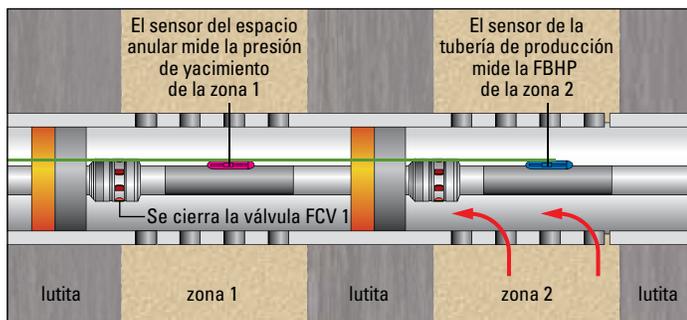
permiten a los ingenieros determinar en tiempo real qué zona está teniendo una disminución de producción o presión, sin los costos ni riesgos de una intervención ([página anterior](#)).

Una vez que los ingenieros identifican la fuente del problema, pueden cerrar, incrementar o disminuir el flujo de cualquier zona utilizando las válvulas FCV ubicadas a través de cada intervalo de producción y reconfigurar la terminación.² Esto puede ser especialmente rentable cuando los cambios iniciales a las configuraciones de las válvulas FVC pueden reajustarse en base a mediciones obtenidas durante un período de flujo posterior a la operación de remediación inicial.

Cuando las terminaciones inteligentes fueron introducidas por primera vez, las compañías se resistieron a instalarlas. Los ingenieros cuestionaban, con cierta razón, la confiabilidad de los componentes críticos de los sistemas durante la vida útil del pozo. Los operadores eran además cuidadosos en cuanto a las erogaciones de capital (capex) de las terminaciones inteligentes, las cuales han sido tradicionalmente más costosas que las terminaciones convencionales. Como resultado, los análisis económicos y de riesgos, generalmente favorecen a las terminaciones estándar con respecto a las terminaciones inteligentes, excepto en áreas remotas o para terminaciones submarinas.

Las mejoras en los componentes y sistemas y los años de uso de las terminaciones inteligentes han hecho mucho por superar las dudas sobre la confiabilidad de las mismas. Sin embargo, debido a que su diseño e implementación son complejos, las terminaciones inteligentes se mantienen relativamente costosas. Por lo tanto, su utilización está limitada principalmente a ambientes remotos y a pozos con regímenes de producción muy altos, para los cuales el costo de intervención y demora de producción es extremo.

Más recientemente, se han tornado más atractivas a medida que los ingenieros han aprendido a utilizar las terminaciones inteligentes como herramientas efectivas de control de yacimiento. Las terminaciones de múltiples zonas, inyecciones de agua, levantamiento artificial por gas y otros sistemas, se optimizan más fácilmente mediante monitoreo y control de fondo de pozo en forma remota, que mediante intervenciones. En muchos casos, el retorno de la inversión en las terminaciones inteligentes, mediante el flujo de fondos acelerado y un aumento en la producción total estimada, supera ampliamente los ahorros obtenidos al evitar intervenciones. Un operador de envergadura ha calculado que el 5% del impacto económico total de las terminaciones inteligentes en su negocio se debe al ahorro en intervenciones, mientras que el 60% se debe a incrementos en las ganancias relacionadas con el yacimiento.³



^ Presión de yacimiento y presión dinámica de fondo de pozo (FBHP) a partir del monitoreo y el control en forma remota. En una terminación inteligente de múltiples zonas, cada zona se encuentra aislada, monitoreada y controlada. La presión dinámica de fondo de pozo puede medirse como flujo desde la zona 2 solamente (flechas rojas) cerrando la válvula FCV de la zona 1 (*izquierda*), mientras se mide el incremento de presión de yacimiento en la zona 1 cerrada. Cerrando la válvula FCV en la zona 2 y abriéndola en la zona 1 (*derecha*), se puede determinar la presión de yacimiento en la zona 2 y la presión dinámica de fondo del pozo en la zona 1. Este principio puede aplicarse para cualquier número de zonas aisladas.

Los ingenieros descubrieron además que las terminaciones inteligentes pueden ser esenciales para la reducción de la cantidad de pozos necesarios para la explotación de una formación. Las reducciones en cantidad de pozos, frecuencia de intervenciones y demoras en la producción asociadas con las intervenciones, pueden ahorrarles a los operadores millones de dólares en los costos de desarrollo del campo, especialmente en aguas profundas.⁴ La menor cantidad de pozos implica además menos equipo submarino y por lo tanto una reducción substancial en las erogaciones de capital. Además, las unidades de procesamiento de gas y agua que se utilizan en las terminaciones inteligentes, pueden ser más pequeñas ya que el exceso de producción de agua y gas puede eliminarse o reducirse en el fondo del pozo en lugar de ser tratado en superficie. El aislamiento zonal y la optimización de la presión entre zonas dan como resultado regímenes superiores del flujo mezclado en el pozo. La consecuencia es un incremento neto en la producción y la recuperación total.

Con las válvulas FCV controladas desde la superficie, es posible además medir periódicamente la presión del yacimiento y la presión dinámica de fondo del pozo (FBHP) sin tener que correr registros de producción. Esto se logra cerrando primero una zona, para permitir que el sensor de presión de fondo de pozo que se encuentra frente a la formación pueda comenzar a registrar la presión del espacio anular o la presión del yacimiento. Al mismo tiempo, un sensor ubicado en una segunda zona totalmente abierta mide la FBHP para esa zona en particular.

Cuando se cierra la segunda zona y se abre la primera, el sensor frente a la formación mide la presión de yacimiento de la segunda zona y la FBHP de la primera zona (*arriba*). Esta técnica, que puede aplicarse a varios intervalos productores a la vez, permite a los operadores obtener un perfil de presión de fondo de pozo de cualquiera

de las zonas en cualquier momento, sin incurrir en demoras excesivas en la producción para registrar el incremento de presión y evitar además la exposición a los riesgos asociados con las intervenciones. Esta técnica de aislamiento de zonas permite además a los ingenieros obtener datos de incremento de presión de formación y un perfil de caída de presión para las actualizaciones y cambios del índice de productividad (PI) a lo largo de la vida del pozo.⁵

A pesar de su confiabilidad demostrada y de un nicho definido más ampliamente para las terminaciones inteligentes, y debido a que la intención original de los desarrolladores fue utilizar las terminaciones inteligentes en pozos de regímenes relativamente altos, la rentabilidad de los campos de niveles medio y bajo son tales que los operadores continúan utilizando las estrategias de terminación tradicionales en lugar de tomar el riesgo de erogación de capital asociado con una terminación inteligente. Se pretendió además que las terminaciones inteligentes fueran lo suficientemente robustas como para impedir las intervenciones a lo largo de la vida del pozo, generalmente más de 20 años, ya que una única intervención en agua profunda u otra área remota podría frustrar fácilmente cualquier ventaja económica prevista a partir de una terminación inteligente.

Este objetivo de diseño dio como resultado terminaciones inteligentes que eran necesariamente grandes, complicadas y costosas. Además, con el tiempo, como los proveedores de la industria solicitaron incrementar la confiabilidad y flexibilidad de las terminaciones inteligentes, la tecnología evolucionó gradualmente. Los operadores que procuran las mejores soluciones a menudo tienen que combinar componentes de muchos proveedores en una misma configuración de terminación. Esto generó problemas de interfaces que aumentaron los riesgos de falla de los equipamientos, el tiempo de equipo de termina-

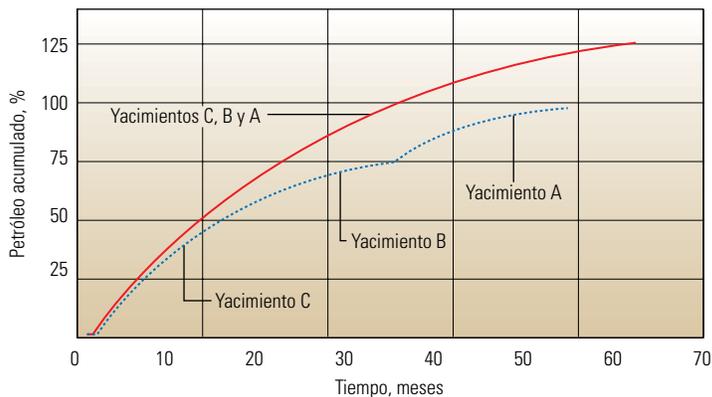
ción y los costos para montar, probar e instalar las terminaciones.

Todos estos factores han conspirado para perpetuar la imagen de los pozos equipados con monitoreo y control en forma remota como grandes erogaciones de capital inicial justificables únicamente en los casos de altos volúmenes de producción, complejidad o localizaciones de pozos donde las intervenciones tengan costos prohibitivos o sean tecnológicamente complicadas. Este artículo describe los esfuerzos reorientados que dieron origen a un sistema de terminación inteligente menos complejo. Su diseño reduce su costo, lo cual permite a los operadores de pozos promedios a marginales aprovechar los beneficios del control de yacimiento de las terminaciones inteligentes antes restringidos casi exclusivamente para las aplicaciones de alto costo o alto riesgo.

El valor de la flexibilidad

Cuando los operadores planean pozos en aguas profundas u otras localizaciones aisladas, puede resultar evidente que evitar una sola intervención permita ahorrar lo suficiente en costos operativos como para justificar la erogación de capital asociada con una terminación inteligente tradicional. Por otro lado, un pozo en tierra, de una única zona, ubicado en un área que tiene una buena cantidad de equipos de terminación es probable que nunca justifique el costo de una terminación inteligente, incluso si esto permitiera al operador evitar múltiples intervenciones.

Durante el análisis de escenarios que se encuentren entre esos dos extremos, por ejemplo terminaciones de múltiples zonas en pozos terrestres, el análisis de costos puede no ser tan evidente. Cerrar la producción de una zona y abrir otra mediante una operación de reterminación o cambiando de posición la camisa deslizante son opciones de costo relativamente bajo incorporadas a la rentabilidad original de los pozos de múltiples zonas.



^ Comparación entre producción mezclada y secuencial. Los beneficios de una estrategia de producción mezclada con respecto a una estrategia de producción secuencial, quedan demostrados en las curvas de producción de un operador del Golfo de México. En este pozo se instalaron dos válvulas FCV para controlar las zonas productivas superior e inferior. El operador utilizó controles de cierre y apertura para aislar la producción de una zona cuando su corte de agua ponía en peligro la producción neta; el resultado fue un incremento de aproximadamente un 28% con respecto a las estimaciones de la producción secuencial.

Sin embargo, tales estrategias necesitan que la primera zona se agote antes de abrir la próxima. Los análisis de yacimiento indican que ajustando remotamente las válvulas FCV de fondo de pozo para mezclar zonas en base a los datos de presión y temperatura obtenidos en tiempo real, se consigue acelerar significativamente la producción e incrementar la producción total estimada en comparación con las configuraciones tradicionales de terminaciones de múltiples zonas de tipo cierre y apertura (arriba).

Esta ventaja no siempre resulta evidente debido a que los modelos tradicionales de flujo de fondos descontado, utilizados por la mayoría de los operadores no permiten cuantificar el valor derivado de la flexibilidad operacional.⁴ Esta flexi-

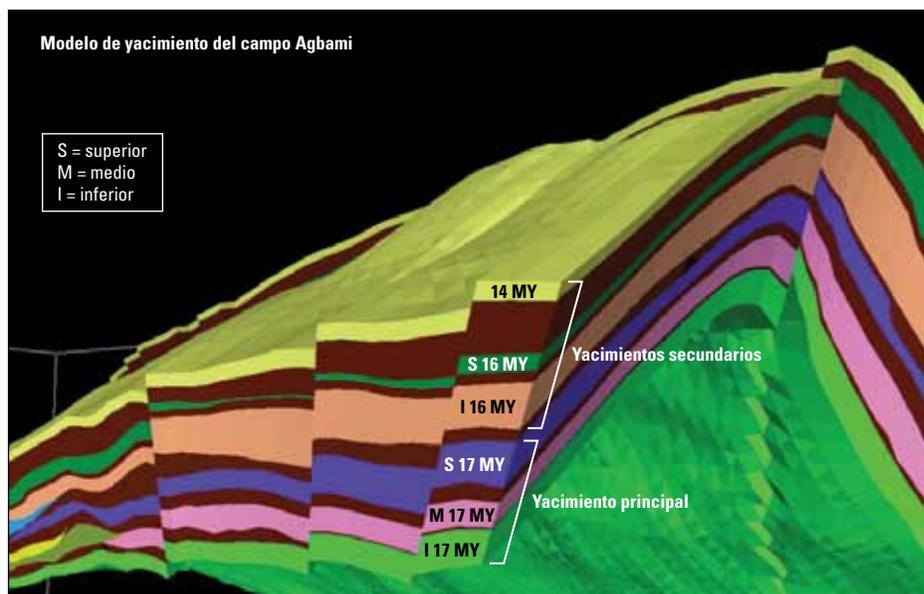
bilidad depende de la disponibilidad de numerosas opciones con las cuales mitigar los problemas del pozo durante su vida útil. Tener la capacidad de controlar de forma remota las condiciones de fondo de pozo y ajustar el flujo de las distintas zonas en tiempo real, aumenta la cantidad de opciones disponibles para el operador, lo cual elimina la carga económica de las intervenciones con equipos de terminación de pozos.

El monitoreo y control en forma remota es una herramienta especialmente poderosa para reducir la incertidumbre acerca de las propiedades del yacimiento. Por ejemplo, como sucede en muchos de los desarrollos de aguas profundas, el operador del campo Agbami en el área marina de Nigeria no tenía datos de yacimiento relevantes sobre los cuales desarrollar los planes de los pozos.⁷

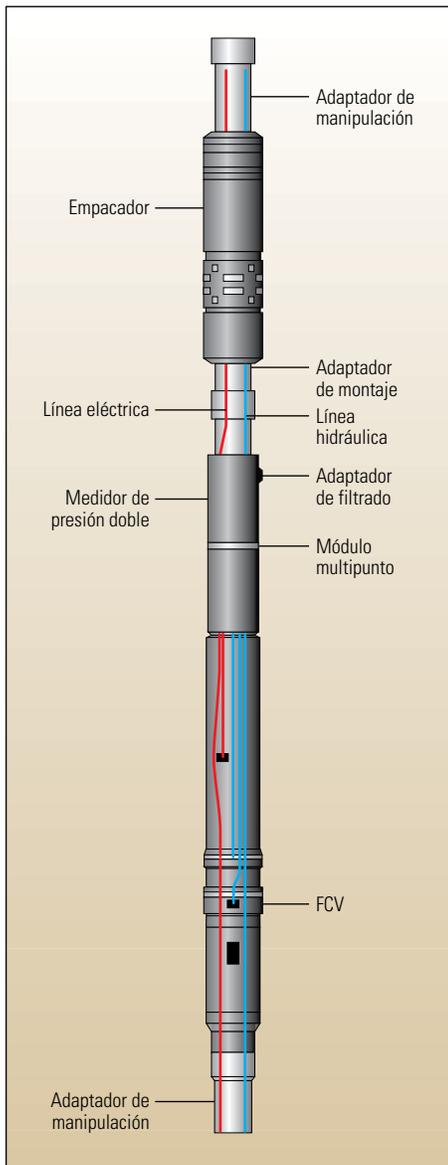
Los pozos del campo Agbami generalmente están terminados en múltiples zonas dentro del mismo yacimiento con fallas. El equilibrio de las presiones indica que las zonas están comunicadas, aunque las incertidumbres persisten ante la presencia de conectividades de fallas transversales, tanto verticales como laterales, bajo condiciones dinámicas (abajo). Consecuentemente, los ingenieros creían que los frentes de inyección de agua y gas avanzarían a través del yacimiento a diferentes regímenes.

Para manejar esta incertidumbre, el operador instaló terminaciones inteligentes que incluyeron sensores permanentes de presión, medidores de flujo y densímetros dispuestos desde la formación hasta el separador. Éstos se monitorean mediante una computadora con sistemas de base de datos y de análisis integrados que recogen y evalúan las salidas de los sensores. Se colocaron estranguladores variables en el fondo del pozo y en la superficie para facilitar el control remoto del flujo.⁸

4. Sakowski et al, referencia 3.
5. Chen JHC, Azrul NM, Farris BM, NurHazrina KZ, Aminuddin MKM, Saiful Anuar MY, Goh GKF, Kaur PKS, Darren Luke TK y Eddep A: "Implementation of Next Generation Intelligent Downhole Production Control in Multiple-Dipping Sandstone Reservoirs, Offshore East Malaysia," artículo SPE 145854, presentado en la Conferencia y Exhibición de Petróleo y Gas de Asia y el Pacífico de la SPE, Yakarta, 20 al 22 de septiembre de 2011.
6. Sharma AK, Chorn LG, Han J y Rajagopalan S: "Quantifying Value Creation from Intelligent Completion Technology Implementation," artículo SPE 78277, presentado en la Conferencia Europea del Petróleo de la SPE, Aberdeen, 29 al 31 de octubre de 2002.
7. Narahara GM, Spokes JJ, Brennan DD, Maxwell G y Bast M: "Incorporating Uncertainties in Well-Count Optimization with Experimental Design for the Deepwater Agbami Field," artículo SPE 91012, presentado en la Conferencia y Exhibición Técnica Anual de la SPE, Houston, 26 al 29 de septiembre de 2004.
8. Adeyemo AM, Aigbe C, Chukwumaeze I, Meinert D y Shryock S: "Intelligent Well Completions in Agbami: A Review of the Value Added and Execution Performance," artículo OTC 20191, presentado en la Conferencia de Tecnología Marina, Houston, 4 al 7 de mayo de 2009.



^ Incertidumbre sobre las propiedades del yacimiento. Los intervalos productivos del campo Agbami consisten en dos zonas principales. La incertidumbre acerca de la permeabilidad, sellos de fallas y conformidad de la inyección, dificultan las decisiones en cuanto a la cantidad y ubicación de los pozos. Las arenas 17 MY superior, media e inferior tienen alrededor del 80% de las reservas. Los yacimientos secundarios incluyen las capas 13 MY (no mostrada en la imagen), 14 MY y 16 MY. [Adaptado de la Sociedad Geológica de Houston: "Cena Internacional HGS, 21 de junio de 2004; Descubrimiento Agbami, Nigeria," (25 de Mayo de 2004), <http://www.hgs.org/en/art/209> (consultado el 3 de agosto de 2011).]



▲ Conjunto de terminación inteligente pequeño. El diseño modular del sistema IntelliZone Compact permite a los ingenieros ensamblar y probar el paquete de terminación inteligente para cada zona antes de ser transportado al sitio del pozo. Todas las conexiones eléctricas e hidráulicas están soldadas en sus correspondientes posiciones por el fabricante. Los operadores en los equipos de terminación sólo tienen que conectar las líneas en los adaptadores de manipulación y ya no es necesario enhebrar las líneas a través de los empacadores ni conectarlas a las válvulas FCV y sensores de presión en el sitio del pozo, lo cual resulta en una disminución de los tiempos, costos y riesgos asociados con la instalación. Un adaptador de filtrado mejora la durabilidad del sistema evitando que los contaminantes lleguen a las válvulas FCV. En los pozos de múltiples zonas, los módulos multipunto necesitan menos líneas hidráulicas para manejar múltiples válvulas de control.

El operador identificó cuatro categorías que caracterizaron el valor agregado del uso de las terminaciones inteligentes:

- recuperación adicional lograda mediante las contribuciones zonales optimizadas
- manejo del yacimiento mediante remplazo efectivo del volumen desplazado y mantenimiento de la presión con inyección de agua y gas
- optimización de las perforaciones de pozos de relleno mediante el uso de mejores modelos basados en el ajuste histórico de volúmenes zonales en lugar de los volúmenes totales del yacimiento
- ahorros en los costos operativos mediante la reducción o eliminación de trabajos de reacondicionamiento de pozos, perforación de pozos de re-entrada y adquisición de registros de producción para evaluar las contribuciones de la inyección y la producción de cada zona en forma individual.

Utilizando modelos de simulación dinámica, el operador concluyó que la instalación de terminaciones inteligentes en todo el campo Agbami incrementarían la recuperación de petróleo de 84 a 138 millones de barriles [13 a 22 millones de m³].⁹

El campo Agbami contiene 20 pozos productores, 12 pozos inyectoros de agua y 6 pozos inyectoros de gas en un tirante de agua de alrededor de 5 000 pies [1 500 m]. La producción en el año 2009 fue de 140 000 bbl/d [22 250 m³/d] de petróleo con un pico de producción esperado de 250 000 bbl/d [39 730 m³/d]. Dadas las dimensiones, ubicación e incertidumbres del yacimiento, el campo Agbami era un candidato ideal para las terminaciones inteligentes. Sin embargo, el éxito allí, en términos de incremento de la producción como resultado de la instalación de las terminaciones inteligentes, demostró además las ventajas potenciales que ofrece esta estrategia para los campos más pequeños si se puede recuperar el capital invertido.

Más pequeña y modular

A diferencia de la mayoría de los pozos que son buenos candidatos para la instalación de terminaciones inteligentes —aquellos caracterizados por múltiples objetivos de alto régimen de producción— muchos pozos promedios o marginales sólo son rentables cuando los operadores son capaces de alcanzar una gran cantidad de zonas de producción marginal al costo de un único pozo. A pesar de la complejidad inherente a la perforación y terminación de muchos de estos pozos, las rentabilidades de los proyectos a menudo exigen que la erogación de capital sea estrictamente limitada. Esto promueve que los operadores sacrifiquen las capacidades de manejo de yacimiento de una termi-

nación inteligente por los menores costos iniciales de las configuraciones tradicionales de terminación para múltiples zonas.

Los ingenieros de Schlumberger han desarrollado recientemente una solución técnica a este problema comercial mediante el re-ensamblado de las tecnologías de terminaciones inteligentes tradicionales de alto nivel, en sistemas de costos considerablemente menores. El sistema modular IntelliZone Compact para manejo zonal de yacimientos, fue desarrollado para ser instalado en pozos de múltiples zonas que necesitan menos posiciones de estrangulación y tienen menores presiones de trabajo que aquellos pozos tradicionales en los que se utilizaban las terminaciones inteligentes. Es apto para el uso en campos maduros o marginales, en pozos en los que de otra manera se utilizarían terminaciones de camisa deslizante, la mayoría sin sistemas de monitoreo, y en pozos que necesitan pruebas de larga duración. El sistema IntelliZone Compact mejora la recuperación en pozos horizontales prolongados, ya que compartimentaliza los mismos y las zonas de control en los pozos de levantamiento artificial mediante el monitoreo y control del influjo frente a la formación.

El sistema IntelliZone Compact es un conjunto integrado más que un conglomerado de herramientas individuales como las que conforman las terminaciones inteligentes tradicionales. El ensamble de control de flujo de fondo de pozo incluye un empacador, un adaptador de manipulación y una válvula FCV (izquierda). Las válvulas FCV pueden ser de estranguladores de tipo apertura y cierre, de dos o cuatro posiciones. Cada conjunto puede probarse en fábrica y correrse con un empacador de producción o con un empacador de aislación sin cuñas.

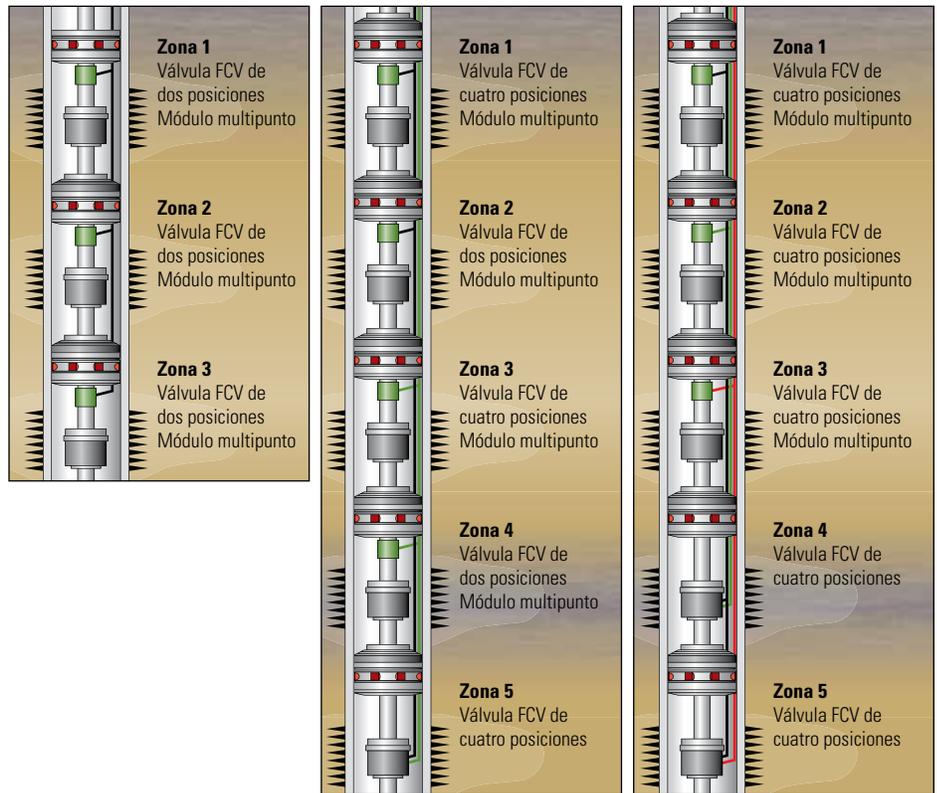
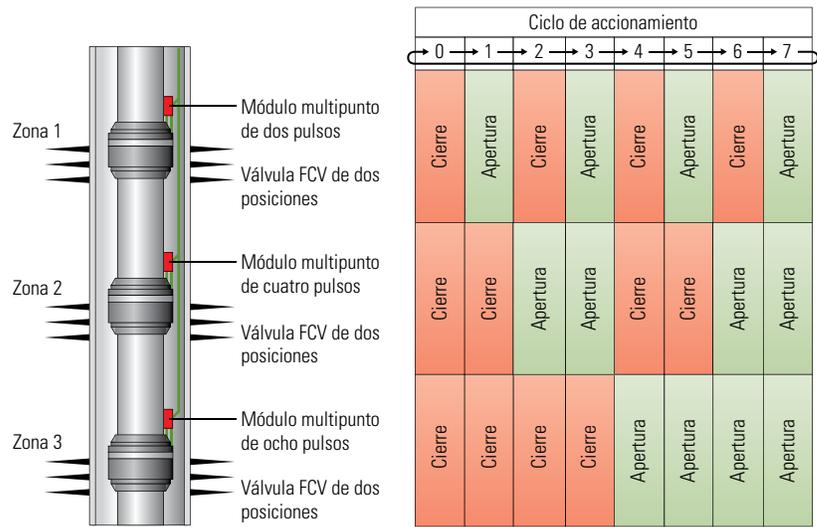
Utilizando las tecnologías de comunicación de modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK) para transmitir los datos hasta la superficie, el sistema monitorea la presión y temperatura de fondo de pozo y las posiciones de las válvulas cada un segundo.¹⁰ Los datos se transmiten al sistema de control de superficie mediante un único cable monoconductor. Una unidad de energía hidráulica (HPU) controla todo el flujo de salida y de entrada de la línea de fluido hidráulico, así como también las presiones requeridas para accionar las herramientas de fondo de pozo. Un controlador universal de sitio UniConn actúa como una plataforma de control y recolección de datos que maneja el funcionamiento de los sistemas de control de motor, sistemas de herramientas de fondo de pozo, sistema SCADA y otros sistemas de comunicación.

El sistema de control cumple varias funciones clave, que incluyen la adquisición y el almacenamiento de los datos: presión en el espacio anular, presión dentro de la tubería de producción, temperatura en el espacio anular, temperatura dentro de la tubería de producción y posición de las válvulas FCV. También realiza la secuencia automática de las operaciones de las válvulas, detección de alarmas y condiciones, niveles de tolerancia, adquisición y almacenamiento de datos de la unidad HPU y capacidad SCADA remota.

El sistema se basa en la aplicación WellBuilder de diseño de terminaciones de pozo, para integrar el proceso de planificación de la terminación desde la concepción hasta la puesta en servicio. El programa WellBuilder utiliza las condiciones de yacimiento, los requisitos de terminación, y los parámetros de construcción para generar múltiples configuraciones de la cantidad de líneas de control requeridas y los límites de presión operacional para cada zona.

Las válvulas FCV de dos posiciones IntelliZone Compact incluyen una sección de control de flujo y una sección de accionamiento. La válvula FCV de dos posiciones puede estar abierta o cerrada. Un mecanismo de accionamiento simple, que se logra liberando la presión de una línea de control mientras se incrementa la presión en la otra, cambia la posición de la válvula de abierta a cerrada y viceversa. Cuando se coloca más de una válvula FCV en el pozo, la utilización compartida de las líneas permite reducir el número de líneas a una más que el total de válvulas en el pozo. La válvula FCV de cuatro posiciones incluye una sección de estrangulación y una sección de accionamiento, y además un graduador de ranura tipo J, que controla la posición del estrangulador; puede estar cerrado, 33% abierto, 66% abierto y 100% abierto.

Al igual que en la válvula FCV de dos posiciones, la posición del estrangulador se cambia un paso por cada accionamiento mediante la liberación de presión en una línea y la presurización en la otra, y también puede configurarse para la utilización compartida de líneas a fin de minimizar el número de líneas hidráulicas instaladas. La válvula FCV de cuatro posiciones también utiliza un módulo multipunto que permite la manipulación de hasta tres válvulas de fondo de pozo mediante una única línea de control. Un sensor de posición se encuentra integrado en la válvula FCV hidráulica, el cual se logra mediante la programación de cada válvula FCV para responder a una señal de dos, cuatro u ocho pulsos (*derecha*). Como la válvula se mueve en una única dirección, se puede utilizar una serie de pulsos para cambiarlas de apertura a cierre o a través de la secuencia de posiciones de estrangulación.

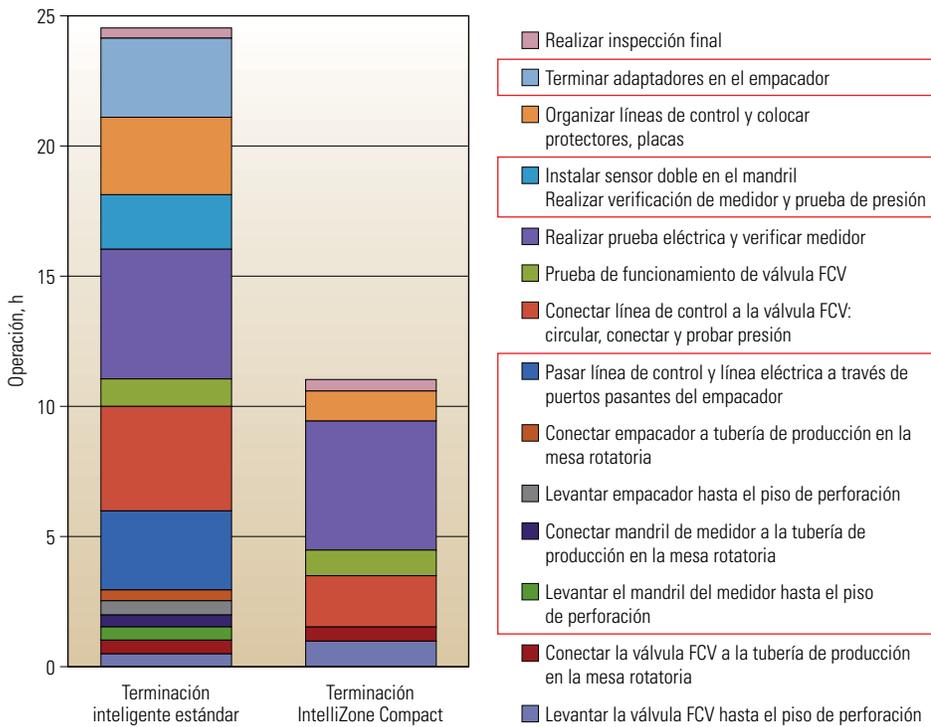


^ Reducción de la cantidad de líneas hidráulicas. En las configuraciones de terminaciones tradicionales, cada válvula FCV accionada desde la superficie requiere una línea hidráulica dedicada. Un módulo multipunto interpreta los pulsos emitidos desde la superficie a modo de comandos para modificar la apertura de una determinada válvula FCV dentro del pozo (*arriba*). Esto permite a los ingenieros operar por lo menos una válvula más que la cantidad de líneas hidráulicas disponibles. Por ejemplo, el uso de módulos multipunto (*abajo*) permite operar tres válvulas FCV de 2 posiciones con una única línea de control (línea negra, *izquierda*) o dos válvulas FCV de 2 posiciones más tres válvulas FCV de 4 posiciones con dos líneas (líneas negra y verde, *centro*) y hasta cinco válvulas FCV de 4 posiciones con tres líneas (líneas negra, verde y roja, *derecha*).

9. Adeyemo et al, referencia 8.

10. La tecnología de comunicación FSK utiliza un robusto esquema de modulación de frecuencia que envía datos codificados en forma digital mediante el cambio de frecuencia de la señal transmitida. Un receptor

convierte nuevamente la señal a la forma de origen. La señal FSK se conecta fácilmente a otros dispositivos de comunicación tales como los utilizados por los sistemas SCADA.



▲ Ahorro de tiempo. Debido a que tiene un diseño modular y que puede ser ensamblado y probado antes de llegar al sitio del pozo, el conjunto IntelliZone Compact está preparado para ser corrido en el pozo en aproximadamente la mitad del tiempo estimado para llegar al mismo estado utilizando una instalación de terminación inteligente estándar. Mucho del tiempo que se ahorra se debe a los pasos necesarios para las instalaciones de las terminaciones inteligentes estándares (enmarcadas en rojo) que ya no son necesarios cuando se corre una terminación IntelliZone Compact.

Al minimizar la cantidad de líneas de control hidráulico en una terminación, se reduce la complejidad de la instalación: menos líneas requieren menos manipulación y empalmes. El módulo multipunto también hace que sea posible colocar las válvulas FCV en más zonas de producción de las que serían posibles de otra manera, debido a la disponibilidad de un número limitado de empacadores y penetraciones para colgadores de tuberías.

El módulo multipunto se monta externamente a la tubería de producción dentro del sistema IntelliZone Compact y se conecta a los puertos de apertura y cierre de la válvula FCV y, en serie, a la línea de control hidráulico instalada hasta la superficie. La instrumentación de fondo de pozo también puede ser agregada al ensamble de control de flujo como un paquete modular mediante el montaje de los medidores de presión y temperatura y de los otros dispositivos hidráulicos alrededor del adaptador para tubería de producción.

Ahorros en Brasil e India

Los ahorros generados por el enfoque del sistema IntelliZone Compact en comparación con los sistemas de terminaciones inteligentes convencionales se deben a su modularidad y estandarización. Con alrededor de 10 m [30 pies] de largo, tiene la mitad de la longitud de las terminaciones inteli-

gentes estándares. Debido a que el dispositivo de aislamiento, sensores y válvulas de control de flujo están empaquetados en un único ensamble, no existen los problemas de interfaces comunes en los sistemas construidos a partir de componentes provistos por diferentes fabricantes. Esto mejora considerablemente la confiabilidad total del sistema y, debido a que el sistema completo se ensambla y se prueba en la etapa de fabricación en vez de en el campo, ahorra tiempo de equipo al operador.

El sistema IntelliZone Compact también ayuda a los operadores a ahorrar tiempo y reducir posibles errores debido a que las líneas de control están instaladas como parte del paquete. El manejo de líneas de control en el pozo está limitado a la realización de empalmes arriba y debajo del paquete a medida que se lo baja en el pozo. En las aplicaciones estándar, estas líneas deben enhebrarse a través de los empacadores y conectarse a cada válvula de control individualmente; esto es una operación lenta y con altas probabilidades de dañar las líneas y los componentes. Debido a que hay una menor cantidad de líneas que necesitan ser manipuladas, el riesgo asociado con las operaciones de empalme también se reduce.

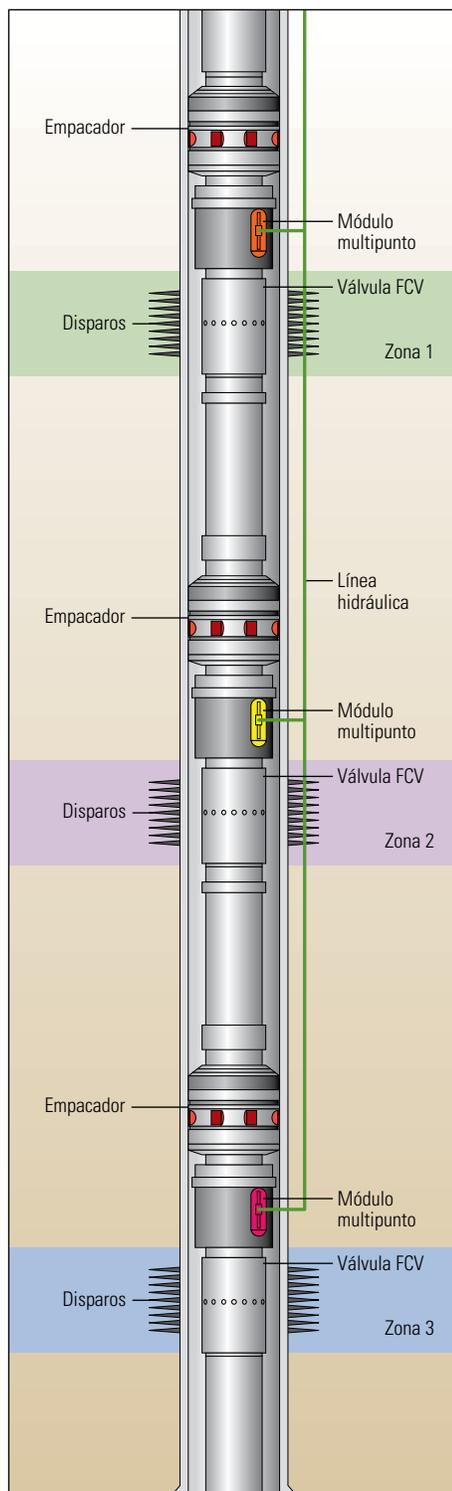
Fueron éstos ahorros en tiempo y costos los que influyeron en una decisión de Petrobras de utilizar un sistema IntelliZone Compact en el

pozo inyector Carapeba 27 del campo Carapeba en la cuenca de Campos, en el área marina de Río de Janeiro. Los ingenieros procuraron optimizar la producción de este campo maduro mediante la sustitución de pozos de una única zona y terminación convencional, con pozos de tres zonas con terminaciones inteligentes. Optaron por utilizar una terminación inteligente IntelliZone Compact en un pozo inyector para optimizar el barrido del yacimiento y para realizar pruebas de inyectividad que permitan asignar los regímenes de inyección en cada zona. Ambos objetivos se ven facilitados por el sensor de posición de alta precisión que posee el sistema. Los ingenieros también necesitaban monitorear y controlar el flujo de fondo de pozo en forma remota mediante su sistema SCADA, lo cual se logró mediante el controlador de sitio UniConn.

Ensamblado y probado en fábrica, cada componente de la terminación modular de tres zonas incluía un empacador de producción, un sensor doble de presión y temperatura para las lecturas del espacio anular e interior de la tubería de producción, un módulo multipunto, una válvula FCV de dos o cuatro posiciones y un sensor de posición de la válvula FCV. Como Carapeba es un campo maduro, la rentabilidad deseada del proyecto exigía un sistema de bajo costo, lo cual se logró con menores costos de instalación en comparación con los estimados para terminaciones inteligentes tradicionales (izquierda).

Los ingenieros de un operador en el área marítima de India también optaron por una solución IntelliZone Compact al considerar la manera de terminar un pozo de tres zonas dentro de las restricciones económicas de un campo marginal. Procuraban reducir la inversión de capital mediante la utilización de equipamientos ya adquiridos. Al mismo tiempo procuraban optimizar el retorno a la inversión mediante el control de cada zona en forma independiente. Considerando estas dos restricciones, su elección de terminación de pozo estaba entre la utilización de camisas deslizantes y un sistema de control de flujo de fondo de pozo controlado desde la superficie.

Las camisas deslizantes necesitan intervenciones para cambiarlas de posición, y los ingenieros sabían que para poner en línea estos pozos necesitarían realizar tratamientos de acidificación mediante tubería flexible en cada una de las zonas en forma individual. La alternativa, el tratamiento de todas las zonas simultáneamente, resultaría en la entrada de la mayor parte del ácido en una zona de gran permeabilidad, lo cual dejaría a las otras dos zonas sin tratamiento. No se pudieron utilizar los sistemas de control de flujo tradicionales para aislar cada zona debido a que la operación para controlar los equipos de las



^ Adaptación al equipo disponible. Utilizando módulos multipunto en cada una de las tres zonas, los ingenieros pudieron controlar las válvulas FCV mediante una única línea de control hidráulico (línea verde). De esta manera, el operador pudo utilizar un cabezal del pozo que ya se encontraba disponible en su inventario en lugar de tener que comprar otro más costoso con mayor cantidad de penetraciones requeridas en las instalaciones de terminación inteligente de tres zonas tradicionales.

tres zonas hubiese requerido más líneas hidráulicas que los orificios existentes en el cabezal del pozo de la compañía.

La solución incluyó la implementación de un módulo multipunto en un sistema IntelliZone Compact. Los ingenieros pudieron implementar válvulas FCV de fondo de pozo controladas desde la superficie en las tres zonas utilizando una única línea hidráulica. El sistema fue implementado con un emparador de pozo entubado y dos empaadores expandibles para aislar cada zona (izquierda). Utilizando el módulo multipunto, los ingenieros pudieron abrir una zona mientras las otras dos permanecían cerradas, con lo cual aseguraron que los tratamientos de acidificación lograran sus objetivos.

La eliminación de tres de las cuatro líneas de control requeridas por los sistemas tradicionales, así como también la eliminación de la necesidad de intervenciones utilizando tubería flexible, ahorró al operador tres semanas de tiempo de equipo de terminación de pozos. Como resultado, el operador optimizó la producción en un 165% con respecto al régimen esperado y ahorró USD 1 millón en los primeros dos meses posteriores a la instalación del sistema.

Solución de alta tecnología y bajo costo

La optimización de la producción requiere inversiones. Sin embargo, cuando se enfrentan a un activo de reservas marginales, los operadores están a menudo limitados a optar sólo entre escenarios de terminación básicos por temor a que cualquier aumento de producción que pueda lograrse utilizando altas tecnologías no resulte suficiente para pagar el costo de tales soluciones. Esto es aún más cierto cuando el desafío para aumentar la producción era tan técnico como al que se enfrentaban los ingenieros de PETRONAS en las terminaciones de los pozos de un campo en el área marítima del este de Malasia.

El campo S, operado por PETRONAS, tiene reservas marginales en yacimientos de arenas no consolidadas. Las reservas se encuentran en una columna de petróleo de gran espesor: 40 m [131 pies]. Debido a la presencia de un extenso casquete de gas, los ingenieros temían que el avance del gas terminara prematuramente con la producción de petróleo e hiciera que se pasaran por alto importantes reservas de petróleo. Tuvieron que considerar además la posibilidad de la invasión de agua desde un acuífero moderadamente importante y activo.¹¹

Para reducir la cantidad de pozos y maximizar al mismo tiempo el contacto con el yacimiento, los ingenieros de PETRONAS planificaron el desarrollo del campo utilizando 14 pozos horizontales.

Los pozos horizontales produjeron una caída de presión frente a la formación menor que la producida por los pozos verticales o desviados típicos, con una productividad equivalente. Esta menor caída de presión ayuda a reducir la severidad de la conificación del agua y la formación de crestas en el contacto con el gas.¹²

Sin embargo, cuando la sección horizontal penetra zonas de diferentes propiedades de flujo, aquellas con mayor permeabilidad se agotarán primero. Esto puede llevar a que el agua o el gas entren al pozo a través de secciones agotadas de la zona de producción, lo cual causa que las reservas en las áreas menos permeables de la formación sean pasadas por alto. Una vez que se produce tal irrupción, las operaciones de remediación que utilizan equipos de reparación de pozos pueden ser inútiles o pueden no ser capaces de lograr que la producción de petróleo vuelva a niveles rentables.

Debido a que los contrastes entre las propiedades de cada zona eran grandes, PETRONAS tuvo que equilibrar la entrada inicial de fluido y mantener la habilidad de reaccionar ante los problemas de inlfujo que surgiesen durante la vida del pozo. Para satisfacer estos requerimientos, las terminaciones IntelliZone Compact fueron consideradas como una alternativa con respecto a los dispositivos de control de inlfujo pasivos (ICD) para los otros seis pozos de producción mezclada.¹³ Los pozos del campo S más adecuados para esta aplicación fueron analizados y clasificados en función a su perfil de producción y propiedades dinámicas del fluido de yacimiento, tales como el corte de agua y la relación gas-petróleo. También se realizaron mediciones de las diferentes sensibilidades de producción frente a la formación para el aumento de petróleo, reducción del corte de agua, perfil de la relación gas-petróleo y presión dinámica de fondo del pozo.

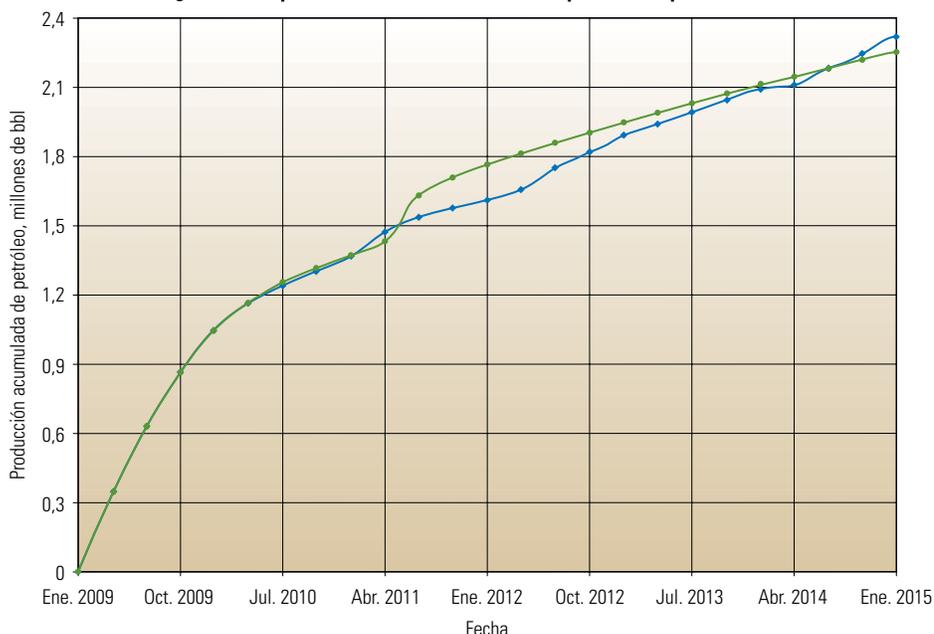
Los dos pozos escogidos para la instalación, pozo A1 y pozo A2, mostraron resultados positivos en el análisis de control de inlfujo zonal, en comparación con el del caso base de filtros autónomos convencionales. Se terminaron con paquetes

11. Chen et al, referencia 5.

12. Para mayor información acerca de las tecnologías de perforación de pozos de alcance extendido, consulte: Bennetzen B, Fuller J, Isevcian E, Krepp T, Meehan R, Mohammed N, Poupeau J-F y Sonowal K: "Pozos de alcance extendido," *Oilfield Review* 22, no. 3 (Marzo de 2011): 4-15.

13. Para mayor información acerca de los dispositivos de control de inlfujo: Ellis T, Erkal A, Goh G, Jokela T, Kvernstuen S, Leung E, Moen T, Porturas F, Skillingstad T, Vorkinn PB y Raffin AG: "Dispositivos de control de inlfujo: Perfeccionamiento de los estándares," *Oilfield Review* 21, no. 4 (Junio de 2010): 30-39. Chen et al, referencia 5.

Análisis de ganancia de producción: Válvula FVC versus dispositivo ICD pasivo



^ Ganancia probable en la producción total estimada. Se utilizaron aplicaciones de software para el modelado de campos que proporcionan balance de materiales, análisis nodal y de desempeño del sistema, para comparar la producción total estimada de los pozos operados por PETRONAS en el campo S. Se terminó el pozo con válvulas FVC de fondo de pozo controladas desde la superficie (azul) y se comparó con un pozo equipado con un dispositivo ICD pasivo (verde). El pozo equipado con las válvulas FVC proyecta una producción total estimada de 100 000 barriles más de petróleo que los pozos equipados con dispositivos ICD. (Adaptado de Chen et al, referencia 5.)

de terminación modulares integrados que incluían empacadores de aislamiento zonal, dos válvulas FVC de posición intermedia y de apertura y cierre, y sensores permanentes de presión y temperatura en tiempo real.

El ensamble se envió al pozo como una única pieza de menos de 9 m [30 pies] de largo, lo que representaba entre la mitad y un tercio de la longitud requerida para una terminación inteligente convencional comparable. El ensamble además fue

probado previamente con electrónica y empalmes hidráulicos soldados en fábrica. Cada conexión probada fue fijada al ensamble y además se colocó a la carcasa una banda metálica adicional para proteger aún más el ensamble y evitar daños por impactos durante la instalación.

Además de reducir los riesgos de fallas de instalación, éstas prácticas disminuyen el tiempo de instalación ya que reducen la cantidad de conexiones que deben hacerse y de líneas que

deben empalmarse en el sitio del pozo. En el caso del campo S, el ahorro de tiempo de equipo de terminación debido a la instalación, fue de dos tercios por zona en comparación con el tiempo requerido para una instalación convencional, o el equivalente a USD 400 000 por pozo terminado.

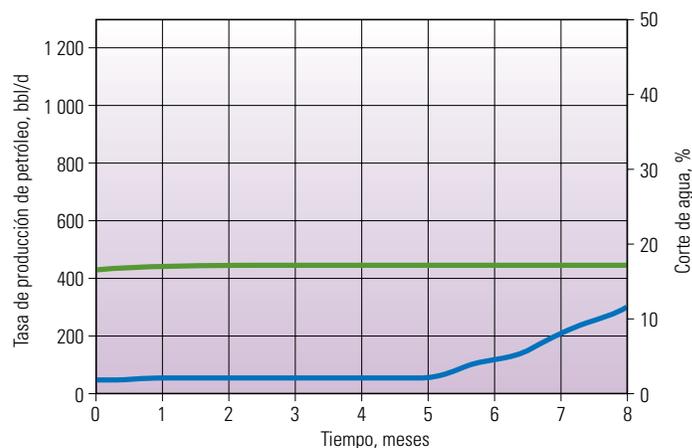
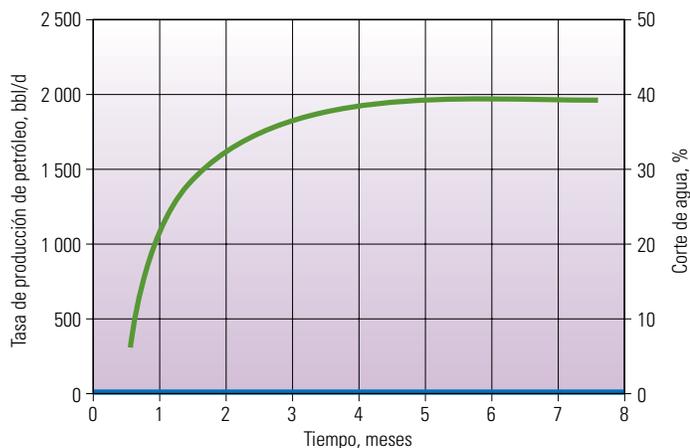
Después de la instalación, se utilizó el análisis nodal del pozo combinado con el modelado de lapsos de tiempo para predecir escenarios de producción en base a la productividad del yacimiento para las trayectorias de pozo propuestas. Como no se disponían de las propiedades petrofísicas y geológicas detalladas para cada pozo a partir de un modelo de ajuste histórico, las mismas fueron calibradas contra el rendimiento del campo vecino. Los resultados de la simulación de la producción indicaron la manera en que las terminaciones inteligentes IntelliZone Compact permitirían el control y la producción zonal en diversos escenarios de producción y productividad del yacimiento. El sistema sería especialmente efectivo en el control del influjo de las zonas de altos índices de productividad mediante la utilización de una apertura menor de la válvula, mientras que estimularía el flujo de las zonas de bajos índices de productividad mediante válvulas completamente abiertas.

El diseño IntelliZone Compact incluye opciones para tres tamaños de válvulas FVC, cada una con configuraciones de estrangulador totalmente abierto, totalmente cerrado y dos posiciones intermedias. En base a los modelos de simulación de yacimiento, se diseñaron los conjuntos de válvulas utilizando los siguientes criterios de selección:

- control zonal para zonas discretas
- balance de flujo para múltiples zonas
- prevención de flujo transversal
- capacidad suficiente para las diferencias en los índices de productividad zonales.

Caso	Zona 1		Zona 1			Zona 2			Tasa de producción, bbl/d	Corte de agua, %	Tasa de producción de gas, MMpc/d	Índice de productividad bbl/d/psi
	Apertura, %	Apertura, %	Interior tubería, lpc	Espacio anular, lpc	ΔPresión, psi	Interior tubería, lpc	Espacio anular, lpc	ΔPresión, psi				
Caso 0	100	100	2 094	2 092	2	2 096	2 094	2	1 179,2	0,12	0,18	
Caso 1	100	0	1 877	1 873	4	1 875	2 105	-230	555,4	21,30	0,05	138,9
Caso 2	0	100	2 101	2 035	66	2 102	2 100	2	1 067,6	4,85	0,08	533,8
Caso 3	33	100	2 095	2 091	4	2 097	2 095	2	1 144,4	0,22	0,19	
Caso 4	67	100	2 095	2 092	3	2 097	2 095	2	1 143,4	0,21	0,18	
Caso 5	100	67	2 085	2 082	3	2 086	2 101	-15	1 001,9	0,44	0,16	
Caso 6	100	33	1 951	1 949	2	1 952	2 100	-148	1 050,6	0,37	0,17	

^ Configuraciones de control de flujo. Midiendo la producción zonal con medidores de presión de fondo de pozo, los ingenieros analizaron siete configuraciones de válvulas de control para dos zonas en el pozo A2 del campo S. El caso 0 indicaba producción con las zonas completamente abiertas. En los casos 1 y 2, cerrando la producción de la zona 2 y luego de la zona 1 respectivamente, el operador estableció el índice de productividad y corte de agua para cada zona. Utilizando los resultados de los casos 0, 1 y 2 los ingenieros lograron discernir que debido a su bajo índice de productividad, la zona 1 no aportaba producción cuando ambas válvulas FVC estaban totalmente abiertas. Después de probar otras combinaciones, el equipo concluyó que el caso 3, con la válvula que controlaba la zona 1 abierta 33% y la válvula en la zona 2 abierta 100%, era la configuración óptima. (Adaptado de Chen et al, referencia 5.)



^ Comparación de perfiles de producción. El pozo A1 (*izquierda*), equipado con una terminación IntelliZone Compact, fue capaz de retardar el avance del agua (azul) y alcanzar y mantener un perfil de producción neta de petróleo (verde) más elevado que un pozo horizontal vecino (*derecha*) terminado en la misma arena. El pozo vecino, sin embargo, estaba afectado por la producción de agua, lo cual resultaba en una menor producción neta de petróleo. (Adaptado de Chen et al, referencia 5.)

Los ingenieros utilizaron aplicaciones de computación para el modelado integrado del campo, que proporcionan balance de materiales, análisis nodal, y análisis de rendimiento del sistema, para comparar la producción total estimada de los pozos terminados con sistemas IntelliZone Compact. Estudiaron dos escenarios de producción, ganancia potencial de producción y bloqueo de la producción del agua y gas en fondo de pozo.

En el primer escenario, en comparación con los dispositivos ICD pasivos, los ingenieros encontraron que el control activo del flujo de fondo de pozo dio lugar a 15 900 m³ [100 000 bbl] adicionales de petróleo (*página anterior, arriba*). El análisis del segundo escenario, enfocado en el manejo del gas y el agua en fondo de pozo, indicó que el avance de agua que anula la producción ocurriría desde el yacimiento más pequeño y más permeable en el inicio de la sección horizontal del pozo. Cerrando dicha zona y abriendo la zona menos permeable y más espesa, en el extremo final del pozo horizontal, la producción continuaría.¹⁴

Utilizando los datos de los registros de incremento de presión, presión dinámica de fondo del pozo y pruebas de pozo realizadas en superficie, un equipo a cargo de los activos estudió la productividad y capacidad de producción zonal del yacimiento en el pozo A2 para comprender mejor el yacimiento. La contribución zonal fue monitoreada utilizando los medidores de presión de fondo de pozo y la producción se reguló con las válvulas FCV en cada zona. Después de estudiar siete configuraciones, el equipo a cargo de los

activos determinó qué aperturas de 33% y 100% en las zonas 1 y 2 respectivamente, creaban el flujo óptimo (*página anterior, abajo*).

El equipo de trabajo comparó un perfil de producción del pozo A1 con el de un pozo horizontal vecino con terminación en la misma arena (*arriba*). El primero mostraba un período prolongado de producción neta de petróleo elevada mientras que el avance de agua y gas se encontraban retardados. El segundo estaba afectado con un régimen de petróleo fluctuante y menor, acoplado con una acelerada irrupción de agua.

Solución técnica a un problema de mercado

Durante años, los desarrolladores de las tecnologías de la industria petrolera se han visto obstaculizados por la renuencia del sector a adoptar soluciones innovadoras. En general, la indecisión del usuario, especialmente respecto a las herramientas destinadas al sector de exploración y producción, se ha fundado en el temor a que el nuevo sistema falle al ser sometido a las duras condiciones de fondo de pozo. Con el tiempo, las dudas sobre la confiabilidad del sistema se han superado, y las innovaciones tales como los sistemas rotativos direccionales y las tuberías de revestimiento expandibles se han vuelto comunes. Lo mismo puede decirse en cuanto a la aceptación de la industria de la tecnología de terminación inteligente.

Hoy en día, la resistencia de la industria con respecto a las terminaciones inteligentes provienen de preocupaciones financieras que tienen los operadores acerca de sus activos maduros o marginales; los operadores deben visualizar un aumento de producción debido a las capacidades de monitoreo y control de fondo de pozo en forma remota,

suficiente como para justificar los costos iniciales del hardware.

La introducción de un sistema modular destinado a proporcionar a la industria las ventajas de una terminación inteligente tradicional a un costo mucho menor parece cumplir aquel requisito. Este cambio en la percepción acelerará la adopción de la tecnología de terminaciones inteligentes en la industria y, al hacerlo, repercutirá considerablemente en la manera en que los operadores ven sus campos marginales y maduros.

Con la reducción de la barrera del costo inicial, las terminaciones inteligentes pueden extender la vida de los campos marginales debido a que la tecnología para controlar la producción frente a la formación, sin necesidad de realizar intervenciones, conduce a una mayor producción neta y producción total estimada mediante un mezclado más eficiente. Del mismo modo, los proyectos con escenarios económicos tan frágiles que quedaban archivados por temor a que los costos de las posibles futuras intervenciones pudieran contrarrestar la ganancia neta, ahora pueden ser llevados adelante. Mediante el uso de terminaciones inteligentes en estos proyectos marginales, los operadores pueden ahorrar en intervenciones y reducir la erogación de capital inicial en instalaciones auxiliares. La capacidad para manejar los parámetros de yacimiento mediante el control de flujo a fin de retardar el ingreso del agua frente a la formación, también permite a los operadores planificar instalaciones de superficie de menores dimensiones y reducir los costos asociados con el manejo del agua, lo cual repercute positivamente en los planes de desarrollo de los campos maduros o marginales.

—RvF

14. Chen et al, referencia 5.