Laboratorio de Innovación en Tecnologías Mineras

Ingeniería de la perforación de pozos de petróleo y gas.

Vol. IV: Técnicas de perforación direccional de pozos.

2ª Edición revisada y actualizada

Madrid - 2020

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**Escuela Técnica Superior
de Ingenieros de Minas y Energía**

www.minas.upm.es

ADVERTENCIA

El presente documento ha sido preparado con una finalidad exclusivamente divulgativa y docente. Las referencias a productos, marcas, fabricantes y estándares que pueden aparecer en el texto, se enmarcan en esa finalidad y no tienen ningún propósito de difusión comercial.

Todas las ideas que aquí se desarrollan tienen un carácter general y formativo y el ámbito de utilización se circunscribe exclusivamente a la formación de los estudiantes de la UPM. La respuesta ante un caso particular requerirá siempre de un análisis específico para poder dictaminar la idoneidad de la solución y los riesgos afrontados en cada caso, además de una valoración de su incidencia en los costes de inversión y explotación. Consulte siempre a su ingeniería, consultor, distribuidor y fabricante de confianza en cada caso.

DOI: 10.20868/UPM.book.62722

Archivo Digital de UPM: <http://oa.upm.es/62722/>

Foto de portada: <https://www.portaldelpetroleo.com/>

Copyright © 2020. Todos los derechos reservados

Juan Herrera Herbert
juan.herrera@upm.es

Universidad Politécnica de Madrid (Technical University of Madrid)
E.T.S.de Ingenieros de Minas y Energía (H.T. School of Mines and Energy)
Laboratorio de Innovación en Tecnologías Mineras (Mining Technologies Innovation Lab)

Calle Rios Rosas 21
28003 Madrid (España)

Este documento ha sido formateado para su visualización y uso en dispositivos electrónicos y permitir ahorrar en el consumo de papel y tóner. Antes de imprimirlo, piense si es necesario hacerlo.

Contenido

1.	PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE POZOS	7
1.1.	Perforación direccional de pozos.....	7
1.2.	Técnicas de Perforación Direccional	9
2.	TIPOLOGÍA DE POZOS DIRECCIONALES	11
2.1.	Tipos de perfiles de pozos direccionales.....	11
2.2.	Straight Well (Vertical)	12
2.3.	Pozo tipo S (S-Type Well).....	12
2.4.	Pozos inclinados tipo J (Slant Well or J-Type).....	13
2.4.1.	Pozos horizontales	13
3.	SISTEMAS DE PERFORACIÓN DIRECCIONAL	15
3.1.	Sistema Whipstock.....	15
3.2.	Técnica Rotary + Sliding	16
3.3.	Rotary Steereable System “RSS”	17
4.	APLICACIONES	21
4.1.	Sidetracking	21
4.2.	Emplazamiento y/o localizaciones inaccesibles	22
4.3.	Perforación en entornos de domos salinos.....	22
4.4.	Control de fallas (Fault Controlling)	23
4.5.	Perforación de múltiples pozos de exploración a partir de uno único.....	23
4.6.	Perforación “onshore” de depósitos “offshore”	23
4.7.	Perforación offshore multipozo (Offshore Multiwell Drilling)	24
4.8.	Relief Wells	25
4.9.	Pozos horizontales.....	25
4.10.	Extended Reach Wells.....	28
4.11.	Pozos multilaterales	28
4.12.	Pozos de radio corto, medio y largo	29
5.	CARACTERÍSTICAS DEL PERFIL DE UN POZO DIRECCIONAL	31
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	39

1. PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE POZOS

1.1. PERFORACIÓN DIRECCIONAL DE POZOS

La perforación direccional se ha convertido en una herramienta muy importante en el desarrollo de los yacimientos de petróleo y gas. La perforación direccional puede definirse como la técnica de desviar un sondeo a lo largo de una trayectoria previamente establecida desde un punto de partida en la superficie hasta una ubicación objetivo en profundidad, definidos ambos por un sistema de coordenadas establecido. Actualmente está demostrado que el uso de la perforación direccional es más rentable ya que en muchos casos abarata los costes de producción de hidrocarburos al permitir alcanzar distintos objetivos desde un mismo

emplazamiento. En el caso de la perforación horizontal se consigue mejorar la productividad de los pozos, con una reducción de los costes técnicos de producción.

Probablemente, el aspecto más importante de la perforación direccional controlada es que permite a los productores de hidrocarburos el aprovechamiento de depósitos y yacimientos que nunca hubieran podido ser explotados de manera económica de otra forma, como es el caso de la explotación de recursos no convencionales, donde es imprescindible la aplicación de la técnica de perforación horizontal.

Habitualmente, un pozo ejecutado con perforación direccional, comienza siendo un poco vertical que gira en un determinado punto, de modo que la ubicación del punto final del sondeo dista cientos o miles de metros de la posición vertical del punto de partida.

La perforación direccional se utilizó inicialmente como una operación de recuperación, ya sea para desviar sondeos en los que se había bloqueado la perforación, corregir la desviación de un pozo y llevar el pozo de nuevo a vertical, o en la perforación de pozos de alivio para controlar pozos en erupción como consecuencia de un blowout.

El interés en la perforación direccional comenzó hacia 1929 cuando se introdujo un sistema nuevo y más o menos preciso de medida del ángulo de perforación durante el desarrollo de un campo de producción en Seminole (USA). En 1930, la primera perforación direccional controlada se perforó en Huntington Beach, en California (USA). El pozo se perforó desde una plataforma en tierra hacia unas arenas bituminosas en el mar.

La perforación direccional controlada había recibido una publicidad bastante desfavorable hasta que se utilizó en 1934 para “matar a un pozo” natural cerca de Conroe (Texas, EE.UU.). De esta forma, la perforación direccional se estableció como una forma de controlar los pozos eruptivos “wild wells”. El resultado positivo permitió el desarrollo de esta tecnología con el reconocimiento favorable tanto de Compañías Operadoras como de Contratistas.

1.2. TÉCNICAS DE PERFORACIÓN DIRECCIONAL

El concepto general de aplicación la perforación direccional es simple: direccionar la barrena en la dirección en la que se quiere perforar. El desarrollo de los motores de fondo, así como los dispositivos de medición precisos, constituyen los complementos más importantes para el avance en la tecnología de la Perforación direccional.

Durante muchos años, la forma más común de operar ha sido por el método Rotary + Sliding, es decir, por medio de una sección acodada cerca de la barrena de perforación en un motor de fondo direccional en el fondo del pozo. La sección acodada dirige la barrena de perforación en una dirección diferente a la del eje de pozo cuando el resto de la sarta de perforación no esté rotando. Mediante el bombeo de lodo a través del motor de fondo, la barrena gira en tanto que el resto de la sarta de perforación no rota, lo que permite que la barrena perfora en la

dirección que señala. Cuando se logra la dirección del pozo determinada, ésta se puede mantener mediante la rotación de la sarta de perforación entera (incluida la sección acodada), de modo que la barrena no perfora en una sola dirección lejos del eje del pozo, sino que cubre una cierta área y su dirección neta coincide con el pozo existente.

Las herramientas rotativas direccionales permiten el direccionamiento durante la rotación, generalmente con velocidades de penetración más altas y, en última instancia, pozos mejor perforados.

2. TIPOLOGÍA DE POZOS DIRECCIONALES

2.1. TIPOS DE PERFILES DE POZOS DIRECCIONALES

En general, los pozos direccionales pueden ser:

- Totalmente rectos (Verticales),
- Tipo S,
- Inclinado (tipo J), o
- Horizontal.

El tipo de perfil seleccionado dependerá de los objetivos geológicos y del mecanismo de producción del pozo.

2.2. STRAIGHT WELL (VERTICAL)

Los pozos rectos (Straight Wells) no tienen ninguna desviación planificada con respecto a la vertical.

2.3. POZO TIPO S (S-TYPE WELL)

Este tipo de pozo se perfora para mejorar la eficiencia del pozo y ayudar en la ubicación de un pozo explotado. En la perforación offshore, los pozos de tipo S pueden asegurar una mayor precisión en la posición del fondo del pozo cuando se perforan pozos múltiples desde la misma plataforma.

2.4. POZOS INCLINADOS TIPO J (SLANT WELL OR J-TYPE)

Los pozos inclinados, a veces llamados pozos de tipo J, tienen un trazado con una sección recta, una sección de desvío y una sección de tangente recta al objetivo.

Los pozos oblicuos o de tipo J se perforan cuando no es deseable o no es posible ubicar la plataforma de perforación en superficie directamente sobre el objetivo o bien se pretende usar una plataforma de múltiples pozos.

2.4.1. POZOS HORIZONTALES

Los pozos horizontales tienen un trazado con una sección recta, una sección de desvío, una sección de tangente, una segunda sección de desvío (la mayoría de las veces) y una sección horizontal. El pozo se perfora hasta un punto sobre el reservorio; luego se desvía y el ángulo aumenta hasta que alcanza los 90 grados o más.

Cuando se aplica correctamente, un pozo horizontal puede producir un depósito mejor que varios pozos perforados verticalmente.

3. SISTEMAS DE PERFORACIÓN DIRECCIONAL

3.1. SISTEMA WHIPSTOCK

En los primeros tiempos de la perforación direccional se utilizó con generalidad la cuña de desviación comúnmente denominada “Whipstock”, sobre todo para las operaciones side-track

Hoy en día el “Whipstock” sigue utilizándose para la apertura de ventanas de desviación en el casing por ser un sistema rápido y efectivo.

3.2. TÉCNICA ROTARY + SLIDING

La perforación direccional con motor de fondo se logra de dos modos:

- Rotación (rotary).
- Deslizamientos (sliding).

En el modo rotación, la totalidad de la sarta de perforación rota y tiende a perforar hacia adelante. En el modo deslizamiento (sliding) se utiliza para iniciar los cambios de dirección y rectificación de la trayectoria. Este sistema de rotary + sliding tiene el gran problema de crear tortuosidad en la trayectoria del pozo.

En éste dispositivo, un eje conecta la válvula rotativa a la unidad de control. La unidad de control mantiene la posición angular correcta del eje de transmisión en la formación y, al mismo tiempo, la unidad de control puede dirigirse para mantener un ángulo de rotación dado.

Los sensores de acelerómetro y magnetómetro de tres ejes proporcionan información sobre la inclinación y el acimut del taladro, y también la posición angular del eje de transmisión.

3.3. ROTARY STEEREABLE SYSTEM “RSS”

Los sistemas rotativos direccionales permiten la rotación continua mientras se controla la dirección de la broca. Este sistema comprende una unidad de desviación ubicada directamente detrás de la broca que aplica una fuerza sobre toda la barrena en una dirección controlada mientras toda la columna gira. La fuerza que provoca el desvío se aplica mediante tres patines externos articulados que son activados por el flujo del lodo a través de una válvula de tres vías de disco rotativo.

La herramienta se puede adaptar a las necesidades específicas que se definan desde la superficie y se puede preprogramar de acuerdo con las variaciones esperadas en la inclinación y la dirección.

La unidad MWD y los sensores de la unidad de control transmiten la información a la superficie mediante un sistema de comunicación por impulsos (Power Pulse).

Fuente APS Technology

Fuente APS Technology

Sources: U.S. Energy Information Administration and U.S. Geological Survey.

4. APLICACIONES

4.1. SIDETRACKING

El Sidetracking fue la técnica original de perforación direccional utilizada para sortear problemas de obstrucción y/o atranque de la sarta ("fish").

Los "sidetracks" orientados (desviaciones orientadas), constituyen el tipo más común de desviación lateral, y se llevan a cabo cuando hay cambios inesperados en la geología u obstrucciones en la traza del pozo.

<http://www.ingenieriadepetroleo.com/>

4.2. EMPLAZAMIENTO Y/O LOCALIZACIONES INACCESIBLES

Las ubicaciones inaccesibles, como las ubicadas debajo de ciudades, ríos o áreas ambientalmente sensibles, hacen que sea necesario ubicar la plataforma de perforación a cierta distancia del objetivo.

4.3. PERFORACIÓN EN ENTORNOS DE DOMOS SALINOS

Se ha descubierto que los domos salinos son trampas naturales de hidrocarburos que se acumulan debajo de la capa dura superior más sobresaliente.

Se usa un pozo direccional para alcanzar el depósito o trampa de hidrocarburos y así evitar los problemas asociados con la perforación de un pozo a través de la formación de sal.

4.4. CONTROL DE FALLAS (FAULT CONTROLLING)

El control de fallas es una aplicación utilizada para perforar un pozo direccional en formaciones subterráneas con fallas sin cruzar la línea de falla.

4.5. PERFORACIÓN DE MÚLTIPLES POZOS DE EXPLORACIÓN A PARTIR DE UNO ÚNICO

Esta aplicación consiste en la perforación de múltiples pozos de exploración a partir de un solo pozo y utilizando un único equipo en superficie para perforarlos todos ellos como desviaciones o ramificaciones a cierta profundidad de los pozos nuevos a partir del pozo original.

Permite la exploración de ubicaciones estructurales sin perforar otro pozo completo.

4.6. PERFORACIÓN “ONSHORE” DE DEPÓSITOS “OFFSHORE”

Esta aplicación es particularmente útil cuando un reservorio está ubicado debajo de grandes masas de agua, pero al mismo tiempo se encuentra dentro del alcance de

una perforación realizada desde

tierra.

La cabeza del pozo estará ubicada en tierra, y el pozo se perfora direccionalmente debajo del agua para llegar al depósito.

Esta técnica ahorra dinero porque las plataformas terrestres son mucho más baratas que las plataformas offshore.

4.7. PERFORACIÓN OFFSHORE MULTIPOZO (OFFSHORE MULTIWELL DRILLING)

La perforación offshore de pozos múltiples es la forma más económica de desarrollar campos en alta mar. En éste caso, se procede a la ejecución de varios pozos direccionales "clusters" desde una plataforma offshore con múltiples pozos.

4.8. RELIEF WELLS

Los pozos de alivio (relief Wells) se usan para el matado de matar pozos dañados o perdidos como consecuencia de un blowout.

Para ello se procede a perforar un pozo direccional cuidadosamente planificado y ejecutado con gran precisión para interceptar el pozo que ha sufrido el blowout y poder retomar el control del pozo dañado.

4.9. POZOS HORIZONTALES

Los pozos horizontales se utilizan para intersectar una formación productora de una forma horizontal y en dirección de la capa, lo que permite conseguir mejorar la producción del depósito.

La perforación horizontal aumenta el área de superficie de una formación productora con respecto al pozo que la atraviesa. Por ejemplo, un pozo vertical puede dar exposición a una reserva con una profundidad de 20 a 30 pies (6 a 10 m) mientras que un pozo horizontal perforado en el mismo depósito puede dar una exposición de 2000 a 3000 pies (600 a 1000 m).

Es por ello que los pozos horizontales pueden hacer que una plataforma sea rentable, donde no lo era anteriormente.

WHY HORIZONTAL DRILLING IS MORE PRODUCTIVE

Drilling a horizontal well can cost three to six times more than a conventional vertical well. Industry officials say one horizontal well can replace as many as six vertical wells. As many as six horizontal wells can be drilled, each sent in a different direction from the same surface site, replacing more than 30 vertical wells.

4.10. EXTENDED REACH WELLS

Estos pozos horizontales se utilizan para dar alcance a depósitos que tienen un desplazamiento horizontal superior a 16,400 pies (> 5,000 m) desde el punto de partida.

4.11. POZOS MULTILATERALES

Los pozos multilaterales tienen varios pozos que se ejecutan lateralmente y se originan de un pozo original.

4.12. POZOS DE RADIO CORTO, MEDIO Y LARGO

Los pozos de radio corto, típicamente las reentradas de pozos verticales viejos, tienen curvas con un radio de 143 pies (44 m) o menor y, consecuentemente, se trata de pozos que no se pueden perforar con motores convencionales. Se usan para aislar zonas de producción de presión alta / baja o acuíferos arenosos no consolidados sin fijar y cementar un revestimiento. Este tipo de perforación es deseable cuando se inicia por debajo de una formación problemática.

Los pozos de radio medio tienen curvas con un radio de 200-500 pies (61-152 m) que se pueden perforar con motores convencionales.

Finalmente, los pozos de radio largo tienen curvas con un radio de 750 pies (229 m) o mayor que también se pueden perforar con motores convencionales.

5. CARACTERÍSTICAS DEL PERFIL DE UN POZO DIRECCIONAL

Un perfil de pozo direccional es la trayectoria planificada del pozo desde la superficie hasta la profundidad final de perforación cuando se hace la proyección del pozo sobre dos planos. Para determinar el mejor perfil geométrico de pozo desde la superficie hasta el objetivo de fondo de pozo, se debe conocer la siguiente información:

- La posición de la localización en superficie,
- La posición y localización del target (objetivo), y
- La profundidad vertical verdadera (TVD).

El aspecto más importante de la perforación direccional es mantener la orientación en un espacio tridimensional. Se necesitan tres medidas para hacer referencia a la perforación desde la superficie:

- Inclinação (Tilt, ϕ), ángulo relativo con respecto a la vertical.
- Azimut (θ): ángulo con respecto al norte verdadero en la perforación horizontal.
- Profundidad (MD-Measured Depth o profundidad medida): distancia medida a todo lo largo del pozo.

La planificación del pozo es un proceso organizado de recopilación de los datos necesarios para el diseño con éxito de un pozo. Un plan de pozo es una de las etapas previas más importantes para garantizar que todos los aspectos estén diseñados para cumplir los objetivos específicos de ese pozo. Los planes de pozo de perforación a menudo se desarrollan en un Centro de Ingeniería de Perforación (Drilling Engineering Center - DEC) por un planificador especialista en pozos (well planner)

Comprender cómo diseñar un plan de pozo (propuesta) es uno de los deberes más importantes del perforador direccional. Debe ser capaz de entender el plan y hacer los cambios necesarios.

Los datos proporcionados por el cliente son utilizados por el well planner para

desarrollar un perfil geométrico para la ruta más segura y más fácil desde la ubicación de la superficie hasta el objetivo. El well planner tiene acceso a un programa informático para ayudar a desarrollar el mejor perfil posible. Los datos necesarios quedan recogidos en el programa para que un perfil de pozo se pueda imprimir, trazar y usar para el proyecto de perforación.

Hay muchos componentes a tener en cuenta al diseñar un plan de pozo. Estos son:

Surface Location
Target Location
Kickoff Point
Buildup Rate

True Vertical Depth
Target Displacement
Azimuth
Vertical Section

End of Drop
Tangent Section
Measured Depth
Well Inclination

Turn Rate	Quadrant	End of Buildup
Hold Angle	Polar Coordinate	Horizontal Displacement
Start of Drop	Rectangular Coordinate	Drop Off Rate

Kickoff Point (KOP)

El Kickoff Point o punto de inicio, es la ubicación a una profundidad dada por debajo de la superficie donde el pozo se desvía en una dirección determinada.

Well Inclination

La inclinación del pozo es el ángulo por el cual el pozo se desvía de la vertical.

Start of Drop

El inicio de la caída es la ubicación donde el pozo comienza a reducir la inclinación con respecto a la horizontal.

Tangent Section

La sección tangente se produce después de un tramo en el que la inclinación del pozo se mantiene constante durante una cierta distancia. Después de éste tramo puede darse otro o bien una caída de la inclinación del pozo antes de alcanzar el objetivo.

End of Drop (EOD)

El punto end of drop es aquel en el que el pozo recupera la vertical después de ir reduciendo la inclinación.

Target Displacement

El desplazamiento del objetivo es la distancia lateral desde la ubicación en la superficie hasta la vertical con el objetivo.

Target Location

La ubicación objetivo es un punto definido en el espacio por coordenadas geográficas a una profundidad vertical verdadera dada. Un perfil de pozo podría tener múltiples objetivos.

Drop Off Rate (DOR)

La tasa de caída es la velocidad a la que disminuye la inclinación. La velocidad generalmente se expresa en grados por 100 pies o grados por 30 m de la longitud del recorrido.

Buildup Rate (BUR)

Es el cambio de inclinación de un pozo donde se aumenta el ángulo. Esta tasa de avance generalmente se expresa en grados por cada 100 pies o aumento angular por 30 m de la profundidad medida.

Turn Rate

La tasa de giro determina la velocidad a la que un perfil de pozo gira en dirección acimutal. Usualmente se expresa en grados por 100 pies o grados por 30 m.

True Vertical Depth (TVD)

La profundidad vertical verdadera de cualquier punto o estación a lo largo de un pozo, es la distancia vertical desde el punto de referencia en la superficie del pozo hasta la estación de interés o target.

Measured Depth (MD)

La profundidad medida de cualquier punto o estación a lo largo de un pozo es la distancia desde el punto de referencia de la superficie del pozo hasta la estación de interés a lo largo del trazado real del pozo.

Horizontal Displacement (HD)

El desplazamiento horizontal es la distancia entre dos puntos cualesquiera a lo largo de un pozo proyectado sobre un plano horizontal o una vista en planta.

Vertical Section (VS)

La sección vertical es la distancia entre dos puntos cualesquiera a lo largo de una proyección del pozo en un plano de sección vertical.

Azimuth

El azimut es el ángulo en el plano horizontal medido desde una dirección de referencia fija (como Norte verdadero), generalmente medido en el sentido de las agujas del reloj.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bernaola Alonso, J. (2004). “Introducción a los sondeos de petróleo y gas”. Fundación Gómez Pardo. Universidad Politécnica de Madrid.

Directionaldrilling (2012) “Types of directional well profiles”.
<https://directionaldrilling.wordpress.com/>

Directionaldrilling (2012) “Directional drilling terms”.
<https://directionaldrilling.wordpress.com/>

Directionaldrilling (2012) “Directional drilling terms”.
<https://directionaldrilling.wordpress.com/>

Galp (2010): Perforación”. <https://www.galpenenergia.com/> (Consultado en Feb. 2020).

Gervilla, M. (2017). “Pozos para la Exploración y Producción de Hidrocarburos”. Ciclo de Conferencias “Los Hidrocarburos en Nuestra Vida Diaria”. Instituto Geológico y Minero de España & ACIEP. <https://www.aciep.com/> (Consultado en Feb. 2020).

Hyne, Norman J. (2001) “Nontechnical Guide to Petroleum Geology, Exploration, Drilling and Production”. Penn Well Corporation (Tulsa, Oklahoma. EE.UU.) ISBN 0-87814-823-X.

Menendez Castro, A. (2013). “Aspectos de Producción”. Instituto Mexicano del Petróleo. <http://www.oilproduction.net/> (Consultado en Feb. 2020).

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE MINAS Y ENERGIA
LABORATORIO DE INNOVACIÓN EN TECNOLOGÍAS MINERAS

TECHNICAL UNIVERSITY OF MADRID
HIGHER TECHNICAL SCHOOL OF MINES AND ENERGY
MINING TECHNOLOGIES INNOVATION LABORATORY