



08

→

Perforación y terminación de un pozo

08 | Perforación y terminación de un pozo

La única forma de verificar la existencia de petróleo en el subsuelo, aún después de haber hecho todos los estudios para determinar su probable existencia, es realizar una perforación hasta el objetivo.

Bajo distintos procedimientos, la perforación del subsuelo se practica desde hace siglos. La mecánica empleada en los primeros tiempos para horadar el terreno fue la conocida como perforación a cable, que consiste en un trépano “cola de pescado”, con una geometría similar a la de un cincel o cortafrío, sujeto en el extremo de un cable accionado por un balancín que lo levanta y lo deja caer dando lugar a la acción de corte del terreno por percusión. A intervalos regulares de tiempo, según el avance del trépano, es necesario bajar hasta el fondo del pozo un achicador (o cuchara) para extraer los recortes de terreno producidos.

A partir de 1930 se comenzó a utilizar el sistema de rotación, método con el que se pasa de la percusión a cable a la rotación del trépano por medio de una columna de tubos con circulación de inyección (lodos de perforación) para la limpieza del pozo. El posterior desarrollo de las herramientas y la ingeniería ad hoc permitieron grandes avances reduciendo los tiempos de perforación, los costos y alcanzar mayores profundidades.

Hoy en día la perforación de pozos para petróleo y/o gas se realiza en tierra o desde la superficie del agua, ya sea en pantanos, lagos o mar, requiriendo en cada caso de distinto equipo, apoyo y tecnologías.



Equipo perforador en la Cuenca Cuyana

La perforación. El equipo: herramientas y sistemas auxiliares

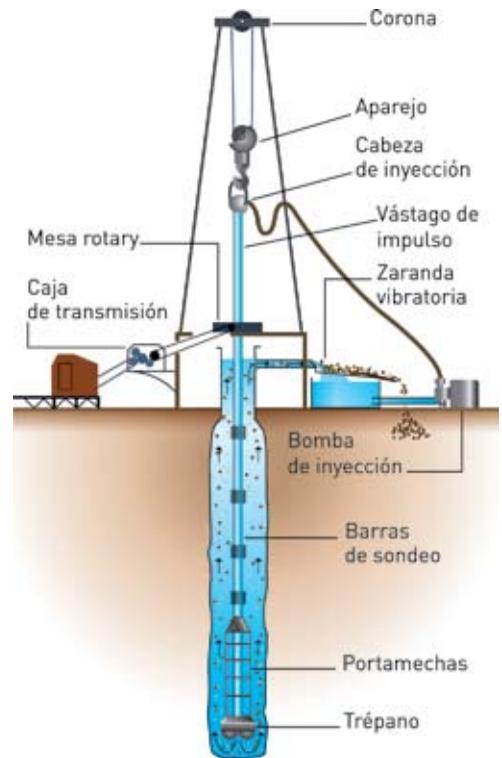
El equipo de perforación propiamente dicho consiste en un sistema mecánico o electromecánico, compuesto por una torre o mástil que soporta un aparejo diferencial cuyo cable es operado

por un guinche (cuadro de maniobras) y todos juntos conforman una máquina que permite la extracción y bajado de tuberías (columna perforadora) al pozo con sus respectivas herramientas; este sistema de elevación es accionado por una transmisión mecánica movida por motores a explosión o eléctricos que también impulsan simultánea o alternativamente una mesa rotativa que hace girar el vástago de impulso (*key*), extremo superior de la columna perforadora y transmisor del giro a la tubería.

Paralelamente, el equipo de perforación cuenta con elementos auxiliares, tales como los tubulares que componen la columna perforadora, bombas de lodo, piletas con los dispositivos para tratamiento de la inyección, un sistema de válvulas de seguridad que pueden obturar la boca del pozo para control de surgencias u operaciones de rutina, generadores eléctricos de distinta capacidad según el tipo de equipo, transmisión satelital de los parámetros y las maniobras de perforación durante las 24 horas, etc. Si a esto se agregan las casillas de distinto diseño para alojamiento del personal técnico, depósito/s, taller, laboratorio, etc., el equipo de perforación y su comunidad se convierten en una unidad operativa casi autosuficiente.

El trépano es la herramienta de corte que permite perforar. Fue y sigue siendo permanentemente modificado a lo largo del tiempo a fin de obtener la geometría y el material adecuados para vencer a las distintas y complejas formaciones de terreno que se interponen entre la superficie y los hidrocarburos (arenas, arcillas, yesos, calizas, basaltos), las que van aumentando en consistencia en relación directa con la profundidad en que se las encuentra. Hay así trépanos de 1, 2 y 3 conos montados sobre rodamientos o bujes de compuestos especiales; estos conos, ubicados originariamente de manera concéntrica, son fabricados en aceros de alta dureza, con dientes tallados en su superficie o con insertos de carburo de tungsteno u otras aleaciones duras: su geometría responde a la naturaleza del terreno a atravesar. Actualmente los trépanos tricono han sido desplazados en gran medida por los trépanos de arrastre impregnados con diamantes de tipo industrial, o con insertos de PDC de gran dureza, implantados en su superficie de ataque.

El trépano cuenta con varios pasajes de lodo orientados hacia el fondo del pozo y provistos de orificios especiales llamados boquillas o “jets” que convierten la energía que transporta la inyección en un impacto contra el fondo del pozo que incrementa el régi-

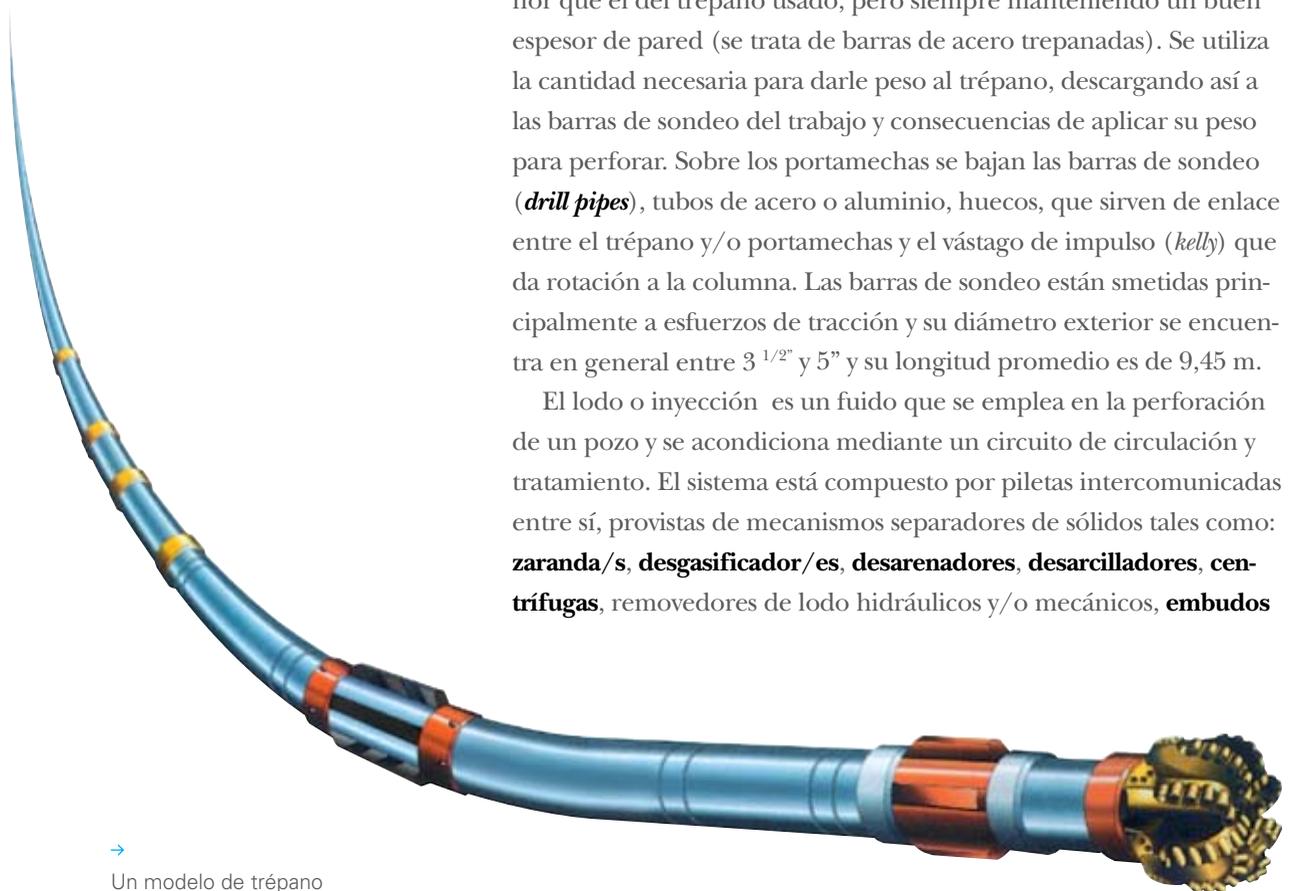


→
Diseño básico de un equipo de perforación

men de penetración del trépano. El lodo retorna luego a la superficie por el espacio anular entre el sondeo y el pozo. El rango de diámetros de trépano es muy amplio, pero pueden indicarse como más comunes los de 17 1/2", 12 1/4", 8 1/2" y 6 1/8".

El conjunto de tuberías que se emplea para la perforación se denomina columna perforadora o sondeo de perforación, y consiste en una serie de trozos tubulares, interconectados entre sí mediante uniones roscadas. Este conjunto, además de transmitir rotación en sentido horario al trépano, ubicado en el extremo inferior de la columna, permite la circulación del lodo de perforación por su interior. El primer componente de la columna que se encuentra sobre el trépano son los portamechas (*drill collars*), de 20 a 30 tubos pesados de acero con pasaje interior para el lodo y una longitud promedio de 9,45 m cada uno, su superficie exterior puede ser lisa o espiralada y se vinculan entre sí por medio de uniones roscadas integrales, su diámetro exterior suele ser aproximadamente 2" menor que el del trépano usado, pero siempre manteniendo un buen espesor de pared (se trata de barras de acero trepanadas). Se utiliza la cantidad necesaria para darle peso al trépano, descargando así a las barras de sondeo del trabajo y consecuencias de aplicar su peso para perforar. Sobre los portamechas se bajan las barras de sondeo (*drill pipes*), tubos de acero o aluminio, huecos, que sirven de enlace entre el trépano y/o portamechas y el vástago de impulso (*kelly*) que da rotación a la columna. Las barras de sondeo están sometidas principalmente a esfuerzos de tracción y su diámetro exterior se encuentra en general entre 3 1/2" y 5" y su longitud promedio es de 9,45 m.

El lodo o inyección es un fluido que se emplea en la perforación de un pozo y se acondiciona mediante un circuito de circulación y tratamiento. El sistema está compuesto por piletas intercomunicadas entre sí, provistas de mecanismos separadores de sólidos tales como: **zaranda/s**, **desgasificador/es**, **desarenadores**, **desarcilladores**, **centrífugas**, removedores de lodo hidráulicos y/o mecánicos, **embudos**



Un modelo de trépano

para la adición de productos; bombas centrífugas y finalmente las bombas alternativas (2 ó 3), que succionan el lodo de las piletas y lo inyectan a elevados caudales y alta presión por dentro de la columna de perforación hasta las boquillas del trépano para hacerlo luego subir cargado con los recortes del trépano por el espacio anular existente entre la columna de perforación y las paredes del pozo a la superficie, el lodo también sale en parte contaminado por los materiales y fluidos que componen las formaciones atravesadas.

Las funciones del sistema son las siguientes: preparar el fluido de perforación y recuperarlo al retornar a la superficie, manteniéndolo limpio (separando los recortes producidos por el trépano y los sólidos incorporados), tratarlo químicamente, según las condiciones de perforación lo exijan, y bombearlo nuevamente al pozo.

¿Qué se bombea al pozo? Los fluidos de perforación, conocidos genéricamente como inyección o lodo. Estos fluidos conforman otro capítulo especial dentro de los elementos y materiales necesarios para perforar un pozo; el diseño y composición del lodo serán según las características físico-químicas de las distintas capas a atravesar. Las cualidades del fluido seleccionado, densidad, viscosidad plástica, punto de fluencia, **pH**, **filtrado**, revoque, composición química, propiedades tixotrópicas, contenido de material obturante, deben contribuir a cumplir con las distintas funciones de éste, a saber: enfriar y limpiar el trépano; acarrear los recortes (o *cuttings*) que genere la acción del trépano; mantener en suspensión los recortes y sólidos evitando su decantación en el interior del pozo cuando por algún motivo se interrumpa la circulación de la inyección; mantener la estabilidad de las paredes del pozo; variando su densidad, ejercer la presión hidrostática adecuada para evitar la entrada de fluidos de la formación del pozo, situación que podría generar una surgencia descontrolada (incidente conocido también como *blow out*); mediante el uso de material obturante controlar pérdidas parciales o totales del lodo en formaciones con presiones de admisión anormalmente bajas; evitar el filtrado de agua (que daña las formaciones productivas) y contrarrestar contaminaciones no deseadas.

Como componentes de la inyección se utilizan distintos elementos: pulverulentos, líquidos y gaseosos, pasando por agua, dulce o salada; gelificantes, fluidificantes, tensoactivos y antiespumantes. Los hidrocarburos (petróleo, gasoil, diesel) se utilizan en distintas



→

El trépano es y ha sido permanentemente modificado a lo largo del tiempo

proporciones con agua (emulsión inversa) o 100% hidrocarburo; aire, gas o aireada. La selección del fluido a utilizar y sus aditivos está condicionada a las características del terreno a perforar, profundidad final, disponibilidad, costos, cuidado del medio, etc.

Mecánica de la operación de perforación. Operaciones complementarias dentro de la perforación

Una vez preparada la inyección en calidad y volumen programados, se procede a enroscar el trépano en el extremo inferior del vástago (*kelly*), que es también un tubo de acero, trepanado (con pasaje interior), de sección cuadrada, hexagonal o triangular, que quedará atrapado por un encastre de similar geometría (*kelly bushing*) que calza en un alojamiento que posee la mesa rotary del equipo (*rotary bushing*), mesa que será la encargada de hacerlo girar, el que a su vez transmitirá el movimiento de giro al trépano, directamente o a través de la columna perforadora en la medida de su avance. Luego se apoyará el trépano en el terreno y, previa iniciación de la circulación de fluido, se puede comenzar a rotar aplicando peso sobre el trépano para iniciar la perforación.

La utilización de la mesa rotary para imprimir la rotación de la columna perforadora y el trépano está siendo paulatinamente desplazada por un sistema motriz instalado en el aparejo, con movilidad vertical a lo largo de todo el mástil, denominado “*top drive*”. Este sistema puede ser accionado por un motor eléctrico o hidráulico y puede asimismo ser utilizado para “*robotizar*” diversas maniobras rutinarias en el manejo de tubulares en el piso de la torre.

En este primer paso y a lo largo del proceso, se dará especial importancia al control de la verticalidad del pozo, control que se realiza mediante la utilización de niveles e inclinómetros. Una vez perforada la sección que permite la longitud del vástago, normalmente 12 m, y para cubrir esta profundidad alcanzada, se procede primero a agregar los portamechas, hasta la cantidad requerida por el peso para que el trépano perforo. Cubiertas las necesidades de peso sobre el trépano, se pasa a agregar primero barras de sondeo extrapesadas con capacidad para absorber el punto de transición y a continuación las barras de perforación hasta llegar a la profundidad requerida o hasta que surja la necesidad de un cambio de trépano, ya sea por su desgaste o cambio de la formación. Una vez dada cualquiera de

estas situaciones se procede a sacar el trépano, para lo que se debe extraer del pozo toda la tubería empleada para llegar hasta el fondo. Las barras de sondeo y los portamechas tienen un largo promedio aproximado de 9,45 m cada uno, lo cual facilita y acelera su proceso de extracción y bajada (carrera); se maneja en tramos dobles o triples (2 ó 3 tubos por vez), según lo permita la altura de la torre o mástil del equipo de perforación seleccionado, los que se estiban parados dentro del mástil y asegurados en el puente de enganche.

Para volver al fondo del pozo, ya sea para continuar perforando, acondicionarlo o realizar cualquier otra operación, se invierte el proceso de extracción de la tubería bajando los tramos previamente acondicionados dentro del mástil.

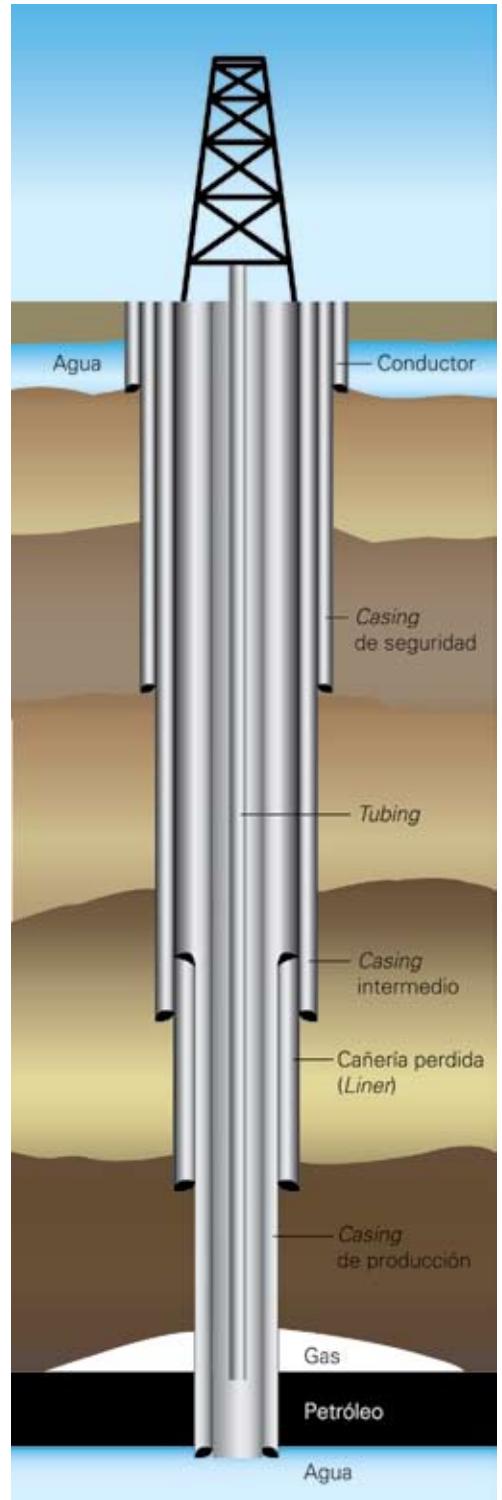
La circulación de fluido que se iniciara al comenzar la perforación sólo debe interrumpirse al agregar cada tubo, o durante el tiempo que dure la carrera que se genere por cambio del trépano o fin del tramo. El pozo debe mantenerse siempre en circulación o lleno: la falla o descuido en el control de esta condición de trabajo puede ocasionar desde el derrumbe del pozo hasta el total descontrol de la presión de las potenciales capas productivas que se atravesasen, generando surgencias fuera de control (*blow outs*) con consecuencias tales como incendios, pérdidas de equipos, de vidas humanas y daños al ambiente.

La dirección del pozo debe ser mantenida dentro de los límites permisibles para alcanzar el objetivo, el cual en algunos casos puede llegar a encontrarse a 7.000 m de profundidad. El buzamiento (inclinación) de los sedimentos y su distinta dureza tienden constantemente a desviar el curso de la perforación, razón por la cual raramente los pozos profundos son verticales y derechos.

La velocidad de penetración de la perforación se incrementa cargando peso adicional de los portamechas sobre el trépano lo cual se obtiene haciendo variar la tensión en las barras de sondeo desde la superficie.

Por otro lado, la tendencia del pozo a desviarse se incrementa con el aumento de peso sobre el trépano, lo cual normalmente se trata de contrarrestar con conjuntos de fondo especialmente diseñados al efecto.

El entubado del pozo con cañerías es otra de las operaciones que es necesario realizar con el equipo perforador durante la perforación de un pozo y ellas son: de seguridad, intermedias y/o de producción, y posterior cementación de las cañerías. Normalmente y con el fin



→ Esquema general de un pozo terminado

de poder asegurar el primer tramo de la perforación, por ejemplo entre 0 y +/-500 m, donde las formaciones no son del todo consolidadas (arenas, ripios), hay que proteger capas acuíferas para evitar su contaminación con los fluidos de perforación y proveer de un buen anclaje al sistema de válvulas de control de surgencias (que normalmente se instala al finalizar esa primera etapa). Se baja entonces el caño guía que consiste en un tubo (*casing*), de diámetro interior mayor al del trépano a emplear en la siguiente etapa, y se lo asegura mediante el desplazamiento de una lechada de cemento que se bombea por dentro de la tubería hasta que la misma desborda y cubre el espacio entre el caño guía y las paredes del pozo. Una vez finalizada la perforación del siguiente tramo y así hasta llegar a la profundidad final, se bajan otras cañerías intermedias y se procede a asegurarlas siguiendo el proceso de cementación descrito para el primer tramo, pero sin hacer llegar el cemento hasta la superficie. Estas tuberías así cementadas aíslan al pozo de las formaciones atravesadas.

Alcanzada la profundidad de alguna formación de interés y/o al llegar a la profundidad final programada, se retira una vez más la columna perforadora y se procede a correr lo que se conoce como registros eléctricos (perfilaje) a pozo abierto. Dichos registros, que se realizan mediante herramientas electrónicas especiales antes de bajar la cañería de aislación, se bajan al pozo por medio de un cable compuesto por uno o varios conductores. Los registros miden conductividad eléctrica, radioactividad natural o inducida y velocidad de tránsito de sonido a través de las distintas formaciones a medida de que las diferentes sondas recorren el interior del pozo. Se puede además, y también mediante otra herramienta especial que se baja con el mismo cable, tomar muestras de terreno y/o del fluido que contengan las capas que se consideren de interés a fin de corroborar y/o ampliar la información que se obtuvo antes de la perforación del pozo con los trabajos de prospección geológica y geofísica, como así también de pozos o áreas vecinas. La información de estos registros es de vital importancia para definir si el trabajo en el pozo debe continuarse hasta su posterior ensayo o si debe abandonarse. Si la información recogida confirma la posible presencia de hidrocarburos, se baja y cementa la cañería aisladora. Esta última operación cierra por lo general la cadena de tareas que se cumplen durante la perforación de un pozo de petróleo y/o gas, salvo que se decida ensayarlo y completarlo con el equipo de perforación.



Especialmente en los pozos de exploración o avanzada, en las ocasiones en que el interés geológico lo justifique, se puede suspender la perforación para extraer muestras denominadas testigos de los terrenos atravesados, con la finalidad de estudiar sus propiedades petrofísicas en el laboratorio; para ello se extrae el sondeo y se cambia el trépano por una herramienta perforadora denominada corona sacatestigos, la cual es bajada hasta el fondo del pozo para perforar la longitud que permita el tubo de la herramienta (que es de entre 6,00 y 9,00 m) y luego sacar el sondeo para recuperar el testigo y continuar la perforación con trépano. Las muestras o testigos así obtenidos están compuestos de las rocas existentes en la profundidad de la cual fueron extraídas y tienen generalmente la forma de un cilindro de 4" de diámetro por aproximadamente 6,00 a 9,00 m de longitud. La información obtenida en el laboratorio de estos testigos suministra, entre otros aportes, parámetros para ajustar la interpretación de los perfiles.

Antes del inicio de la perforación de un pozo para petróleo y/o gas, se debe proceder a programarlo. Las características, alternativas y opciones más comunes a analizar son:

- Ubicación: en tierra o en agua, en selva o en desierto, en áreas pobladas o despobladas.
- Profundidad: un pozo puede alcanzar hasta más de 10 km de profundidad. Como consecuencia varían la temperatura, presiones de formación y compactibilidad del terreno. Verificar la capacidad requerida para el equipo de perforación, a saber: la potencia disponible en el cuadro de maniobras, capacidad portante del mástil, potencia, capacidad de bombeo de lodo, capacidad y calidad del sistema de tratamiento de la inyección, etc.
- Características del terreno a atravesar, información sobre pozos vecinos, para definir en consecuencia el programa de trépanos, hidráulica e inyección.
- Geometría del pozo, que estará determinada por el diámetro de las cañerías a entubar y sus programas de cementación, que definirán el diámetro de los trépanos a utilizar. Si se trata de un pozo vertical, en el caso de que sea direccional, con qué tipo de curva, o vertical y luego horizontal de alcance extendido.
- Logística: distancia a la fuente de alimentación de agua, a la provisión de combustibles y proximidad de poblaciones que puedan brindar apoyo a la perforación.

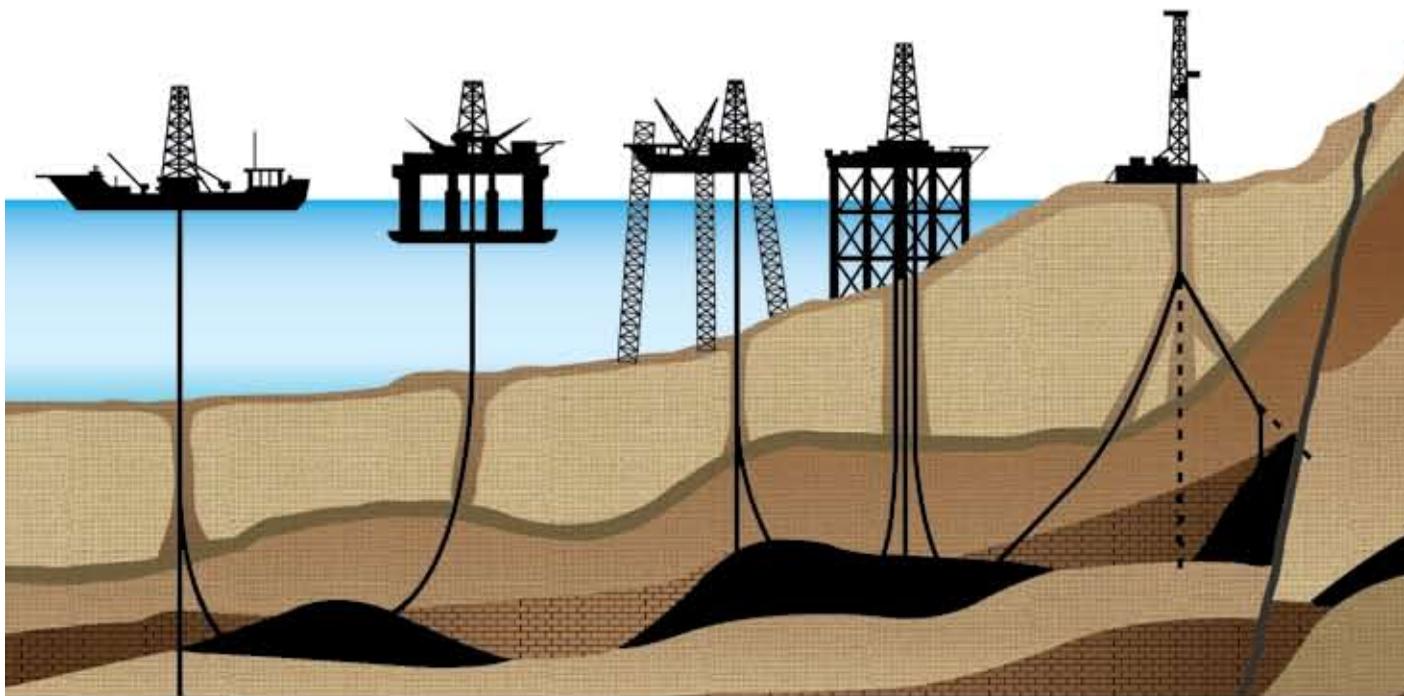
- Seguridad: independientemente de los elementos de seguridad de norma que debe poseer todo equipo de perforación, hay que tomar los recaudos correspondientes para el caso en que sea necesario efectuar trabajos en caliente (por ejemplo trabajos de soldadura en presencia de gases combustibles); posible exposición al gas sulfhídrico (H_2S , venenoso), etc.
- Medio ambiente: se deben reducir las alteraciones al mínimo. Una vez completados los trabajos es necesario reacondicionar la locación del equipo, dejando el lugar limpio de desechos y/o contaminantes. Disposición de los recortes (*cuttings*), residuos sólidos del lodo e hidrocarburos.

Opciones de equipo

Existe una gran variedad de equipos de perforación cuya selección está sujeta a las necesidades que surgen del programa de perforación: una determinada potencia instalada, capacidad de izaje, tipo y capacidad de sus bombas, etc. El análisis de estas

→

Perfil de las variaciones que se enfrentan en la perforación (terrestre y marina)



Pozo sencillo de exploración

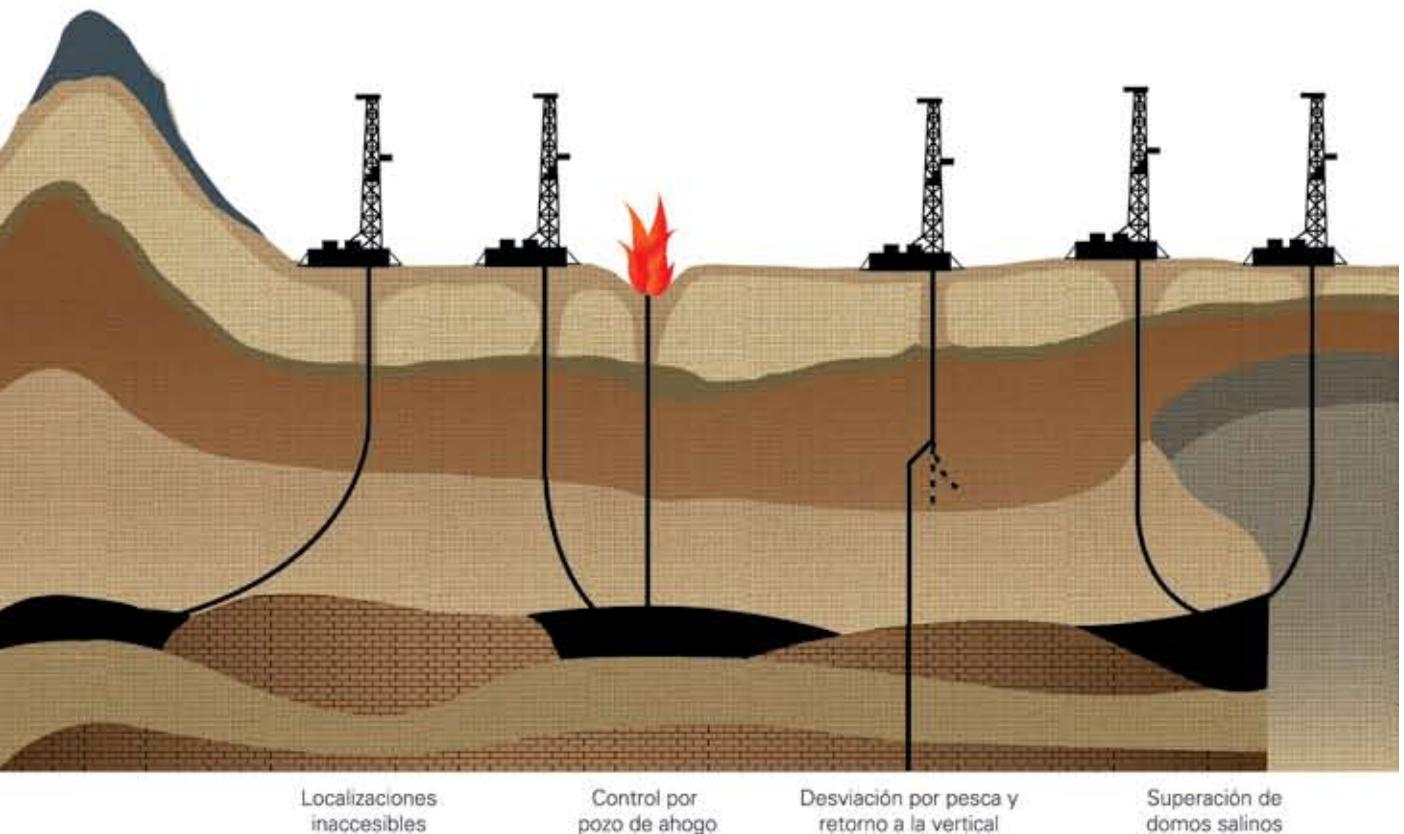
Pozo múltiple desde isla artificial

Perforación submarina desde la costa y para superación de fallas

características permitirá identificar al equipo ideal. Independientemente del rango de profundidad, hay que tener en cuenta si se debe perforar en yacimientos ubicados sobre el continente o si se estará obligado a montar el equipo sobre el agua.

Al respecto, existe una nueva clasificación: la de equipos para trabajos en tierra (*onshore*) y los de costa afuera (*offshore*). Dentro de los equipos para operar en tierra, existen los convencionales, cuyo traslado se realiza desarmado por completo mediante camiones; autoportantes, en los que el equipo con su mástil se autotransportan; y los helitransportables, que están en su totalidad diseñados en unidades o secciones de peso y tamaño tales que permiten su transporte por helicóptero.

En cuanto a los equipos marinos –aquellos que están diseñados para operar sobre distintas profundidades de agua y/o zonas pantanosas– la variedad de construcción es mucho más amplia y casi a medida para cada situación. Por ejemplo: barcasas, plataformas flotantes para operar en pantanos, lagunas o lagos; equipos que se apoyan sobre el lecho del mar (*jack up*) y que se autoelevan



por medio de gatos; semisumergibles que trabajan en flotación y controlan su sumergencia por medio del llenado y vaciado de cámaras; plataformas fijas; plataformas prefabricadas cuya instalación puede permanecer en sitio una vez perforado el pozo; y finalmente barcos de perforación. La perforación costa afuera es una especialidad: si bien el sistema de perforación es similar al de tierra, su ubicación en el lugar y sus instalaciones son más costosas; se requieren herramientas especiales y su logística es mucho más compleja, todo lo que ocasiona mayores costos que la perforación propiamente dicha. El alquiler de un equipo para perforación profunda en tierra, de 5.500 a 6.500 m, puede llegar a 35.000 U\$S/día, y un equipo costa afuera para perforar a similar profundidad pero en aguas de 350 m de profundidad (que no es el máximo actual, ya que se opera en aguas de hasta 2.000 m de profundidad) llega hasta 150.000 U\$S/día, sin incluir el costo del apoyo logístico que consiste en helicópteros, buzos, barcos/remolcadores/almacenaje; sistemas de posicionamiento dinámico; alojamiento, alimentación y cuidado del personal (médicos y enfermeros) que se embarca por períodos de 14 a 28 días. Es importante destacar que en las plataformas que operan a mayor profundidad el alquiler puede llegar a los 650.000 U\$S/día y en los buques de perforación (*drill ships*) a 250.000 U\$S/día.

Desarrollos tecnológicos

- *Perforación direccional.* Esta técnica permite perforar bajo control pozos verticales y en ángulos de hasta 89° y terminarlos a 90°, o sea con una traza horizontal. Con una curva de ángulo progresivo o en “S”. Se comienza verticalmente, se continúa en ángulo y se regresa o no a la vertical volviendo a caer.
- *Registros de información de capa en tiempo real.* El MWD permite conocer la inclinación, el **azimut** y el buzamiento de las capas del pozo que se está perforando; el LWD permite registrar valores de conductividad y densidad de las formaciones que se atraviesan. Estas tecnologías son costosas pero optimizan la operación y al final resultan en un ahorro de tiempo especialmente en pozos exploratorios o costa afuera en los que la información en tiempo real es una necesidad.
- *Motores de fondo.* Se trata de motores hidráulicos accionados



→

Costo de perforar un pozo en la República Argentina en distintas cuencas y a diferentes profundidades

| Cuenca | Profundidad promedio (MBBP) | Tiempo estimado de operación (días) | Costo aproximado del equipo (*) (U\$S) | Costo aproximado total (*) (U\$S) |
|---|-----------------------------|-------------------------------------|--|-----------------------------------|
| Austral- <i>onshore</i> (Tierra del Fuego-Santa Cruz) | 3.300 | 25 | 636,4 | 2.100.000 |
| Cuyana (Mendoza) | 3.700 | 30 | 702,7 | 2.600.000 |
| Neuquina (Neuquén-Mendoza) | 1.400 | 7 | 300,0 | 420.000 |
| Noroeste (Salta-Jujuy) | 5.080 | 284 | 7.360,2 | 37.390.000 |
| San Jorge (Chubut-Santa Cruz) | 2.000 | 20 | 420,0 | 840.000 |

(*) Estos valores incluyen los siguientes costos: **Equipo de perforación:** incluido personal, combustible, DTM, seguros y *companyman*. **Servicios varios perforación:** perfilaje, cementación, *top drive*, lodo, control direccional, motores de fondo instrumental para registro de parámetros de perforación, control geológico, extracción de testigos, componentes de la BHA, pescas, locación y caminos, etc. **Materiales perforación:** trépanos, agua, drogas y aditivos para el lodo, *casing*, cemento, cabeza de pozo, colgadores de *liner*, etc. **Equipo de terminación:** incluido personal, combustible, seguros, DTM y *companyman*. **Servicios terminación:** perfilaje, punzado, alquiler de *packers*, cementación, estimulación y pescas. **Materiales de terminación:** armadura de surgencia, *tubing*, *packers*, anclas, aditivos para el lodo, cemento, fluidos de estimulación, arena de fractura, etc.

mediante un tornillo tipo “Moyno” energizado por la circulación del fluido de perforación; transmiten mayor velocidad de rotación y considerable **par motor**, lo que permite aliviar el sistema de rotación de la columna desde la superficie y hasta el motor, convirtiéndose en una herramienta indispensable en la perforación de pozos direccionales y horizontales, cuando por el ángulo de la trayectoria del pozo los esfuerzos de torsión son mayores.

- **Turbodrill.** Es una herramienta de perforación donde la potencia para rotar el trépano, en lugar de provenir de la superficie como en el sistema rotary, es generada en el fondo del pozo por una turbina accionada por el lodo de perforación. La velocidad de rotación de la turbina es considerablemente más elevada que la de los motores de fondo y aventaja a éstos en la cantidad de horas de rotación y la temperatura que puede soportar.

Equipos hidráulicos

La robotización de los equipos de perforación y atenuación del impacto ambiental, son dos ideas sobre las cuales la industria viene trabajando desde hace bastante tiempo, hasta que finalmente con los equipos hidráulicos se ha logrado concretar ambas metas; por ahora son equipos pequeños y medianos para ser utilizados en el desarrollo de yacimientos marginales, *re-entry* (pozo entubado al cual se le practica una ventana en la cañería para perforar un nuevo pozo dirigido) y reparación de pozos.

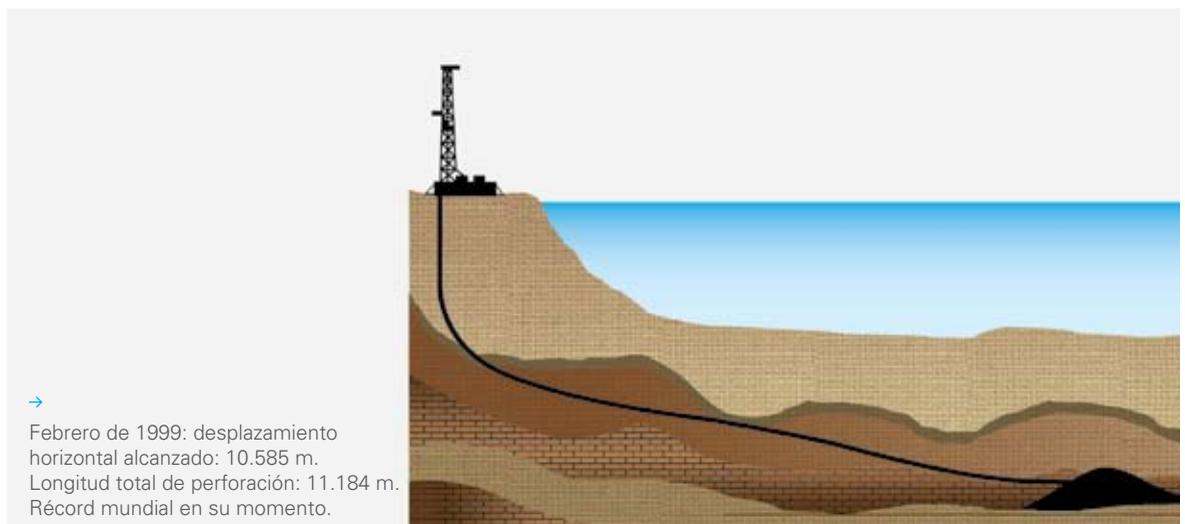
El bajado, sacado, la rotación del sondeo y la entubación de *casings* en estos equipos es realizada por medio de dispositivos hidráulicos con la única intervención humana del hombre que opera el panel de control.

Las ventajas que tienen estos equipos en comparación con los convencionales son las siguientes:

- Desmontaje, transporte y montaje (DTM) entre locaciones en menor tiempo.

El equipo propiamente dicho, los motores y las bombas van montados en semirremolques de tres ejes, con lo cual los componentes a desarmar y volver a armar son mínimos.

- La superficie de la locación es aproximadamente un 50% menor que la de un equipo convencional.
- El equipo tiene un elevado nivel de automatización que abrevisa sensiblemente los tiempos de las maniobras y la cantidad de accidentes personales.



Febrero de 1999: desplazamiento horizontal alcanzado: 10.585 m.
Longitud total de perforación: 11.184 m.
Récord mundial en su momento.

- Trabaja con la mitad de personal que un equipo convencional.
- Reduce la emisión sonora, dado que tanto el trailer del equipo como el de los motores son isonorizados.
- Utiliza un sistema para el lodo de “locación seca”, lo cual genera menor volumen de material contaminante.

El costo de perforar un pozo

Como final al tema “perforación de un pozo para producir petróleo y/o gas”, es importante dar a conocer ahora cuál es el costo o la inversión necesaria para completar esta etapa. Tener en cuenta que esta inversión se puede perder, ya que no siempre que se ubica y se perfora un pozo éste resulta productivo, es sólo un paso dentro de la búsqueda de hidrocarburos, ya que el objetivo no ha sido alcanzado hasta que el pozo sea ensayado y puesto en producción.

Si bien es difícil poder dar costos precisos de perforación, ya que éstos dependen directamente de la profundidad del pozo a perforar, la complejidad técnica de la perforación y del tipo de sondeo del que se trate (exploración, explotación/tierra o explotación/costa afuera) en el cuadro de la página 93 brindamos costos aproximados de perforación en las distintas cuencas productivas de nuestro país.

Importante desplazamiento lateral

En febrero de 1999, un equipo para trabajos en tierra firme, instalado en Tierra del Fuego, perforó verticalmente hasta 1.690 m de profundidad, para luego, aplicando las más modernas técnicas de la perforación direccional, lograr desplazarse horizontalmente 10.585 m, con una longitud total perforada de 11.184 m, récord mundial de longitud perforada. Este significativo logro se pudo concretar gracias a la contribución de diferentes y modernas tecnologías que van desde la sísmica 3D hasta trépanos de diseño especial, pasando por sistemas de registro permanente de parámetros de perforación, información en tiempo real de la posición relativa del trépano y una correlación permanente del nuevo pozo con la estructura del yacimiento mediante el registro –también en tiempo real– de las calidades y cualidades de la formación atravesada durante un tiempo que fue récord en el mundo.

A la suma de estas herramientas se agregó en primer término el factor humano, con técnicos con experiencia en este tipo de proyectos en el resto del mundo, lo que permitió una correcta información y adecuada aplicación de las nuevas tecnologías. Para tener una idea más aproximada, hay que pensar que la traza de este pozo equivale a comenzar a perforar en Plaza de Mayo para llegar a un yacimiento ubicado al 8000 de Avenida Rivadavia (Floresta).

Nótese que la aplicación de la última tecnología, que coincide en ser la más onerosa, permitió lograr, con un equipo para trabajos en tierra, algo para lo que normalmente se requiere la instalación de una unidad costa afuera, con la consiguiente reducción de costos en equipo, apoyo logístico, facilidades de producción, etc.

La terminación, el equipamiento

Una vez finalizadas las tareas de perforación y desmontado el equipo, se procede a la terminación y reequipamiento del pozo, que consiste en una serie de tareas que se llevan a cabo mediante el empleo de una unidad especial que permite el ensayo y posterior puesta en producción de aquél. Dicha unidad consiste

→

Costo estimativo de terminar un pozo en distintas cuencas de la República Argentina (*)

| Cuenca | Profundidad promedio (MBBP) | Tiempo estimado de operación (días) | Costo aproximado del equipo (U\$\$/día) | Costo aproximado total (U\$S) |
|---|-----------------------------|-------------------------------------|---|-------------------------------|
| Austral- <i>onshore</i> (Tierra del Fuego-Santa Cruz) | 3.300 | 4/5 | 25.000 (**)35.000 | 125.000/175.000 |
| Cuyana (Mendoza) | Norte 3.000 Sur 1.800 | 4/5 | 20.000 | 100.000 |
| Neuquina (Neuquén-Mendoza) | 3.200 (Loma La Lata) | 4/5 | 20.000 | 100.000 |
| Noroeste (Salta-Jujuy) | 3.000 | 4/5 | 40.000/50.000 | 250.000 |
| San Jorge (Chubut-Santa Cruz) | 2.000/2.800 | 4/5 | | 100.000/175.000 |

(*) Terminaciones de pozos de desarrollos normales (**) *Winterized*, acondicionados para operar con temperatura.

en un equipo de componentes similares al de perforación pero normalmente de menor potencia y capacidad ya que trabaja, en principio, dentro del pozo ya entubado, y por consiguiente, con menores diámetros, pesos y volúmenes que los utilizados durante la perforación, y por consiguiente menor riesgo. El agregado de un mecanismo de pistoneo le permite la extracción del fluido que contiene o produce el pozo por medio de un pistón con capas que sube y baja por el interior de la tubería de producción (*tubing*), conectado al extremo de un cable que se desenrolla y enrolla en longitudes previstas, según la profundidad, sobre un carretel movido mecánicamente. Este sistema puede incluir la surgencia natural del fluido (petróleo, gas y/o agua), si la presión de la capa así lo permite. Mediante esta operación se pueden determinar el caudal y el tipo de fluido que la capa ensayada pueda llegar a producir por pistoneo o por surgencia.

Puede observarse que la operación de terminación implica una sucesión de tareas más o menos complejas según sean las características del yacimiento (profundidad, presión, temperatura, complejidad geológica, etc.) y requerimientos propios de la ingeniería de producción. De la calidad de los procesos para satisfacer estos requerimientos dependerá el comportamiento futuro del pozo para producir el máximo potencial establecido por la ingeniería de reservorios.

Con toda la información adquirida durante la perforación del pozo es posible determinar con bastante certeza aspectos que contribuirán al éxito de una operación de terminación, tales como:

- Profundidad, espesor y propiedades petrofísicas de la zona de interés.
- Detección de posibles agentes perturbadores de la producción del pozo (como por ejemplo: aporte de arena).
- Identificación de capas con potencial para generar problemas (presencia de acuíferos, capas con gases corrosivos, etc.).

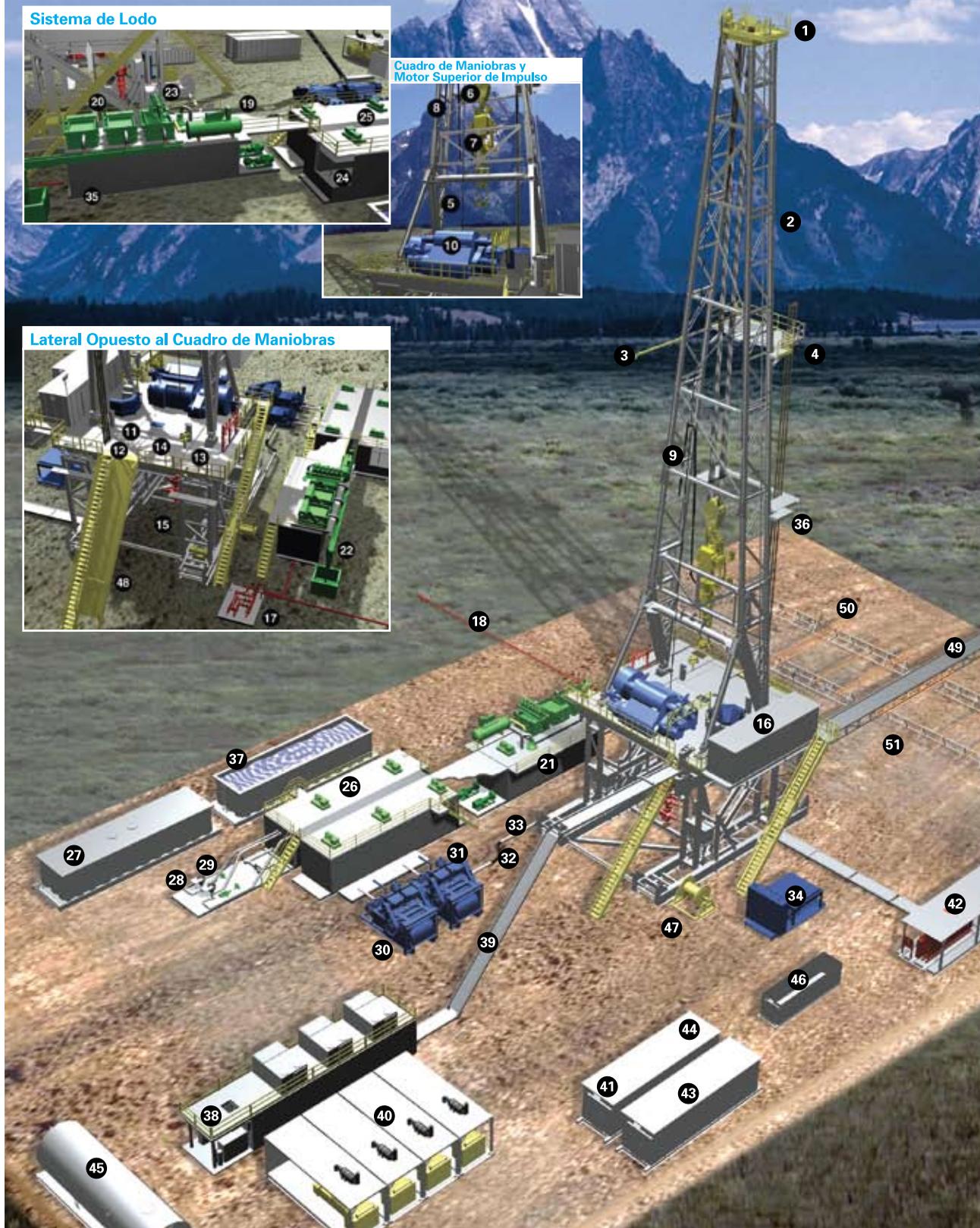
Cronología de la terminación

Una vez montado el equipo de terminación, se procede en primer lugar a la limpieza del pozo y al acondicionamiento del fluido de terminación, para luego, mediante los llamados “perfiles a pozo entubado”, generalmente radiactivos y acústicos, precisar respectivamente la posición de los estratos productivos, previamente identificados





Equipo moderno para la perforación de pozos profundos



Gentileza de National Oilwell Varco (NOV)



Referencias

1. Corona
2. Mástil
3. Pluma del cable de maniobras
4. Puente de enganche
5. Cable de aparejo
6. Motón de aparejo
7. Motor superior de impulso (*top drive*)
8. Manga rotary
9. Tubería vertical del lodo (*standpipe*)
10. Cuadro de maniobras
11. Consola de comando
12. Esquinero apoyo sondeo
13. Piso de trabajo
14. Mesa *rotary*
15. Subestructura
16. Casilla del perforador
17. Múltiple para ahogo del pozo (*choke manifold*)
18. Línea al quemador de gas
19. Desgasificador
20. Zarandas vibratorias
21. Separador de gas del lodo
22. Descarga del *cutting* (*cuttings*)
23. Separador de sólidos del lodo
24. Escopetas removedoras del lodo
25. Agitadores del lodo
26. Piletas del lodo
27. Materiales para el lodo
28. Tolva para preparación del lodo
29. Bombas mezcladoras del lodo
30. Bombas principales del lodo
31. Amortiguadores de pulsaciones
32. Mangas *vibrator*
33. Línea de impulsión del lodo
34. Unidad de potencia del *top drive*
35. Tanque de control de nivel del pozo (*trip tank*)
36. Peine para el *tubing*
37. Tanque de agua para la perforación
38. Casilla de rectificación y distribución de potencia (SCR System)
39. Bandeja para el cableado de potencia
40. Grupos electrógenos de C. Alterna
41. Casilla depósito de repuestos
42. Acumulador para accionamiento de las BOP
43. Casilla taller
44. Casilla de repuestos para las bombas de lodo
45. Tanque de combustible
46. Batea con accesorios de perforación
47. Bobina con el cable para el aparejo
48. Rampa con escalera
49. Planchada
50. Barras de sondeo
51. Caballetes para tubulares

por los “perfiles a pozo abierto”, como así también la posición de las cuplas de la cañería de entubación, y por otra parte la continuidad y adherencia del cemento, tanto a la cañería como a la formación.

Habiéndose determinado los intervalos de interés, correlacionado los perfiles a pozo abierto, y entubado y comprobado la calidad de la cementación, es necesario poner en contacto con cada estrato seleccionado con el interior del pozo mediante el “punzamiento” o perforación del *casiny* y del cemento para comunicar la capa con el interior de la cañería entubada. Esto se realiza mediante cañones con “cargas moldeadas” unidas por un cordón detonante activado desde la superficie mediante un cable especial.

Cada uno de los estratos punzados es ensayado para determinar los volúmenes de fluido que aporta, así como la composición y calidad de los mismos (petróleo, gas, porcentaje de agua). Esto se realiza mediante “pistoneo” por el interior del *tubing* o “cañería de producción”. Se determina así si la presión de la capa o estrato es suficiente para lograr el flujo hacia la superficie en forma natural o si deben instalarse sistemas artificiales de extracción.

Puede suceder que durante los ensayos se verifique que existen capas sin suficiente aislación entre sí por fallas en la cementación primaria. En estos casos se realizan cementaciones complementarias, aislando mediante empaquetadores (*packers*) el tramo correspondiente al pozo.

Cuando la diferencia de propiedades de las distintas capas así lo justifica, se puede recurrir al tipo de terminación “múltiple”, que



cuenta con dos columnas de *tubing* para producir dos intervalos diferentes, quedando también la alternativa de producir por el “espacio anular” entre el *casing* y los dos *tubing* un tercer intervalo. También es de norma, aunque muy poco frecuente, la producción triple mediante tres cañerías de producción. Para que una terminación múltiple se pueda realizar, deberá haber sido prevista al momento de la programación de la geometría del pozo.

Para el caso de terminación múltiple con dos o tres cañerías, el equipamiento debe incluir no solamente empaquetadores especiales, sino también cabezales de boca de pozo (en la superficie) de diseño particular, los que permiten el pasaje múltiple de cañerías. Por otra parte, el equipo de intervención del pozo o *workover* debe contar con herramientas especiales para maniobrar con múltiples cañerías a la vez, por lo que estas maniobras de intervención son mucho más riesgosas y delicadas y se requiere una más cuidadosa programación.

Nuevas técnicas en búsqueda de mejor productividad, tales como las descriptas para perforar pozos direccionales, han desarrollado equipos y materiales que permiten realizar la terminación y puesta en producción de pozos multilaterales con el acceso a varias capas de un mismo pozo, o acceso a una capa remota mediante un pozo extendido horizontalmente.

En casos de baja productividad de la formación, ya sea por la propia naturaleza de ésta o porque ha sido dañada por los fluidos de perforación o por la cementación, o incluso por el fluido de terminación, la formación productiva debe ser estimulada. Los procedimientos más utilizados son: la acidificación y la fracturación hidráulica.

La acidificación consiste en la inyección o presión de soluciones ácidas que penetran en la formación a través de los punzados, disolviendo los elementos sólidos que perturban el flujo de los fluidos.

La fracturación hidráulica consiste en inducir la fracturación de la formación mediante el bombeo a gran caudal y presión de un fluido que penetra profundamente en la formación, provocando su ruptura y llenando simultáneamente la fractura producida con un sólido que actúa como agente de sostén. El agente generalmente utilizado es arena de alta calidad y granulometría cuidadosamente seleccionada que, por efecto de un mejoramiento artificial de la permeabilidad, facilitará el flujo desde la formación hacia el pozo a través de la fractura producida.

La necesidad de bajar costos en zonas de pozos de baja pro-

ducción llevó a utilizar en forma creciente técnicas o materiales que redujeran tiempos de maniobra y costos de equipamiento. La búsqueda de menores costos de equipamiento en los casos indicados llevó, condicionando la geometría de los pozos a la producción esperada, a perforar pozos de poco diámetro denominados *slim-holes*. Estos pozos de diámetro reducido son terminados generalmente bajo el sistema *tubing-less*, que consiste en entubar el pozo abierto con tubería de producción (*tubing*), y luego cementarlo aplicando el mismo procedimiento que para un revestidor convencional.

El *coiled-tubing* y la *snubbing unit* son un material y una herramienta de trabajo de uso cada vez más frecuente: aunque se desarrollaron hace poco más de un par de décadas, las nuevas técnicas de perforación, terminación e intervención de pozos necesitan utilizarlos cada vez más. El *coiled-tubing*, como su nombre lo indica, consiste en un tubo metálico continuo construido en una aleación especial que permite que se lo trate como a un tubo de PVC (Cloruro de Vinilo Polimerizado), pero que posee las mismas características físicas de una tubería convencional de similar diámetro, con la siguiente ventaja: no es necesario manipularlo, ni estibarlo tramo por tramo para bajarlo o retirarlo del pozo, ya que se lo desenrolla o enrolla en un carretel accionado mecánicamente como si fuera una manguera. Esta última característica permite un mejor y más rápido manejo y almacenaje. Este tubo tiene múltiples aplicaciones tanto en la perforación de pozos dirigidos como en la terminación y reparación de éstos.

La *snubbing unit* es una máquina hidráulica que, reemplazando o superpuesta a una convencional, permite efectuar trabajos bajo



presión, o sea sin necesidad de circular y/o ahogar al pozo para controlarlo. Esta condición de trabajo, que además de reducir tiempo de operación y costos ayuda a conservar intactas las cualidades de la capa a intervenir, consiste en la extracción o corrida de tubería mediante un sistema de gatos hidráulicos que mueven alternativamente dos mesas de trabajo en las que están ubicados juegos de cuñas accionados de manera hidráulica o neumática, que retienen o soportan la columna de tubos según sea necesario. Este sistema mecánico de manejo de tubería está complementado con un arreglo de cuatro válvulas de control de pozos, también de accionamiento hidráulico, que funcionan alternativamente con la ayuda de un compensador de presiones, lo que posibilita la extracción o bajada de la tubería bajo presión.

El empleo conjunto de estas dos herramientas permite realizar tareas especiales de perforación.

El factor humano

Detrás de cada equipo que perfora, termina o repara un pozo, existe un conjunto de personas con distintas especialidades: ingenieros, geólogos, técnicos, obreros especializados, obreros. Tienen responsabilidades directas: programación, supervisión, operación y mantenimiento, e indirectas: las de las compañías especializadas en la provisión de servicios técnicos, productos químicos y fluidos de perforación, unidades de mezcla y bombeo, unidades para correr registros eléctricos, provisión de trépanos y proveedores de servicios auxiliares como transporte de equipo, materiales, cargas líquidas, personal, etc.

La suma del personal directo e indirecto involucrado en la perforación de un pozo, cuando se trata de perforación en tierra en pozos de desarrollo, llega a tener entre noventa y cien personas; en la medida en que aumente la complejidad del trabajo, como por ejemplo en los pozos exploratorios profundos, pozos costa afuera, la cantidad de personal requerido puede llegar a duplicarse.

Un equipo perforador, de terminación o de reparación, opera las 24 horas del día, los 365 días del año, con personal que trabaja en turnos rotativos de 8 horas. Cuando el trabajo es en tierra, normalmente retorna periódicamente a su casa o al campamento. Cuando el trabajo es en el mar, también trabaja en turnos rotativos, pero en este caso el personal permanece a bordo por períodos que van de 14 a 28 días.

