

¿Cómo es la perforación horizontal?

Por Ing. Horacio Gabino Velasco

Una minuciosa descripción sobre el funcionamiento de este tipo de técnica y su evolución histórica.

Las consultas más frecuentes que suscita el tema de la perforación horizontal entre profesionales de la industria que no pertenecen a la especialidad de Perforación, indefectiblemente recaen alrededor de dos asuntos: si los pozos horizontales se realizan con los mismos equipos que el resto de los pozos, y cómo se logra que el pozo siga la trayectoria deseada.

En este trabajo intentaremos resolver las dudas más comunes al respecto.



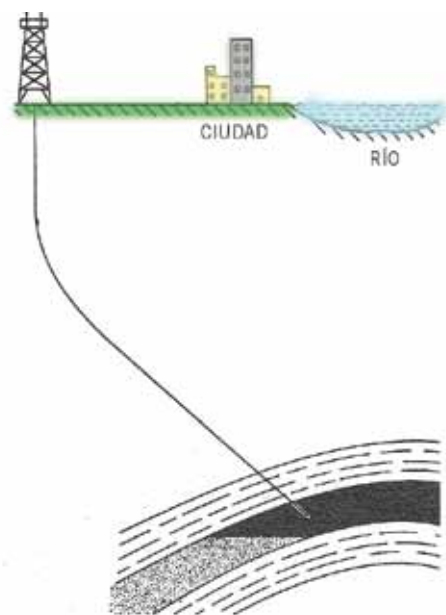
estar provisto de un *walking system* hidráulico o rieles para su desplazamiento –*skidding system*–, montados, entre locaciones ubicadas a corta distancia una de otra para la perforación de los pozos que componen los *clusters* no convencionales.

¿Cómo se consigue que el pozo siga una trayectoria horizontal orientada?

Utilizando la Ingeniería de perforación direccional. La finalidad de esta ingeniería es la de perforar un pozo desviado de la vertical dirigido hacia un objetivo determinado, y algunos de sus usos pueden ser:

- a. Localización inaccesible (figura 1).
 - Perforar hasta un objetivo alejado del eje vertical del equipo debido a que la locación en superficie no es accesible o económicamente prohibitiva.
 - Perforar pozos por debajo de edificios o por debajo de campos cultivados.
- b. Desviación (figura 2).
 - Sortear herramientas que, habiendo quedado en pesca, no han podido ser recuperadas.
- c. Perforación de fallas (figura 3).
 - Perforar a través o paralelamente a una falla.
- d. Perforar domos salinos (figura 4).
- e. Perforar desde locaciones en tierra hacia objetivos costa afuera.
- f. Perforar en el mar varios pozos desde una misma plataforma de perforación (figura 5).
- g. Perforación de pozos horizontales en *sweet spots* de yacimientos no convencionales (figura 6).

Un uso muy conocido de la perforación direccional es, sin dudas, la realización de pozos direccionales llamados “de alivio” (*relief well*) desde una ubicación segura en superficie hasta la capa que provoca la surgencia para el ahogo del eventual pozo descontrolado (*blow out*) (figura 7).



¿Los pozos horizontales para petróleo y gas se perforan con los mismos equipos que el resto de los pozos?

Sí, los pozos horizontales se perforan con los mismos equipos que utiliza la industria para la perforación de pozos verticales destinados a la explotación de hidrocarburos, y estos se seleccionan de acuerdo a los requerimientos de capacidad y potencia calculados en los correspondientes programas de perforación, con el equipamiento adicional necesario para cumplir esta tarea en particular, como

Figura 1. Localización inaccesible.

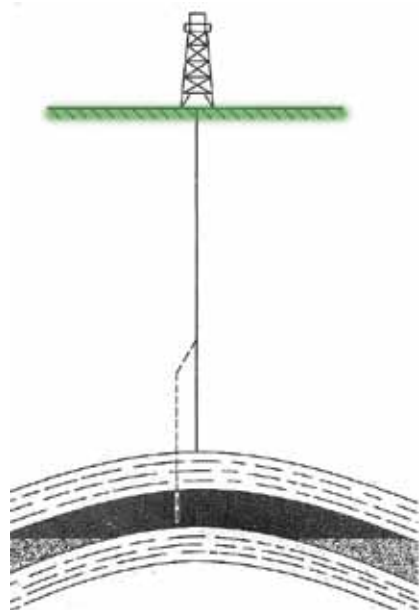


Figura 2. Desviación.

Haber desarrollado la tecnología, las herramientas y los instrumentos para la ejecución de un pozo horizontal es un logro muy importante de esta ingeniería. La ubicación del equipo de perforación en superficie y la profundidad de arranque de la perforación direccional o *KOP* (*kick off point*) estará determinada por la profundidad del punto elegido para entrar en la formación, que es el objetivo fijado y el incremento de la desviación a utilizar, con tecnología de última generación; para llegar desde la vertical hasta los 90° con un régimen uniforme del incremento de desviación de 15° cada 100 pies, se va a necesitar una curva de 400 pies de longitud (121 m).

La única herramienta de perforación direccional a pozo abierto disponible para alterar el curso de un pozo

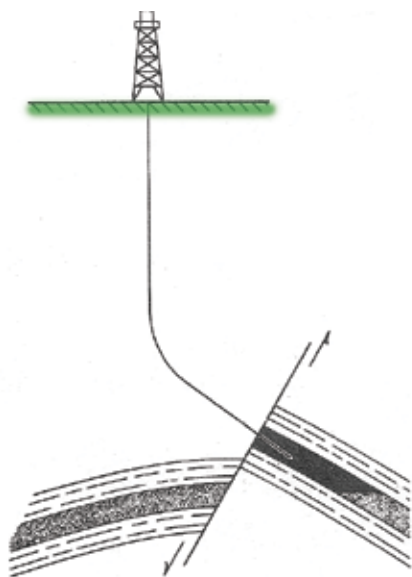


Figura 3. Perforación de fallas.

Profundidad medida	Profundidad vertical	Desviación	Ángulo de desviación
100'	100.00'	0.87'	1° 00'
200'	199.97'	3.49'	2° 00'
300'	299.87'	7.85'	3° 00'
400'	399.68'	13.95'	4° 00'
500'	499.37'	21.80'	5° 00'
600'	598.91'	31.38'	6° 00'
700'	698.27'	42.70'	7° 00'
800'	797.41'	55.75'	8° 00'
900'	896.31'	70.53'	9° 00'
1000'	994.94'	87.03'	10° 00'
1100'	1093.27'	105.25'	11° 00'
1200'	1191.26'	125.19'	12° 00'
1300'	1288.89'	146.83'	13° 00'
1400'	1386.13'	170.17'	14° 00'
1500'	1482.94'	195.21'	15° 00'
1600'	1579.30'	221.93'	16° 00'
1700'	1675.18'	250.33'	17° 00'
1800'	1770.55'	280.40'	18° 00'
1900'	1865.38'	312.13'	19° 00'
2000'	1959.64'	345.51'	20° 00'
2100'	2053.31'	380.53'	21° 00'
2200'	2146.35'	417.18'	22° 00'
2300'	2238.75'	455.45'	23° 00'
2400'	2330.45'	495.32'	24° 00'
2500'	2421.45'	536.79'	25° 00'
2600'	2511.71'	579.84'	26° 00'
2700'	2601.20'	624.46'	27° 00'
2800'	2689.90'	670.63'	28° 00'
2900'	2777.78'	718.35'	29° 00'
3000'	2864.82'	767.59'	30° 00'
3100'	2950.98'	818.34'	31° 00'
3200'	3036.25'	870.59'	32° 00'
3300'	3120.58'	924.32'	33° 00'
3400'	3203.97'	979.51'	34° 00'
3500'	3286.38'	1036.15'	35° 00'
3600'	3367.79'	1094.22'	36° 00'
3700'	3448.18'	1153.70'	37° 00'
3800'	3527.52'	1214.58'	38° 00'
3900'	3605.78'	1276.83'	39° 00'
4000'	3682.94'	1340.44'	40° 00'
4100'	3758.98'	1405.38'	41° 00'
4200'	3833.88'	1471.64'	42° 00'
4300'	3907.61'	1539.20'	43° 00'
4400'	3980.15'	1608.04'	44° 00'
4500'	4051.48'	1678.13'	45° 00'

(*sidetrack*) hasta los años '50 o '60 era la cuña desviadora (*whipstock*), introducida por John Eastman, pionero de la perforación direccional en 1934, para la extinción de pozos en *blowout* del Yacimiento Conroe (Texas) (figura 10).

La cuña desviadora consistía en un plano inclinado de acero con una longitud de 2 m y un ángulo de 3°, que servía de guía del trépano para desviar el pozo. La cuña se bajaba al pozo con el sondeo, al cual estaba vinculada por medio de un perno de corte, alojado en un sustituto que llevaba roscado en la parte inferior un trépano.

Se orientaba en superficie por geodesia y se bajaba al pozo manteniendo la orientación dada, y se apoyaba sobre un tapón de cemento reforzado con arena de fractura efectuado en el pozo a tal fin.

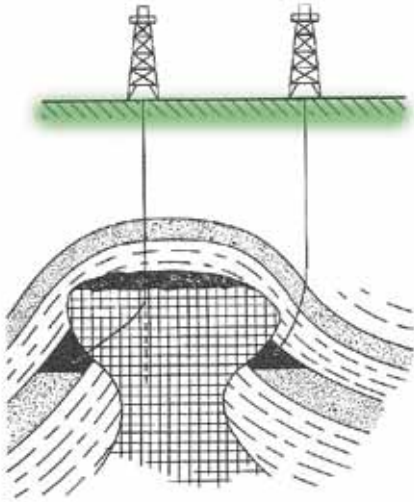


Figura 4. Perforación de domos salinos.

Se iniciaba la maniobra de desviación aplicando de 12 a 20 toneladas de peso para cortar el perno, con lo cual quedaba liberada la rotación y el desplazamiento del trépano hacia abajo y se perforaba un pozo de diámetro reducido (menor que el diámetro del pozo original); una vez perforados de 3 m a 5 m de pozo de diámetro reducido di-

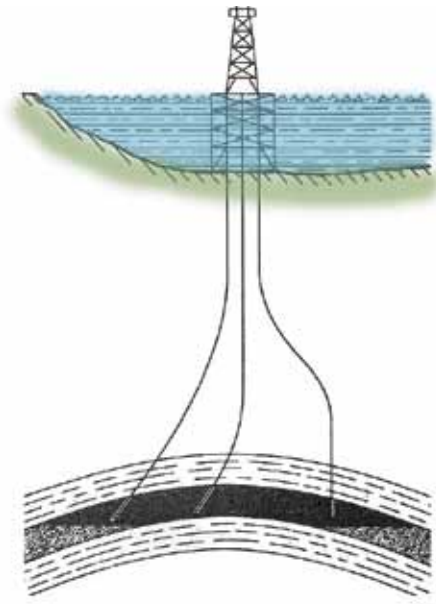


Figura 5. Múltiples pozos desde una plataforma marina.

rigido por debajo del extremo inferior de la cuña, se sacaba el sondeo, quedando la cuña en el pozo como guía para entrar en el pozo dirigido.

A continuación, se bajaba el sondeo con un trépano piloto (*hole opener*) del diámetro original, con una guía en

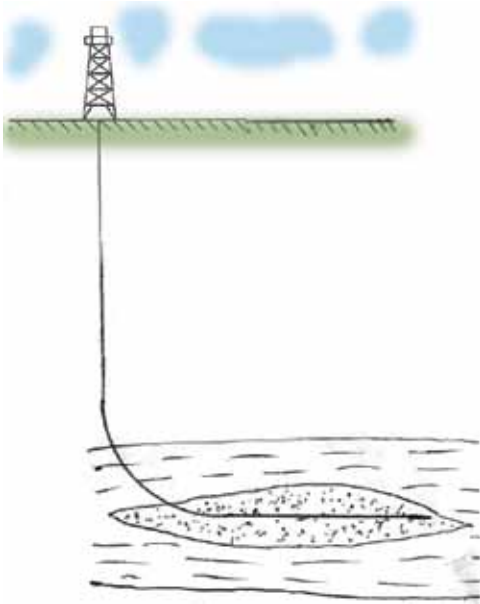


Figura 6. Perforación de pozos en *sweet spots*.

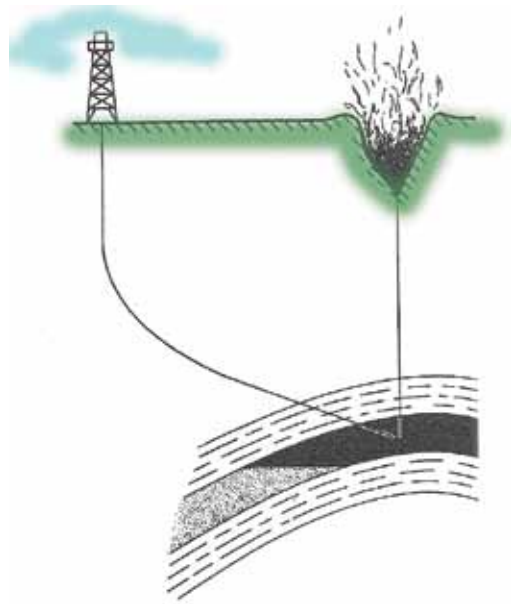


Figura 7. Perforación de pozos de alivio.

su extremo inferior del diámetro del pozo reducido, y se ensanchaba el pozo desviado; acto seguido se cambiaba el trépano piloto por uno convencional y se proseguía la perforación según el programa de la desviación.

El único instrumento al alcance de los perforadores para medir la inclinación del pozo, (pero no el rumbo) era el clinógrafo Totco, cuyo rango de medición puede ser de 0° - 8° o 0° - 16° , y que consiste en un péndulo con una aguja en su extremo inferior y un *timer* (temporizador), provisto de un mecanismo de relojería encargado de empujar un disco calibrado de cartón contra la aguja para registrar el ángulo del péndulo en reposo, que será el mismo ángulo de inclinación que el del pozo en esa profundidad. El Totco aún se sigue utilizando en la perforación de pozos verticales como control de rutina de la inclinación del pozo.

Registrador fotográfico

Hasta la década de 1960, en que el perforador tuvo acceso al Registrador Fotográfico de inclinación y acimut de disparo simple (*Single shot*), la única forma de conocer la orientación (acimut) de un pozo era a través del perfilaje de buzamiento (*dipmeter*). El acimut de un cuerpo es el ángulo formado por el plano vertical que pasa por el centro del cuerpo y el plano del meridiano. En topografía se mide convencionalmente de 0° a 360° desde el norte hacia el este en el sentido de rotación de las agujas del reloj.

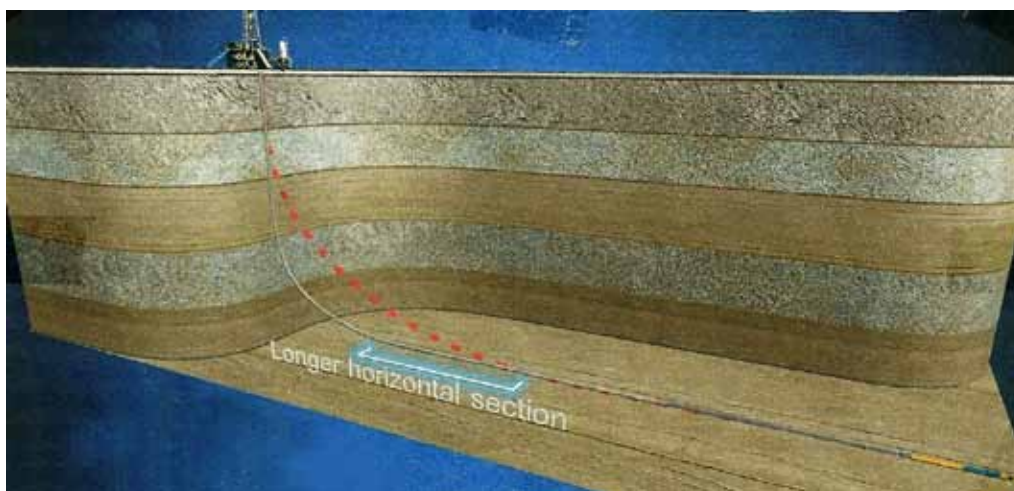


Figura 8. Sección horizontal más larga.

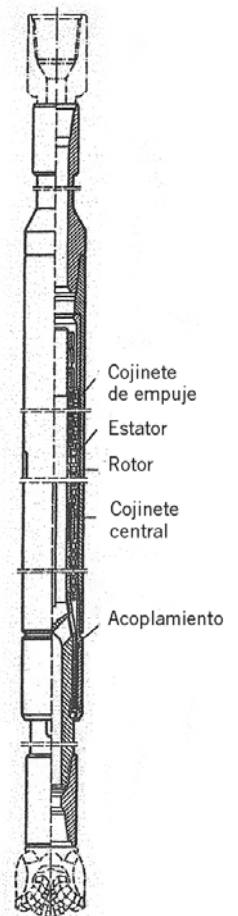


Figura 9a. Turbodrill.

El instrumento *Single shot* está constituido por una cámara fotográfica accionada por un temporizador, con una brújula flotante, diseñada de modo tal que puede fotografiarse el acimut simultáneamente con el extremo del péndulo y obtener una película fotográfica de 35 mm. Con posterioridad, se desarrolló el modelo *Multishot*, con el cual se pueden obtener varias fotografías tomadas a distintas profundidades.

El instrumento se baja dentro de una sonda con cable o alambre de medición por dentro del sondeo hasta la profundidad deseada, y se obtiene una fotografía de la brújula en el momento en el cual se había programado que el temporizador la pusiera en funcionamiento. Cuando se prevé la utilización del *Single Shot* o del *Multishot*, para evitar la interferencia del acero del sondeo en el campo magnético de la brújula del instrumento, se utilizan portamechas antimagnéticas en el conjunto de fondo (BHA).

En los '60, la compañía *Sperry Sun* incorporó a la Ingeniería direccional la Brújula giroscópica (llamada *GYRO* por los perforadores), que es accionada por un giróscopo que busca el norte y el consabido un péndulo accionado por acelerómetros para medir la inclinación del pozo. Puede registrar acimut e inclinación tanto en pozo abierto como en pozo entubado, dado que la presencia de acero no interfiere en su funcionamiento.

Frecuentemente se hace necesario, durante la perforación direccional, el cambio del ángulo de inclinación y/o el acimut del pozo. Y el cálculo para conocer las nuevas coordenadas se realiza por trigonometría esférica (actualmente, las compañías dedicadas al servicio de perforación direccional disponen del *software* necesario para dichos cálculos).

Motores de fondo

A finales de los '60 se produjo el advenimiento de los motores de fondo, que significaron un paso decisivo en el desarrollo de la Ingeniería de perforación direccional, dado que la rotación del trépano no depende de la rotación del sondeo para perforar, sino que lo hace rotar un motor de fondo accionado por la energía hidráulica proporcionada, por el lodo de perforación, al cual va roscado directamente el trépano (figuras 9a y 9b).

Aprovechando la propiedad de no depender de la rotación del sondeo para perforar de los motores de fondo los perforadores direccionales, idearon variar el acimut de la perforación incorporando un sustituto roscado, al que denominaron *bent sub* sobre el motor, el cual produce el desvío de su eje longitudinal respecto del eje longitudinal del sondeo en 2° o más, desviando asimismo el curso del pozo en relación con el acimut de esta curva, es decir que el pozo se habrá curvado 2° desde su dirección original. El motor de fondo más el *bent sub* relegaron definitivamente a un segundo plano a la cuña desviadora o *whipstock*.

En Europa, en tanto, se utilizaba intensamente el motor de fondo llamado Turbodrill, desarrollado en 1922 por el ingeniero ruso Matvei Kapelyushnikov. La turbina del prototipo tenía un reductor a engranajes y constaba de una sola etapa; su potencia era de 3 a 4 HP, con una velocidad de rotación de 1.600 a 1.800 rpm. Con la versión industrial, el Turbodrill en Rusia logró perforar entre 1925 y 1934 cerca de 100.000 m a profundidades someras (de 670 m y 1300 m).



Figura 9b. Motor de fondo tipo Moineau.

Posteriormente, el Turbodrill fue también utilizado en el resto de Europa (fabricado en Alemania por Salzgitter y en Francia por Neyrfor), pero ya con significativas mejoras: la turbina primitiva, que era de reacción, y su estator transmitía un momento de reacción al sondeo con sentido de rotación anti-horario, que hacía variar el acimut de la perforación, y por esa razón fue reemplazada por una turbina de acción de etapas múltiples; también se perfeccionó la caja reductora y el sistema de lubricación de los rodamientos.

En 1958, la compañía estadounidense Dynadril, que tenía el mismo objetivo de fabricar un motor de fondo utilizando el caudal del lodo para la perforación de pozos de petróleo y de gas, encaró el desarrollo de motores fondo de desplazamiento positivo (PDM), utilizando en forma inversa el principio de funcionamiento de la bomba de cavidad progresiva inventada por el ingeniero francés René Moineau en 1930.

Pero la combinación de estos nuevos instrumentos de medición y los motores de fondo recién consiguieron difundir la perforación direccional en la década del '70, cuando estos últimos alcanzaron un punto de desarrollo

Desvío de pozo con cuña

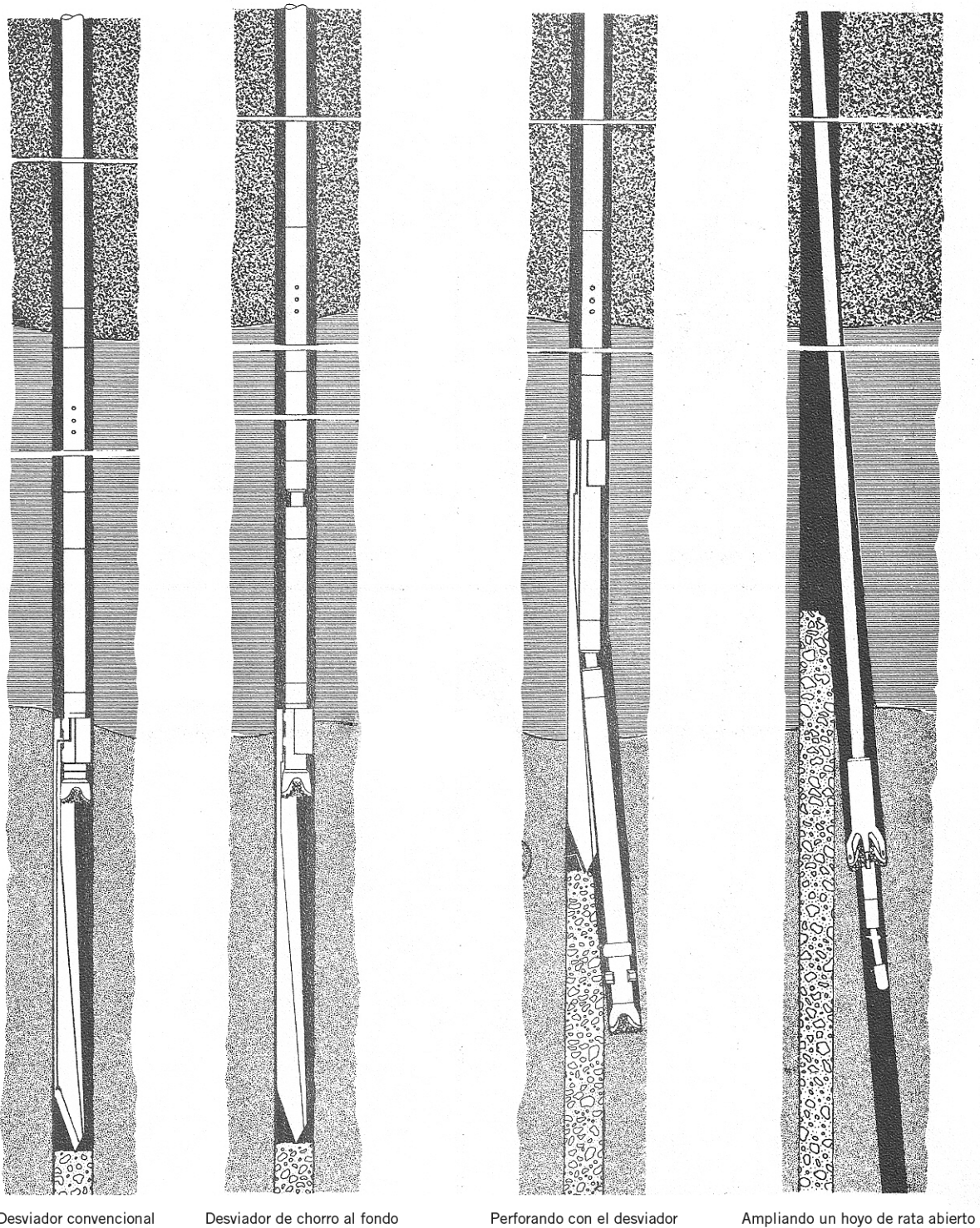


Figura 10. Herramientas desviadoras.

que los hizo confiables y pasaron a ser un componente de uso común en los conjuntos de fondo para perforación direccional.

Ya a mediados de los '80 la cantidad de pozos horizontales que se perforaban se fue incrementando rápidamente año tras año.

Cuestión de costos

La perforación direccional fue siempre más costosa que la vertical, debido principalmente a los tiempos muertos del equipo perforador, empleados en las carreras para modificar la configuración de los conjuntos de fondo (BHA),

en tomar las mediciones de inclinación y acimut y en la obtención de información geológica. Por esa razón, los fabricantes de instrumentos concentraron todos sus esfuerzos en la telemetría para poder captar la información de fondo de pozo en superficie en tiempo real y sin parar la perforación.

A fines de la década, esta inquietud llevó a obtener en superficie la medición de inclinación y acimut durante la perforación por medio del *MWD* (*measuring while drilling*), e información geológica por medio del perfilaje durante la perforación *LWD* (*logging while drilling*), con lo cual quedaron incorporados definitivamente como integrantes permanentes del conjunto de fondo de pozo (BHA).

Los sistemas *MWD* y *LWD* transmiten a la superficie, por medio de pulsaciones en el lodo de circulación *MPT* (*mud pulse telemetry*), la información correspondiente a la inclinación del pozo respecto de la vertical, el acimut medidos y las mismas mediciones que se obtienen por medio del perfilaje con cable, en forma continua. La totalidad de las mediciones de inclinación y acimut, así como también los perfiles registrados, pueden ser descargados de estas herramientas cuando el sondeo es sacado del pozo.

Por su parte, los fabricantes de herramientas para fondo de pozo BHA lograron perfeccionar el sistema de perforación rotativa orientable *RSS* (*rotary steerable system*), y para implementar las mejoras retornaron a la rotación del sondeo para avance del trépano, desplazando de esa tarea a los motores de fondo.



INSTITUTO ARGENTINO
DEL PETRÓLEO Y DEL GAS

Convocatoria a Asamblea General Ordinaria

De acuerdo con lo dispuesto en el Art. 36° del Capítulo V del Estatuto del Instituto Argentino del Petróleo y del Gas, la Comisión Directiva tiene el agrado de invitar a usted a la Asamblea General Ordinaria que tendrá lugar el día 29 de mayo de 2014, a las 17.30 horas, en su Sede de la calle Maipú 639, 4to. Piso, Ciudad Autónoma de Buenos Aires.

Orden del día

1. Consideración de la Memoria y Balance del Ejercicio comprendido entre el 1° de enero y el 31 de diciembre de 2013 y del Informe de la Comisión Revisora de Cuentas.
2. Consideración del Presupuesto de Recursos y Gastos correspondientes al Ejercicio 2014 (Art. 36, inc. A del Estatuto).
3. Elección de la totalidad de los miembros de Comisión Directiva.
4. Elección de tres (3) Revisores de Cuentas Titulares y dos (2) Revisores de Cuentas Suplentes (Art. 33 del Estatuto).
5. Designación de dos (2) Asambleístas para aprobar y firmar el Acta, conjuntamente con el Presidente y Secretario.

José Montaldo
Secretario

Ernesto A. López Anadón
Presidente

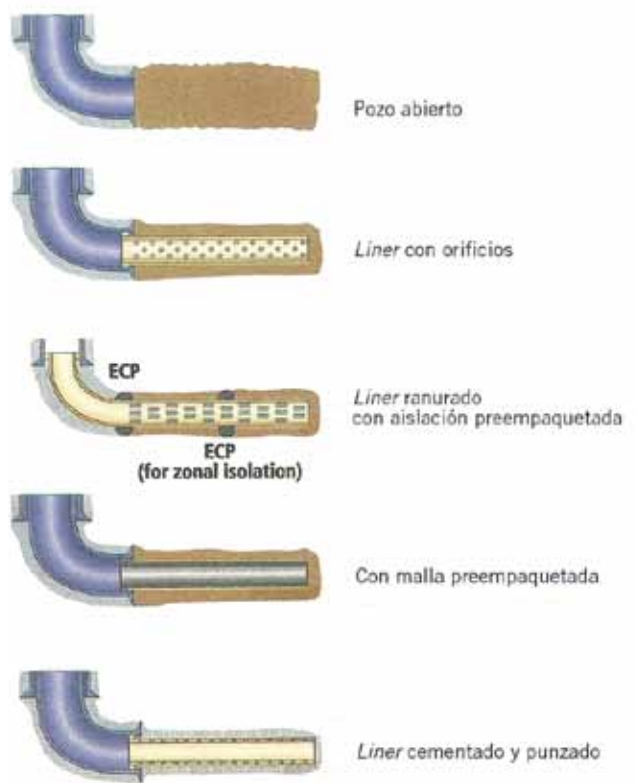


Figura 11. Tipos de entubación de la formación productiva en pozos horizontales.

Las herramientas del RSS pueden ser orientadas por el ingeniero del MWD o el perforador direccional, que son quienes transmiten (*continuous downlinking*) desde el equipamiento en superficie las órdenes que la herramienta entiende para conseguir que la perforación se vaya orientando gradualmente en la dirección deseada.

Los métodos RSS para determinar la trayectoria de un pozo son dos: “empujar el trépano” (*push the bit*) y “apuntar el trépano” (*point the bit*).

Las herramientas para “empujar el trépano” utilizan tacos externos que ejercen presión contra las paredes del pozo, lo cual hace que el trépano presione hacia la pared opuesta originando un cambio de dirección. Obviamente, esta herramienta no rota con el sondeo mientras se encuentra operando.

La tecnología de “apuntar el trépano” cambia la dirección del trépano respecto del resto de la herramienta, modificando la curvatura del eje conductor articulado del *Bent Sub*, componente de la columna perforadora, que va colocada sobre el trépano. Y, por supuesto, esta herramienta no rota con el sondeo mientras se encuentra operando.

Las ventajas de esta tecnología son muchas para los dos grupos de usuarios (los geocientíficos y los perforadores): la rotación continua del sondeo proporciona un mejor transporte de los recortes (*cuttings*) del trépano hasta la superficie, lo cual a su vez mejorará la hidráulica en el espacio anular del pozo, así como la transferencia del peso sobre el trépano, redundando finalmente en un pozo mejor perforado y con menor tortuosidad debido a la utilización de un tipo de orientación de la perforación más estable.

La geometría del pozo será por consiguiente menos agresiva y con paredes más lisas que en los pozos perforados con motor de fondo. Esto último beneficia tanto a los geólogos, porque obtendrán información de mejor calidad sobre las propiedades de las formaciones atravesadas, como a los perforadores, porque la última cañería de entubación llegará más fácilmente hasta el fondo del pozo (figura 11).

Resumiendo: el sistema RSS brinda las siguientes ventajas:

- La iniciación de la curva (*KOP*) se practica a mayor profundidad, con lo cual se deja expuesto más reservorio.
- Se perforan pozos cuya curva tiene mayor incremento de ángulo (hasta 15° cada 30 m).
- La orientación de todo el tramo de perforación direccional horizontal es más precisa.

El manejo de la perforación direccional guiada por el MWD y el LWD ha creado un nuevo término: *geosteering*, que se refiere a la ejecución del pozo guiada por medio de la información suministrada por estos dos sistemas montados sobre el trépano, y cuyos sensores pueden transmitir a la superficie el tipo de roca ya perforada, así como también de la que se encuentra a una cierta proximidad cercana al trépano y la estratigrafía de las paredes del pozo a medida que este va progresando, siempre manteniendo la perforación el mayor tiempo posible dentro de la zona de gas y de petróleo.

La cantidad de equipos afectados a la perforación de pozos horizontales en los Estados Unidos a enero de 2014 fue de 1.173 equipos. ■