

Captaciones subterráneas/ Perforación y equipamiento de sondeos para captación de aguas subterráneas

Màster en Ingeniería y Gestión del
Agua

2015-2016

PROFESOR

José Antonio Iglesias Martín



Esta publicación está bajo licencia Creative Commons Reconocimiento, No comercial, Compartir igual, (by-nc-sa). Usted puede usar, copiar y difundir este documento o parte del mismo siempre y cuando se mencione su origen, no se use de forma comercial y no se modifique su licencia. Más información: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	3
2. LA CONSTRUCCIÓN DE UN POZO DENTRO DE UN PROYECTO DE CAPTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	3
2.1. CONSTRUCCIÓN DEL SONDEO	4
2.2. PROFUNDIDAD DE PERFORACIÓN	4
3. EJECUCIÓN DE POZOS DE CAPTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS: PERFORACIÓN	8
3.1. PERFORACIÓN.....	8
3.2. TESTIFICACIÓN GEOFÍSICA DE SONDEOS	35
3.3. ENTUBACIÓN	41
3.4. ENGRAVILLADO	46
3.5. DESARROLLO	48
3.6. AFORO	53
4. EQUIPAMIENTO.....	58
4.1. INSTALACIONES HIDRÁULICAS	59
4.1.1. GRUPO ELECTROBOMBA	59
4.1.2. TUBERÍA DE IMPULSIÓN	63
4.1.3. TUBERÍAS AUXILIARES, PIEZAS ESPECIALES, VÁLVULAS	63
4.1.4. DESAGÜE	65
4.2. INSTALACIONES ELÉCTRICAS	65
4.2.1. TRANSFORMADOR DE POTENCIA	66
4.2.2. CABLES DE ALIMENTACIÓN	67
4.3. CUADROS DE MANIOBRA Y PROTECCIÓN	68
4.4. EQUIPOS DE MEDIDA.....	71
4.5. OBRA CIVIL: ARQUETA, DESAGÜE, CERRAMIENTO	73
5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74

1. INTRODUCCIÓN

Se pueden definir los pozos y sondeos como perforaciones que se realizan en el terreno con el objetivo de proceder a la captación de aguas subterráneas y/o a la investigación hidrogeológica.

La tendencia más generalizada es llamar pozo o “captación hidrogeológica” a aquella perforación realizada en el subsuelo que, una vez acondicionada y equipada permite la extracción de aguas subterráneas. El sondeo hace referencia a una perforación de investigación hidrogeológica que no permite el alojamiento de bombas de impulsión de agua en su interior.

La construcción de un pozo comprende d33os grandes fases:

- 1.- La perforación y acondicionamiento del sondeo, que finaliza con la caracterización de la misma, en la que se realiza un bombeo de agua en el mismo que permite determinar el caudal óptimo de explotación y el nivel dinámico, así como la calidad del agua extraída.
- 2.- Equipamiento electromecánico y edificaciones auxiliares.

2. LA CONSTRUCCIÓN DE UN POZO DENTRO DE UN PROYECTO DE CAPTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

La construcción del pozo se sitúa como una fase más dentro de un proyecto de captación de aguas subterráneas.

A partir de la información obtenida en el estudio hidrogeológico se dispondrá de los datos necesarios para definir el emplazamiento del pozo, así como el método de perforación a usar, la profundidad de perforación y el caudal de explotación, profundidad del nivel dinámico y calidad del agua esperada.

Entre los datos que debe aportar están:

- Ubicación del pozo o sondeo.

- Columna litológica prevista y niveles productivos, indicando la profundidad recomendada.
- Estimación del caudal de agua y rendimiento específico de la captación.
- Previsión de las características hidroquímicas del agua.
- Consideraciones y recomendaciones para el diseño y seguimiento de la obra.

El equipamiento del pozo de captación permite la extracción de agua subterránea hasta la superficie para su aprovechamiento efectivo. En la actualidad la mayoría de las captaciones se equipan con suministro eléctrico y bombas sumergibles.

Puesto que en los pozos se introducen bombas para la impulsión de agua subterránea, es necesario construir los pozos con diámetro suficiente para la correcta instalación de los equipos.

La fase de anteproyecto constructivo del pozo deberá aportar, entre otros, información sobre accesos, suministros de agua y energía y condicionantes territoriales (medioambientales, espacios naturales protegidos, zonas húmedas, red eléctrica, vías de transporte, etc.).

2.1. CONSTRUCCIÓN DEL SONDEO

Entre los parámetros básicos que se establecen en el proyecto se encuentran la definición de la profundidad y diámetro de la obra y la selección del método de perforación más adecuado para la realización de la misma.

2.2. PROFUNDIDAD DE PERFORACIÓN

La profundidad de la captación es un dato fundamental que se obtiene con la realización del estudio hidrogeológico y es función de la ubicación del acuífero objetivo, así como de la situación de los niveles piezométricos y de la transmisividad del sistema. A continuación se describen brevemente estos aspectos.

- **Ubicación del acuífero:** La profundidad de la captación debe de ser tal que permita interceptar, en principio en todo su espesor, al acuífero que queremos captar y no

sobrepasar el material impermeable infrayacente, optimizando la longitud de perforación.

- Niveles piezométricos: Si se trata de un acuífero libre es necesario garantizar que se atraviesa el nivel freático y que la obra no quedará en seco durante su explotación, teniendo en cuenta que durante la extracción de agua el nivel del pozo en estático disminuirá hasta una posición dinámica, acorde con el caudal de extracción y el rendimiento específico de la misma.
- Si se trata de un acuífero confinado al alcanzar el techo del mismo interceptaremos el nivel piezométrico, siendo válido lo indicado respecto a los niveles dinámicos.
- En cualquier caso es necesario prever los descensos que podrían producirse en el nivel regional a lo largo de la vida útil de la captación, a partir de los datos históricos obtenidos en el estudio hidrogeológico.
- Transmisividad del acuífero: En condiciones ideales la captación debería atravesar toda la potencia del acuífero, pero eso no siempre se consigue y en muchas ocasiones los pozos son parcialmente penetrantes. Bajo estas condiciones la transmisividad efectiva para los periodos de bombeo habituales corresponde al producto de la permeabilidad por el espesor atravesado, por lo que el desarrollo de la obra en profundidad redundará en un mayor rendimiento de la captación.

Diámetro de perforación

El diámetro de perforación de un pozo está directamente relacionado con la cantidad de agua que se espere obtener de la captación, puesto que se debe permitir instalar la bomba con diámetro adecuado para que su capacidad de bombeo sea la prevista. Habitualmente los pozos se equipan con electrobombas sumergibles y los caudales que se pueden extraer aumentan en función del diámetro de las bombas.

Por lo tanto los diámetros que hay que considerar en el diseño de una captación hidrogeológica son los siguientes:

- Diámetro del grupo de bombeo.
- Diámetros de la tubería de revestimiento del pozo, interior y exterior.

- Diámetro de perforación.

- **Electrobomba sumergible:** De acuerdo con la demanda prevista, en cuanto al caudal previsible y a los datos hidrogeológicos, en lo referente a los niveles dinámicos a considerar, se procede en la fase de diseño a una selección previa de la bomba a la que corresponderá un diámetro “diámetro del grupo de bombeo”. Obviamente a la finalización de la construcción del pozo se realiza un ensayo de bombeo que permita confirmar estas previsiones antes del equipamiento definitivo. En función del caudal y altura manométrica (profundidad del nivel dinámico más las pérdidas de carga en la conducción hasta el punto de entrega más la altura desde la boca del pozo hasta el punto de entrega), se elige el grupo de bombeo que dé el mayor rendimiento de los ofertados por el fabricante (se expone con mayor detalle en el apartado 4.1.1).
- **Revestimiento o entubación del sondeo:** El revestimiento del sondeo se realiza habitualmente con tubería de acero al carbono soldada y su diámetro es función directa del diámetro de la bomba que se va a introducir por su interior. Esta operación debe realizarse con holgura suficiente. Para hacer una estimación de este diámetro hay que hacer una selección del grupo de bombeo a instalar, teniendo en cuenta que entre el grupo de bombeo y la tubería de revestimiento quede espacio suficiente para que el agua circule a una velocidad suficiente para refrigerar el motor del grupo de bombeo y que no supere los 3,5 m/s, como se expone en el apartado 4.1.1.

Hay que considerar tanto el diámetro del grupo de bombeo como el de la brida de unión de éste con la tubería de impulsión.

A partir del diámetro interior de la tubería de revestimiento y teniendo en cuenta el espesor de la misma, se obtiene el “diámetro exterior de la tubería de revestimiento”.

- **Diámetro de la perforación:** Una vez conocido el “diámetro exterior de la tubería de revestimiento”, se puede establecer el diámetro más adecuado de la perforación “diámetro de perforación”. Para terrenos detríticos donde es preciso ubicar un empaque de gravas habrá que considerar como espesor adecuado 100 mm; es decir habrá que aumentar “diámetro exterior de la tubería de revestimiento” en 200

mm. Si se trata de terrenos fisurados o karstificados en los que no se requiere instalar grava el diámetro de perforación deberá ser de al menos 50 mm superior al diámetro de entubación para sondeos poco profundos, aumentando este diámetro conforme aumenta la profundidad con el fin de poder realizar correctamente la entubación del pozo.

Si se producen cambios litológicos y/o hidrogeológicos que requieren realizar entubaciones y reducciones de diámetro conforme progresa la perforación, será preciso comenzar el pozo con diámetros superiores que tengan en cuenta estas contingencias.

Método de perforación

La selección del método de perforación está relacionada, además de con la profundidad y el diámetro de la perforación, con la litología del terreno a perforar.

La litología del subsuelo no solamente determina las posibilidades hidrogeológicas en cuanto a la presencia o no de acuíferos explotables para captación de agua subterránea, sino que además condiciona el método de perforación a emplear; pues éste es función de la perforabilidad de los materiales a atravesar. Esta perforabilidad viene definida por ciertas características físicas de la roca, entre las que destaca en primer lugar su resistencia mecánica así como otros parámetros tales como dureza, fracturación, carstificación, coherencia, etc.

De entre todos los parámetros geomecánicos que nos proporcionan información sobre la perforabilidad de un terreno el más representativo es su resistencia mecánica, caracterizada por el ensayo a compresión simple.

En el apartado 3.1., una vez descritos los distintos métodos de perforación, se presenta en un cuadro comparativo del proceso de selección del sistema de perforación de un pozo de captación de agua subterránea.

El dato de litología y estructura del terreno es doblemente interesante, pues, además de incidir en el proceso de selección del sistema de perforación, también permite planificar en fase de proyecto las distintas entubaciones y reducciones de diámetro que se

consideren necesarias para alcanzar la profundidad de diseño con el diámetro mínimo que permita instalar el grupo de bombeo adecuado.

Los factores de profundidad y litología son tan importantes para el diseño de un pozo en la fase de proyecto, que si no están suficientemente definidos será preciso efectuar sondeos previos de investigación hidrogeológica.

Además de las cuestiones analizadas anteriormente es preciso definir en la etapa de proyecto el esquema constructivo del pozo y toda la secuencia de operaciones de perforación, entubaciones auxiliares, reducciones del diámetro de perforación, etc. Durante la ejecución de la obra se irán adaptando todos estos parámetros acorde con los resultados que se vayan obteniendo.

3. EJECUCIÓN DE POZOS DE CAPTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS: PERFORACIÓN

La ejecución de un pozo de captación de agua subterránea se efectúa de acuerdo con una serie de etapas que se describen a continuación: perforación, testificación geofísica, entubación, engravillado, desarrollo y limpieza, aforo y acabado final.

Es fundamental realizar correctamente todas estas etapas con el fin de garantizar la calidad de la obra de captación.

3.1. PERFORACIÓN

CLASIFICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE PERFORACIÓN DE CAPTACIONES DE AGUA

Una clasificación sistemática y práctica de los métodos de perforación para la captación de aguas subterráneas atiende al criterio de considerar si el terreno que se perfora es extraído a la superficie de manera continua o de forma discontinua respecto a las propias operaciones de profundización en el subsuelo. De esta forma los métodos de perforación se dividen en dos grandes grupos: métodos continuos y métodos discontinuos. En el primer caso no es necesario parar la perforación para extraer el terreno perforado o “detritus” siendo ambas operaciones simultáneas, mientras que en el segundo la perforación y la extracción del terreno constituyen dos etapas diferentes.

Pozos profundos:

- Discontinuos:
 - Percusión
- Continuos:
 - Rotación:
 - Circulación directa.
 - Circulación inversa.
 - RotoperCUSión:
 - Circulación directa.
 - Circulación inversa.

Los sistemas continuos que se utilizan para perforar pozos profundos se basan en el empleo de fluidos de perforación que transportan las partículas sólidas.

Los fluidos básicos de perforación utilizados normalmente son el agua y el aire, a los que se le añaden, en ciertos casos, algunos aditivos para transformarlos en lodos y espumas.

Para un determinado material perforado y un tamaño de fragmento dado, la velocidad ascensional que necesita un fluido para arrastrar hasta la superficie los terrenos perforados es función de la densidad y viscosidad del fluido empleado para la perforación. Este fenómeno está de acuerdo con la ecuación de Stockes que relaciona el radio, el peso específico de la partícula y la velocidad límite con la que cae dentro de un fluido de viscosidad conocida bajo la acción de la gravedad. Esta ecuación es:

$$V = \frac{2 (\gamma_s - \gamma_l) \cdot g \cdot r^2}{9 \mu}$$

Siendo:

V = Velocidad de caída de la partícula en cm/s.

γ_s = Densidad de la partícula en gr/cm^3 .

γ_l = Densidad del fluido en gr/cm^3 .

G = Aceleración de la gravedad en cm/s^2 .

R = Radio de la partícula en cm .

μ = Viscosidad del líquido en poises.

Además de la caída de la partícula bajo la acción de la gravedad, cuyo efecto se cuantifica en la ecuación de Stokes, hay que considerar que en las operaciones de extracción con fluidos de perforación la partícula también está sometida, además del movimiento por circulación ascendente del fluido, a un efecto de choque con las partículas líquidas en movimiento, que frenan la caída de los “detritus”.

Habitualmente y a efectos prácticos se toman los siguientes órdenes de magnitud para la velocidad ascensional de los fluidos de perforación:

- Lodo: 15-25 m/min.
- Agua: 60 m/min.
- Aire: 1.500 m/min.
- Espumas: 100-120 m/min.

Es de destacar que todos los métodos de perforación para obras de captación de agua son métodos destructivos del terreno atravesado y que por tanto durante su realización es necesario ir tomando muestras del “detritus” para control de la columna litológica. Por esta razón es imprescindible que en todos los pozos se realicen registros de testificación geofísica, previamente a su entubación, para disponer de información litológica suficiente para realizar un adecuado diseño y situación de los tramos filtrantes de la tubería de revestimiento.

PERCUSIÓN

Es el método de perforación de sondeos más antiguo que se conoce, siendo el más extendido todavía y de aplicación prácticamente a cualquier tipo de terreno.

El método de perforación consiste, en esencia, en que un trépano (masa metálica de gran peso) colgado de un cable golpea sucesivamente el fondo del pozo a perforar al comunicársele al cable un movimiento alternativo mediante un balancín que es accionado

por una excéntrica que se mueve a su vez mediante un motor de explosión. Las máquinas de percusión suelen ir montadas sobre un camión, como se muestra en la figura nº 1.

El método actúa por impacto del trépano y la barra de carga (4.000-7.000 Kg) sobre el material a perforar, por lo que el efecto será mayor sobre materiales de baja resistencia al impacto (resiliencia) como son las calizas, que frente a materiales plásticos, como las arcillas, que amortiguan, la caída libre del útil de perforación.

Puesto que se trata de un método de perforación discontinuo, una vez que se ha perforado una cierta longitud de sondeo es necesario extraer los recortes arrancados del terreno para que el trépano golpee de nuevo sobre la superficie de roca sana. Por lo tanto, es necesario extraer el trépano del fondo e introducir una campana o cuchara que, mediante un mecanismo de válvula situado en su parte inferior y aplicándole un movimiento alternativo con el cabrestante, se vaya llenando de los recortes del terreno y los extraiga a la superficie hasta que el pozo quede limpio y se introduzca otra vez en el mismo el trépano de perforación, repitiendo sucesivamente la operación para profundizar el sondeo.

La sarta de perforación que se emplea en este método consta de los siguientes elementos (figura nº 2):

- Cable.
- Montera.
- Tijera.
- Barrón.
- Trépano.

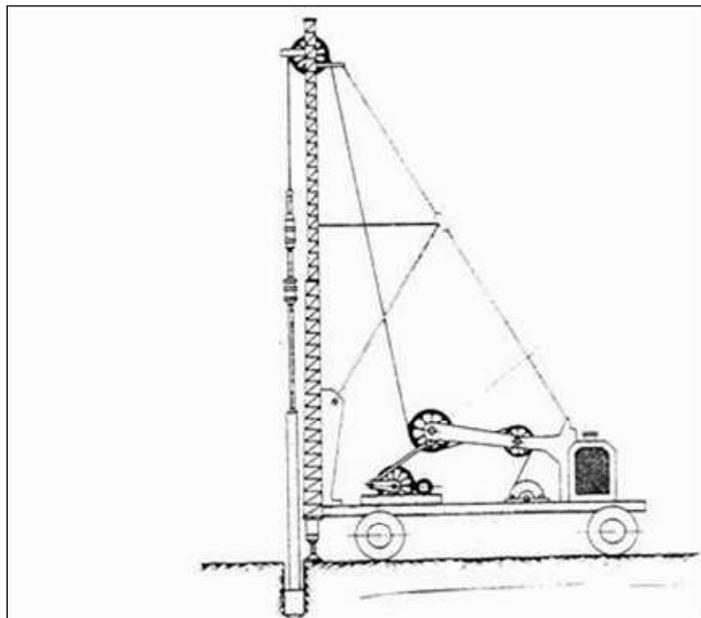


Figura nº 1. Esquema de equipo de percusión.



Fotografía nº 1. Equipo de perforación a percusión.

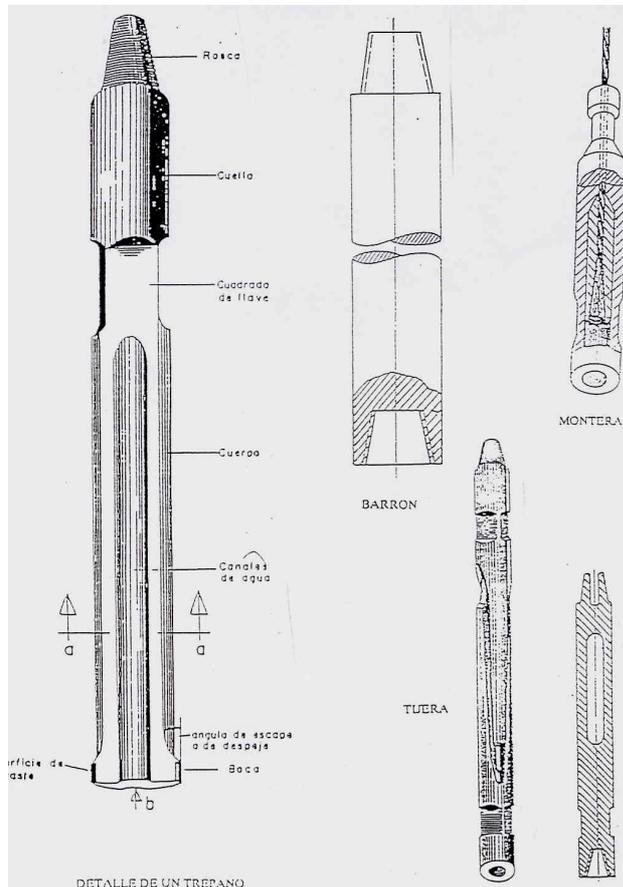


Figura nº 2. Elementos de la sarta de perforación en un sondeo a percusión.

La función de estas herramientas es la siguiente:

- **Trépano:** Es la herramienta que golpea directamente sobre la roca y consta de rosca, cuello, cuadrado de llave, cuerpo de trépano, canales de agua y boca. La superficie de desgaste de la boca se recarga con electrodos especiales. El ángulo de escape y penetración es variable en función del tipo de terreno que se perfore.
- **Barrón o barra de carga:** Proporciona peso a la sarta de perforación con el fin de disponer de más energía de impacto.
- **Tijera o destrabador:** Está formado por dos eslabones engarzados con un juego libre de unos 30 centímetros. Su función es la de permitir el golpeo hacia arriba en el caso de enganche de la sarta de perforación.

- Montera: Es el elemento de unión de la sarta con el cable.
- Cable: Se enrosca a izquierdas para ser compatible con la rosca a derechas de los restantes elementos de la sarta de perforación. El tensado del cable produce un giro sobre sí mismo.

El mecanismo de perforación permite variar la altura de caída del trépano entre 30 y 90 centímetros, mediante la longitud útil de la biela y se puede variar la frecuencia de golpeo entre 30 y 60 golpes por minuto.

Como el cable está enroscado a izquierdas, si se le somete a tensión, levantando ligeramente la herramienta del fondo del pozo, el cable debe girar libremente en el sentido contrario si el sondeo es vertical y no presenta estrías.

Durante la realización de un sondeo a percusión es posible conocer el nivel freático del acuífero y obtener, con el empleo de la cuchara de extracción, muestras de agua del acuífero que nos permitan realizar las correspondientes medidas “in situ” y análisis de las mismas. Incluso se pueden realizar pruebas de producción del pozo mediante la extracción de agua con la válvula (operación que se conoce con el nombre de “valvuleo”).

La información que se obtiene respecto a las características del terreno también puede considerarse como buena, puesto que, salvo desprendimientos dentro de las paredes del sondeo, las muestras que se obtienen en superficie corresponden a la profundidad perforada y por lo tanto no están afectadas de desfase significativo.

La principal ventaja de este método es su versatilidad siendo aplicable a la práctica totalidad de las formaciones geológicas a perforar. Incluso es imprescindible en terrenos de tipo aluvial en los que se presenten materiales sueltos de alta granulometría y permeabilidad (bolos y gravas) que son problemáticos de perforar y que hacen prácticamente inviable la aplicación de cualquier otro sistema. Otra aplicación específica de este método es la de perforación de acuíferos calcáreos con dureza media y baja resistencia al impacto. En caso de grandes diámetros y profundidades de perforación en medios cársticos, con elevados aportes de agua, es prácticamente el único método recomendable.

El inconveniente de este sistema es que se trata de un procedimiento muy lento con rendimientos de perforación que en muchos casos son del orden de tan solo 100 metros/mes con lo que, en igualdad de circunstancias, no puede competir por razones económicas con otros métodos, como por ejemplo el de rotación con circulación inversa, en el caso de tratarse de materiales blandos como los detríticos terciarios.

ROTACIÓN

En función del sentido de circulación del fluido auxiliar empleado en la perforación se distinguen dos tipos de métodos de rotación: con circulación directa y con circulación inversa.

El procedimiento de rotación a circulación directa fue experimentado por primera vez en investigaciones petrolíferas en Texas en 1901. Su origen fue debido fundamentalmente a que el método de percusión es poco apropiado para perforar en materiales blandos e inconsistentes. Se obtuvo muy buen resultado y el método tuvo una gran divulgación sobre todo en los campos de petróleo de California. Posteriormente la perforación “rotary” pasó de aplicarse en materiales blandos a materiales duros según se fueron empleando herramientas más duras con equipos de perforación con mayor capacidad.

En la actualidad el método de perforación a circulación directa es el que se emplea habitualmente para los sondeos de petróleo, donde se alcanzan grandes profundidades, al ser el método de perforación que, en general, presenta mayor versatilidad en la realización de sondeos.

La rotación directa, salvos casos excepcionales, no se debe emplear en sondeos para captación de aguas subterráneas por las razones que a continuación se detallarán. Para realizar este tipo de perforaciones se emplea una variante del método original que es el de rotación a circulación inversa.

El sistema de perforación a rotación, tanto a circulación directa como a circulación inversa, se basa en la aplicación desde superficie de un movimiento de rotación y un empuje al útil de perforación (proporcionado por las barras de carga), que se denomina tricono y que está situado en el fondo del sondeo para conseguir fracturar la roca (figura nº 3 y fotografía nº 2).

El peso que se ejerce sobre el útil de perforación es función de la dureza de la roca y del diámetro de perforación. El par aplicado a la herramienta depende del empuje y del diámetro de perforación.

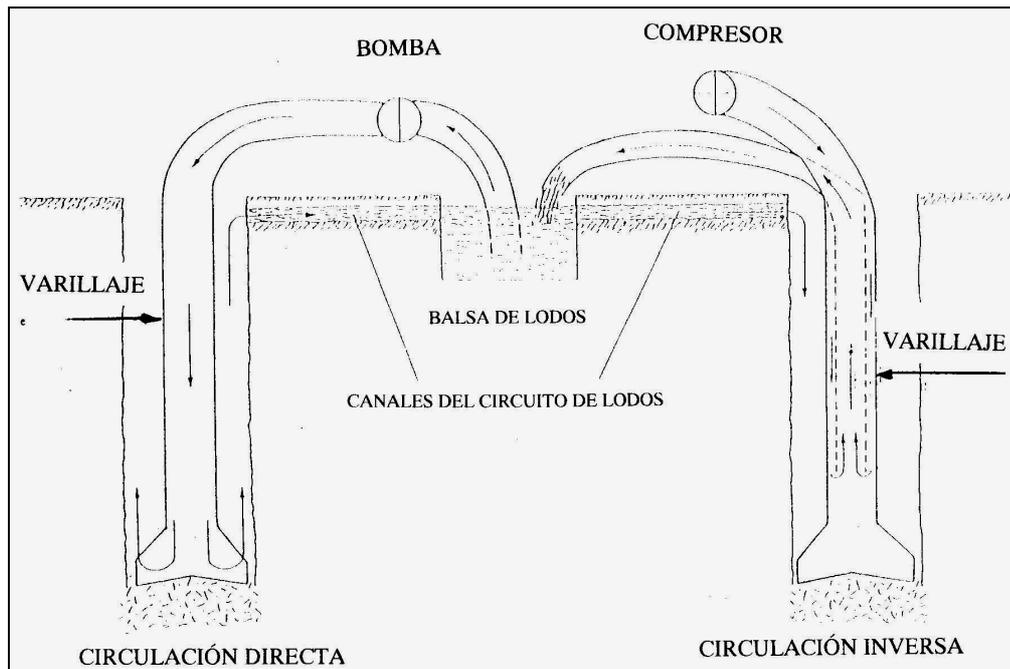


Figura nº 3. Esquema conceptual comparativo de los sistemas de perforación a rotación.

Para transmitir desde la superficie el peso y el movimiento giratorio al tricono se emplea el varillaje de perforación. Este varillaje es hueco y permite, de forma simultánea a la perforación, la circulación por su interior del fluido de perforación que tiene como misión, entre otras, limpiar el sondeo de los recortes de terreno conduciéndolos al exterior y depositándolos sobre balsas construidas a tal efecto.

Según el sentido de circulación del fluido por el interior del varillaje de perforación se habla de rotación a circulación directa o rotación a circulación inversa. En la figura nº 3 se presenta un esquema conceptual de ambos sistemas.



Fotografía nº 2. Tricono utilizado como útil cortante en el sistema “rotary”.

Como se observa en esta figura en el sistema a circulación directa el circuito de perforación viene definido por una balsa en superficie desde la que se inyecta lodo al interior del varillaje mediante una bomba de impulsión. Una vez que el lodo atraviesa los conductos de paso del tricono vuelve a la superficie arrastrando el “detritus”. Este recorrido de vuelta a la balsa se produce por el espacio anular entre el varillaje y la pared del sondeo.

En el sistema de circulación inversa se utiliza un compresor que inyecta aire en el interior de la sarta por medio de un varillaje de doble pared. La inyección de este aire aligera la columna de lodo creando una depresión en el interior del varillaje que fuerza la circulación desde el espacio anular entre la pared del sondeo y el varillaje hacia el interior del mismo.

Entre ambos sistemas existe una diferencia fundamental que radica en que en la circulación directa el “detritus” de perforación sale a la superficie por el espacio anular comprendido entre la pared del sondeo y el varillaje y que en la circulación inversa los detritus de perforación ascienden por el interior del varillaje. Esta diferencia condiciona el hecho de que la circulación directa no se deba aplicar para sondeos de captación de agua subterránea, empleándose en estos casos el método de circulación inversa. Esto se debe a que en la práctica totalidad de los sondeos para captación de agua subterránea el diámetro

de perforación es tal que la superficie del espacio anular entre la pared del sondeo y el varillaje de perforación tiene un área mayor que la superficie interior del varillaje, reduciéndose la sección por la que asciende el detritus de perforación.

Puesto que el caudal que circula por un conducto viene determinado por:

$$Q = V \times S$$

Donde:

Q = Caudal de circulación del fluido de perforación (m³/s).

S = Sección del conducto (m²).

Teniendo en cuenta lo anterior, resulta que para arrastrar los detritus de perforación producidos por el útil de perforación con una velocidad “V”, el caudal necesario del lodo de perforación es muy superior en circulación directa, con mayor superficie, que en circulación inversa.

En la práctica se requerirían bombas de impulsión de lodos de gran capacidad de impulsión, lo que supondría el empleo de equipos con elevadas potencias instaladas, que superan las capacidades de los equipos de perforación que habitualmente se emplean para captación de agua. La práctica a la que recurren los perforistas de circulación directa es la de emplear lodos artificiales preparados a partir de arcillas del tipo bentonita, que aumentan notablemente la densidad y viscosidad del lodo, y que, por tanto, presentan capacidades de arrastre de sólidos mayores frente a los lodos naturales y permiten trabajar con velocidades más bajas de circulación del fluido de perforación. Hay que considerar que utilizar lodos bentoníticos para la realización de un sondeo supone que durante la realización de una perforación para captación de aguas subterráneas se inyecta un agente arcilloso que impermeabiliza el terreno atravesado por lo que la captación tendrá un rendimiento muy inferior al previsto en cuanto a obtención de caudales de agua y optimización de las inversiones realizadas en la obra de captación de agua subterránea.

En ambos sistemas de circulación, al lodo, además de los lodos bentoníticos, se le puede añadir, en su caso, una gran cantidad de aditivos para hacer frente a problemas específicos como es la pérdida de circulación y otras complicaciones del sondeo. Entre estos aditivos se encuentran los agentes densificadores, fluidificantes, colmatantes, descolmatantes, etc.

En definitiva, el método de perforación a circulación inversa presenta las siguientes ventajas comparativas respecto de la circulación directa:

- Permite perforar con un mayor diámetro de perforación sin empleo de lodos bentoníticos.
- Se obtienen muestras del terreno atravesados más representativas, puesto que al ser la velocidad ascensional más elevada existe un desfase de tiempo menor entre el momento de la perforación y su ascenso a superficie. Además en circulación directa la muestra obtenida se contamina con el terreno de la pared del sondeo según va ascendiendo.
- Las paredes del sondeo sufren una menor erosión pues las partículas son extraídas por el interior del varillaje
- Menor coste energético al ser la potencia a emplear inferior.

Los elementos principales que componen un equipo de perforación a circulación inversa son los siguientes:

- Cabeza o mesa de rotación.
- Mástil y soporte.
- Sistema de extracción.
- Centrador.
- Cabrestantes.
- Equipo de soldadura.
- Panel de mandos.
- Compresor.
- Motores.

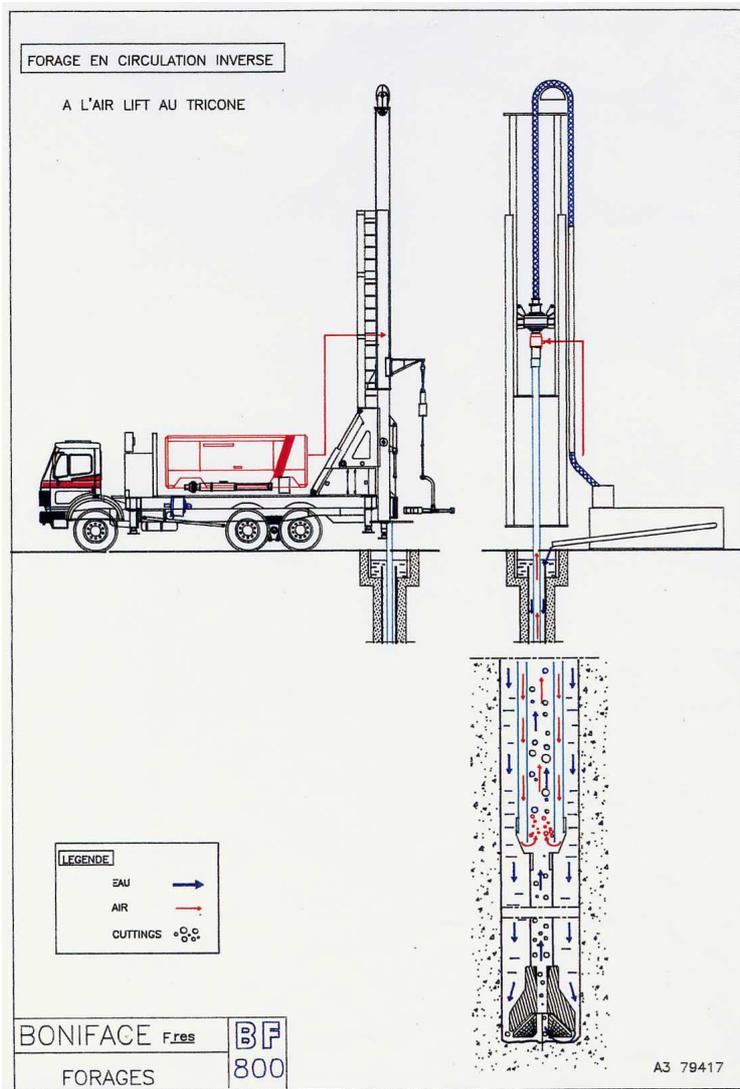


Figura nº 4. Esquema de la circulación del lodo en la perforación a rotación con circulación inversa.

La cabeza o la mesa de rotación es el elemento que trasmite el movimiento de rotación al varillaje de perforación. La tendencia actual es la de equipamientos hidráulicos que utilizan cabezas de rotación en lugar de mesa, obteniéndose rendimientos sensiblemente superiores, del orden de 50-60 m/día, frente a 15-20 m/día con el empleo de mesa de rotación con accionamiento mecánico.



Fotografía nº 3. Máquina de perforación a rotación con circulación inversa, pudiéndose observar el mástil, cabeza de rotación, manguera de lodos y el varillaje.

El sistema de extracción de la sarta de perforación es el que limita la capacidad de perforación del equipo. En la actualidad, por razones económicas, los equipos de mayor capacidad de perforación a circulación inversa existentes en el mercado se sitúan en profundidades máximas de 600-800 m en terrenos blandos. Este tipo de terrenos requieren un menor peso de las barras de carga que actúan sobre el tricono, por lo que la capacidad de tiro de los equipos puede emplearse en la extracción de una mayor longitud de varillaje de perforación, lo que permite realizar pozos de mayor profundidad.

La sarta de perforación está formada por los siguientes elementos:

- Útil de perforación.
- Barras de carga o lastrabarrenas.
- Varillaje.
- Cabeza de inyección.

El útil de perforación más utilizado es el tricono que está formado por tres piñas que giran libremente sobre sus ejes que no tienen una disposición simétrica para producir el arranque de material por rodadura y cizalla (ver fotografía nº 2). Si la formación es blanda los dientes son más largos y espaciados.

Las barras de carga permiten dar peso al tricono sobre la formación a perforar. Este peso es función de la dureza de la roca. Como se observa en el diagrama de esfuerzos (figura nº 5), el punto neutro de la sarta debe situarse en esta barra, trabajando todo el varillaje y el 25% de dicha barra a tracción y el resto de la misma a compresión.

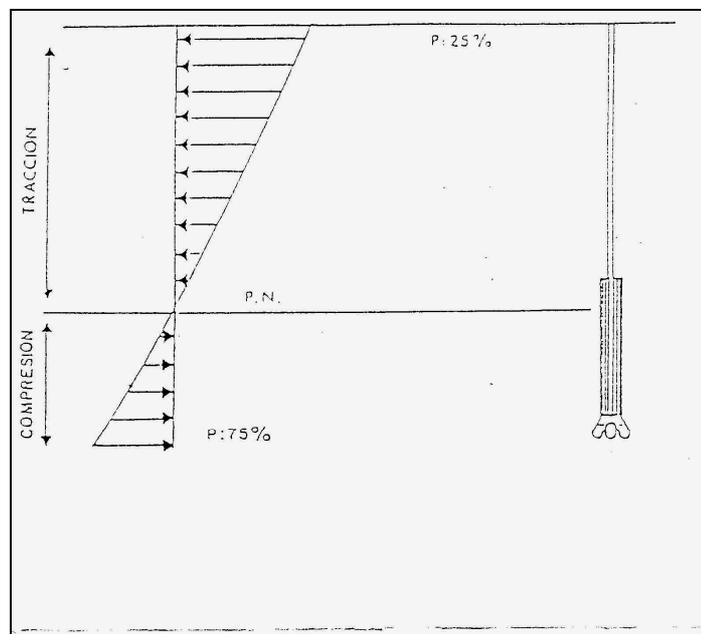


Figura nº 5. Distribución de los esfuerzos en la sarta de perforación a rotación.

Las varillas se unen entre sí mediante rosca y deben trabajar a tracción para evitar su rotura y la desviación del sondeo. En el procedimiento de la circulación inversa hay dos tipos de varillaje: varillaje de doble pared y varillaje de pared simple. El varillaje de doble pared conduce el aire desde el compresor hasta el interior de la sarta donde se mezcla con el lodo natural para aligerar la columna.

La cabeza de inyección suspende la columna de perforación, permitiendo la rotación y proporcionando la conexión a la manguera de aire comprimido y a la de descarga a la balsa. La barra conductora transmite el movimiento de rotación a todo el varillaje.

El lodo que se utiliza en circulación inversa es lodo natural. Durante la perforación deben controlarse su densidad, viscosidad, cake, filtrado, pH y contenido en arena, entre otros.

Si se producen variaciones de estos parámetros fuera de los límites admitidos es preciso proceder a su control mediante el aclarado de los lodos y limpieza de las balsas. Las funciones del fluido de perforación son las siguientes:

- Evacuar el “detritus” producido en la perforación.
- Refrigerar el tricono.
- Mantener la estabilidad de las paredes del sondeo.
- Impedir la salida de agua de los distintos acuíferos atravesados durante la perforación.

Las principales propiedades del lodo de perforación, que se controlan son:

- **Densidad:** Capacidad del lodo de ejercer contrapresión en las paredes del sondeo, controlando las presiones litostática e hidrostática en las formaciones perforadas. Valor óptimo 1,05 g/cc.
- **Viscosidad:** Capacidad del lodo para hacer una buena limpieza del útil de perforación, mantener una suspensión y desalojar detritus y facilitar la decantación en la balsa de lodos. Valor óptimo 30 s.
- **Cake:** costra de lodo que se forma en la pared del sondeo que sea resistente e impermeable. Su misión es dar cohesión a la formación en contacto con la perforación, ayudando a sostener las paredes del sondeo e impermeabilizándolas. Valor óptimo < 2 mm.

Durante la realización de un sondeo por el método de rotación a circulación inversa no es posible obtener información sobre los niveles piezométricos y la calidad del agua del acuífero explotado, dado que el nivel de agua observado en el interior del sondeo es el de la balsa de lodos y el agua es mezcla, en proporción variable, entre la aportada a la perforación y la del acuífero atravesado.



Fotografía nº 4. Dispositivos para control propiedades del lodo: balanza Baroid (densidad), Embudo Marsh (viscosidad) y Filtro-Prensa (cake).

Con este método de perforación sí se obtiene una buena información litológica del terreno atravesado, puesto que los detritus obtenidos ascienden a gran velocidad por el interior del varillaje de perforación por lo que el desfase es muy pequeño y además no hay contaminación con el material de las paredes del sondeo.

El método de perforación a circulación inversa es ideal para efectuar obras de captación de agua subterránea en formaciones no consolidadas (arenas, limos, arcillas, etc.) con elevados rendimientos.

Este sistema no es recomendable a partir de materiales de dureza media (calizas, dolomías, areniscas compactadas, etc.) debido a que las capacidades de extracción de los equipos convencionales empleados para la captación de aguas no permiten utilizar las barras de carga con peso suficiente acorde con la dureza del terreno a perforar. En este caso es más conveniente el empleo de otros sistemas de perforación como el de percusión o el de rotopercusión.

Un inconveniente importante que presenta este método es que, incluso en el caso de terrenos blandos, no se debe emplear en formaciones que sean muy permeables y/o muy inestables, características que en la práctica suelen aparecer conjuntamente. Si las formaciones son muy permeables se producen grandes pérdidas del lodo de perforación y descenso de los niveles del mismo en el sondeo con el peligro de hundimiento de la obra. Cuando los terrenos son muy inconsistentes causan problemas de estabilidad de las paredes con frecuentes derrumbes.

Estos problemas en circulación directa suelen ser solventados con el empleo de aditivos sobre los lodos bentoníticos. Sin embargo la capacidad de respuesta en circulación inversa es muy limitada y frente a los problemas anteriores hay que pensar en realizar entubaciones auxiliares que complican la realización de la obra pues implican reducciones de los diámetros de perforación previstos que pueden comprometer la instalación de los equipos de bombeo diseñados. Al utilizar tubería auxiliar existe también la posibilidad de no poder recuperar estas tuberías que son ciegas y que sellarían zonas productivas. Por otra parte la operación de entubación auxiliar no garantiza que algunos metros de perforación más abajo de la entubación vuelva a producirse el mismo problema.

ROTOPERCUSIÓN

El método de rotopercusión neumática con martillo en fondo (más conocido como rotopercusión) es el sistema de perforación más moderno de todos los que se utilizan en la perforación de sondeos para captación de aguas subterráneas.

En este sistema de perforación el martillo se sitúa en el fondo del sondeo y es accionado mediante el empleo de aire comprimido.

Análogamente al sistema de rotación, en la rotopercusión se emplean dos modalidades, la rotopercusión directa y la rotopercusión inversa con gran diámetro, cuyas denominaciones se basan en criterios coincidentes con los correspondientes a los de la rotación en cuanto al sentido de circulación del fluido de perforación, el aire en rotopercusión, por el interior del varillaje. A diferencia de la rotación, ambas modalidades se pueden emplear para la perforación de captaciones de agua subterránea.

El sistema que se emplea habitualmente es la rotopercusión directa.

El método de rotopercusión consiste básicamente en que el aire suministrado por un compresor circula por dentro del varillaje de la sarta de perforación y acciona el martillo neumático situado en el fondo del sondeo y ese mismo aire es utilizado para la extracción del detritus, mientras la sarta de perforación gira lentamente mediante la aplicación en superficie de un movimiento de rotación y un empuje.

Es aplicable a la técnica de perforación en rotopercusión el mismo esquema conceptual indicado en la figura nº 6, en cuanto a la circulación del aire en un sentido u otro. Para trasponer este esquema hay que considerar también que el útil de perforación en rotopercusión es un martillo y el fluido de circulación es aire.

Tanto en circulación directa como en circulación inversa para mejorar la capacidad del aire como vehículo de arrastre de detritus se le inyecta un espumante con lo que se consigue operar con velocidades menores.

En la práctica la rotopercusión a circulación directa está muy limitada en el tamaño del diámetro de perforación, pues el ascenso de los recortes por el anular entre el varillaje y la pared del sondeo limita las posibilidades de los compresores empleados.

La rotopercusión a circulación inversa con gran diámetro permite obtener mayores diámetros de perforación que en circulación directa con otras ventajas añadidas, que ya se han comentado para el caso de la rotación, como son:

- Obtener muestras del terreno y del agua más representativas, evitando desfases y contaminaciones con la pared del sondeo.
- Las paredes del sondeo sufren una menor erosión.
- Menor coste energético, al ser la potencia a emplear inferior.

El equipo básico de una sonda de rotopercusión neumática con martillo en fondo, tanto a circulación directa como a circulación inversa debe contar con los siguientes elementos (ver figura nº 6):

- La cabeza de rotación que está movida por un circuito hidráulico.
- La torre o mástil de la máquina de perforación abatible y elevable.
- El conjunto del motor diesel, refrigerado por aire, con el compresor de alta presión y alto caudal de aire.
- Un sistema de empuje y extracción regulables hasta las máximas capacidades.
- El carrusel que es un conjunto portador de varillaje que se utiliza para colocar nuevas varillas en la sarta, conforme se va profundizando el sondeo.

- Un cabrestante auxiliar para recoger las varillas y las tuberías de revestimiento.
- Una bomba para introducir el espumante dentro del circuito de aire a presión.

La sarta de perforación de un equipo de rotopercusión está formada por los siguientes elementos:

- Un martillo con adaptador roscado. La boca o tallante del martillo es de botones de carburo de tungsteno.
- En el caso de la circulación inversa es necesario el empleo de un inversor de flujo y de un estabilizador.
- Adaptador o conexión roscada a la cabeza giratoria.
- Las varillas que están conectadas a la cabeza de rotación. En el caso de la circulación directa el varillaje es liso y en el caso de la circulación inversa es de doble pared.

Las funciones del aire en la perforación a rotopercusión son las de accionar el martillo en fondo, enfriar y limpiar la boca de perforación y conducir el “detritus” al exterior. Del total de la potencia dada por el compresor al menos un 20 % se emplea en el accionamiento del martillo en fondo.

A diferencia del sistema de perforación a rotación, las limitaciones en cuanto a la profundidad de perforación de un equipo de perforación a rotopercusión no vienen determinadas por la potencia de extracción del equipo sino que está condicionada fundamentalmente por las capacidades del compresor utilizado. Estas capacidades vienen definidas en primer lugar por su presión nominal, en cuanto a profundidad y por su caudal de trabajo en cuanto al diámetro de la perforación a realizar.

Si se dispone de un compresor de “P” Kp/cm² y se considera que las pérdidas de carga en el circuito y la caída de presión por accionamiento del martillo suponen un total de un 30 % (en circulación inversa pueden ser superiores), la profundidad máxima que se puede perforar con ese compresor, por debajo de un nivel de agua estable, es de $(0.7 \cdot P \cdot 10)$ metros.

Es preciso destacar que a veces durante la perforación del sondeo la acción del propio compresor con el arrastre de aire provoca un descenso del nivel de agua. Este último fenómeno ocurre en formaciones poco productivas y por lo tanto en estos casos se puede perforar a mayores profundidades que si estamos en presencia de un buen acuífero.

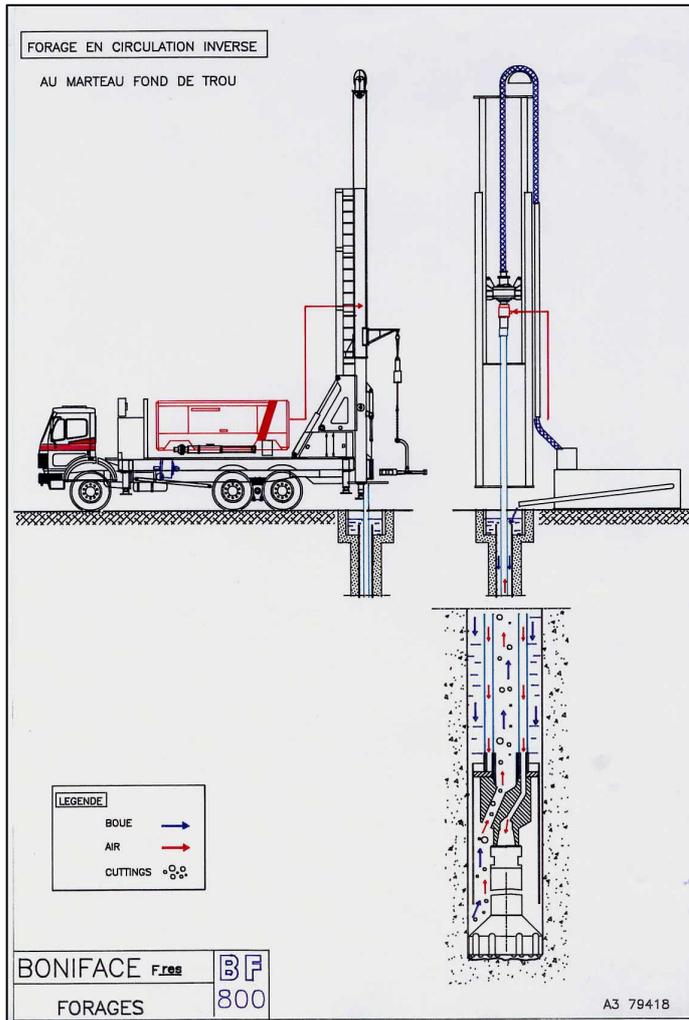


Figura nº 6. Funcionamiento del sistema de perforación a rotopercusión a circulación inversa y fotografía de una máquina de rotopercusión.

Los compresores de mayor presión que se utilizan son de 25 Kp/cm², por lo tanto con estos equipos no se deben planificar sondeos con profundidades superiores a 200 metros bajo el nivel de agua en acuíferos de potencial medio. Este problema podría solventarse en teoría con el empleo de compresores conectados en serie (“booster”), pero este procedimiento,

resulta costoso y su utilización tampoco es muy recomendable puesto que, por otra parte, la rotopercusión presenta en muchas ocasiones problemas de verticalidad que se pueden acentuar conforme aumenta la profundidad de los sondeos.

Otro aspecto condicionante del compresor viene definido por el caudal de aire, que afecta fundamentalmente a los equipos que operan por circulación directa. Aunque el uso de espumantes biodegradables inyectados en el aire permite disminuir las velocidades de arrastre de detritus desde 1.500 m/min a 100-120 m/min existen grandes limitaciones en cuanto a los diámetros de perforación que se obtienen por este sistema.

Para los compresores de mayor capacidad empleados en rotopercusión (30 m³/min), el diámetro de perforación no suele superar, en sondeos no muy profundos, los 320 mm al que corresponde un diámetro de entubación de 250 mm, siempre y cuando se trate de materiales compactos en los que no sea necesario acondicionar un empaque de grava. De esta forma queda también limitado el diámetro de la electrobomba sumergible que se va a instalar en el mismo, a un valor máximo de 8 pulgadas. No obstante en el caso de sondeos más profundos lo habitual es perforar con diámetro de 220 mm para entubar con 180 mm. En estas condiciones los equipos que se suelen instalar son de 4-6 pulgadas de diámetro, lo que supone una seria limitación en cuanto a la potencia de las electrobombas equipadas en estos sondeos.

Para afrontar estas limitaciones, en cuanto a diámetro, a veces se pueden conectar en paralelo dos compresores. En estos casos, para lograr el mayor diámetro del sondeo se utiliza un varillaje de mayor diámetro que disminuya el espacio anular entre el varillaje y la pared del sondeo, y por lo tanto los caudales necesarios. Ocurre que en este caso sí que habría una gran dependencia de la capacidad de extracción del equipo debido al mayor peso de la sarta de perforación.

El sistema de rotopercusión es el procedimiento más idóneo desde el punto de vista de la información hidrogeológica que se obtiene durante la realización de la perforación, puesto que con la circulación de aire se realiza un bombeo del agua existente en el interior del sondeo que es aportada por los niveles acuíferos atravesados.

De esta forma este sistema es el único que permite “a priori” una estimación de los caudales de agua subterránea a extraer de la captación antes de la finalización de la perforación, pudiendo tomar decisiones a la vista de los resultados sobre la conveniencia o no de la entubación, del ensanche o incluso de la necesidad de realizar pozos con gran diámetro por otros sistemas, como la percusión.

También es posible obtener muestras de agua del acuífero a explotar y se puede proceder a realizar medidas “in situ” e incluso análisis que permitan conocer la hidroquímica del agua.

Como en el caso del sistema de rotación, la información litológica que se obtiene por el método de circulación inversa es mejor que la aportada en la circulación directa puesto que los desfases son pequeños y no existen contaminaciones con las paredes de la perforación.

El sistema de rotopercusión tiene la gran ventaja de la rapidez de ejecución de las perforaciones y de ser el sistema que permite obtener una mayor información hidrogeológica durante la realización de los sondeos. Puesto que por este sistema se obtienen rendimientos que superan los 80 m/día se puede saber muy rápidamente si una determinada perforación es adecuada como captación hidrogeológica.

Este método de perforación, junto con la percusión, es el sistema más adecuado para rocas duras. En el caso de calizas carstificadas la pérdida de aire por las cavidades puede ser un problema si el aire no arrastra el “detritus” y por tanto quedan depositados en el fondo de la perforación.

El método de rotopercusión es el único recomendable para abastecimientos puntuales, que se localicen en formaciones muy duras y con pocas posibilidades para la extracción de agua. Entre este tipo de formaciones se encuentran las rocas ígneas y las metamórficas, que son zonas desfavorables para la captación de aguas subterráneas.

El inconveniente fundamental de utilizar la rotopercusión como método para realizar captaciones hidrogeológicas radica en el hecho de que este sistema tiene su funcionamiento óptimo en aquellas circunstancias que no son favorables desde el punto de vista hidrogeológico: materiales duros, consistentes, con poca presencia de agua.

Otra limitación del sistema de rotopercusión es que tiene poca capacidad de respuesta frente a los problemas que surgen en el sondeo durante su construcción, especialmente en materiales sueltos (hundimientos, agarres, etc.).

Además, en materiales sueltos la rotopercusión no es el sistema de perforación más adecuado debido a la baja efectividad del golpeo del martillo en materiales blandos.

En el sistema de rotopercusión la presión de la sarta se realiza desde la cabeza de rotación por lo que al estar sometida toda la sarta de perforación a compresión es muy frecuente tener problemas con la verticalidad del sondeo especialmente en el caso de formaciones heterogéneas que presenten buzamientos. Las desviaciones que se produzcan en la perforación de una captación hidrogeológica pueden comprometer su posterior entubación y equipamiento electromecánico.

SELECCIÓN DEL MÉTODO DE PERFORACIÓN

En el cuadro nº 1 se presenta un resumen, no exhaustivo, de los criterios de selección del método de perforación. Los parámetros que intervienen básicamente son: litología (dureza, en función de la resistencia a compresión), profundidad y diámetro de perforación.

Respecto a la clasificación de diámetros como “grande” o “pequeño”, se fija en 300 mm el diámetro límite entre ambos. Análogamente en lo referente a la longitud de la captación la barrera entre captación superficial y profunda se establece en unos 100 m.

Entre los sistemas de perforación que se recogen en el cuadro nº 1 no se incluye la perforación a rotación a circulación directa por ser un procedimiento que no se debería aplicar en captaciones hidrogeológicas, por el empleo de lodos bentoníticos y otros aditivos (García, 2014).

A continuación se describen los distintos criterios a considerar para cada tipo de roca:

- Rocas muy duras:

Son aquellas cuya resistencia a compresión es superior a 2.000 Kp/cm² (pizarras, cuarcitas, granitos, basaltos, etc.)

Se caracterizan generalmente por su consistencia y por sus escasos aportes de agua a las captaciones, por lo que en principio es muy adecuado el empleo del sistema de rotopercusión. Teniendo en cuenta que en estos materiales, con casi nulas posibilidades hidrogeológicas, no tiene sentido realizar captaciones de gran diámetro o profundidad. En estas rocas el sistema más idóneo es la rotopercusión a circulación directa, con carácter de investigación previa.

- Rocas duras:

Son aquellas rocas que presentan una resistencia a compresión comprendida entre 800 y 2.000 Kp/cm² (calizas y areniscas duras).

Los sistemas de perforación aplicables son los de rotopercusión y percusión. Si el diámetro es pequeño la perforación se realizará a rotopercusión directa puesto que en la técnica de percusión los trépanos que habitualmente utilizan los equipos disponibles en el mercado suelen ser de diámetros iguales o superiores a 400 mm.

Si se trata de mayores diámetros en el caso de sondeos poco profundos se puede utilizar tanto el método de percusión como de rotopercusión directa, dado que la rotopercusión inversa de gran diámetro supone unos costes de puesta en obra que no se pueden asumir para sondeos cortos.

Si los sondeos son más profundos hay que pensar en la percusión, con el inconveniente de su lentitud, lo que implica periodos de tiempo muy elevados para la ejecución de la captación. Otra alternativa es la rotopercusión inversa con gran diámetro cuya problemática corresponde a sus elevados costos y cierta incertidumbre en sus resultados al ser una práctica de empleo poco frecuente.

- Rocas de dureza media:

Son rocas que presentan una resistencia a compresión comprendida entre 200 y 800 Kp/cm² (calizas y areniscas).

Para este grupo de rocas es aplicable lo expuesto en el apartado anterior (rocas duras), si bien se ha considerado también la posibilidad de utilizar la rotación a circulación inversa pero con muchas reservas, en función de la consistencia y dureza de la roca.

- Rocas blandas:

Son rocas que presentan una resistencia a compresión inferior a 200 Kp/cm^2 (arenas, limos, arcillas y margas, entre otras).

Para realizar captaciones de gran diámetro, si son de poca profundidad, se construirán pozos abiertos (máximo unos 30 metros), o se realizarán sondeos de percusión o circulación inversa. Si la profundidad aumenta y se requiere un diámetro grande lo más adecuado es emplear la circulación inversa puesto que la percusión, aunque se puede utilizar, quizás no resulte competitiva desde el punto de vista económico.

En el caso de pequeños diámetros lo más adecuado es considerar la rotación a circulación inversa.

Cuando el sondeo atraviese distintas formaciones será preciso realizar un análisis global que permita una solución óptima, compatibilizando todos los criterios anteriores.

Una vez seleccionado el método de perforación más adecuado y considerando las características geométricas en cuanto a profundidad y diámetro se puede realizar una estimación de las capacidades requeridas de los equipos de perforación y elementos auxiliares.

RESUMEN DEL PROCEDIMIENTO DE SELECCIÓN DEL MÉTODO DE PERFORACIÓN PARA CAPTACIONES HIDROGEOLÓGICAS				
DUREZA	EJEMPLO DE LITOLÓGÍA	DIÁMETRO	CAPTACIÓN SUPERFICIAL (<100m)	CAPTACIÓN PROFUNDA
MUY DURA Resistencia a compresión >2.000 Kp/cm ²	Pizarras Cuarcitas Granitos Basaltos	Grande	X	X
		Pequeño (<300 mm)	RotoperCUSión con circulación directa	X
DURA Resistencia a compresión entre 800-2.000 Kp/cm ²	Calizas duras Areniscas duras	Grande	RotoperCUSión con circulación directa (¿inversa?)	RotoperCUSión con circulación inversa
		Pequeño (<300 mm)	RotoperCUSión con circulación directa	RotoperCUSión con circulación directa (¿inversa?)
MEDIA Resistencia a compresión entre 200-800 Kp/cm ²	Calizas Areniscas	Grande	RotoperCUSión con circulación directa (¿inversa?) ¿Rotación a circulación inversa?	RotoperCUSión con circulación Inversa ¿Rotación a circulación inversa?
		Pequeño (<300 mm)	RotoperCUSión con circulación directa ¿Rotación a circulación inversa?	RotoperCUSión con circulación directa (¿inversa?) ¿Rotación a circulación inversa?
BLANDA Resistencia a compresión < 200 Kp/cm ²	Arenas Limos Margas Arcillas	Grande	Pozos abierto Percusión Rotación a circulación inversa	Percusión Rotación a circulación inversa
		Pequeño (<300 mm)	Rotación a circulación inversa	Rotación a circulación inversa

Cuadro nº 1. Resumen del procedimiento de selección de métodos de perforación para captaciones hidrogeológicas. (García, 2014).

3.2. TESTIFICACIÓN GEOFÍSICA DE SONDEOS

La testificación geofísica de sondeos es la medición de diferentes parámetros geofísicos dentro de un sondeo mediante el empleo de sondas. La representación gráfica de cada uno de esos parámetros medidos con respecto a la profundidad constituye el resultado de esta técnica. Estos documentos son los denominados registros geofísicos, diagráfias o logs.

Para realizar la testificación geofísica se emplea un equipo de medida, situado en superficie, unas sondas y el cable que une ambas partes. Los equipos de medición actualmente son digitales, desde la adquisición de los datos en el fondo del pozo por las sondas, su transporte por el cable y su almacenamiento y tratamiento en el equipo.

La metodología general es la siguiente: una vez finalizada la perforación del sondeo se introduce la sonda y, bien durante el descenso de la misma o en su ascenso se inicia el proceso de registro.

Las sondas son los instrumentos que se introducen en el sondeo y que, dada la configuración de éste, condicionan que la morfología de aquéllas sea también alargada y, lo que es más importante, de escaso diámetro, para que esta característica no suponga un impedimento en su introducción en algunos sondeos. Como los parámetros que miden son diferentes, también lo es la maquinaria que encierra en su interior lo cual va a condicionar que los diámetros sean también variables.

En registros de tipo hidrogeológico, como son los de pozos de captación de agua, siempre es conveniente que la primera sonda sea la que registre los parámetros concernientes a la calidad del agua (conductividad y temperatura del fluido).

La testificación geofísica del sondeo se hace con el sondeo desnudo, ya que uno de los principales objetivos es tomar información para hacer el diseño de la columna de entubación.

Concluido el proceso de registro y una vez comprobada la calidad constructiva del sondeo (verticalidad adecuada) se observará en campo el registro con los principales parámetros para la colocación de filtros (radiactividad gamma natural, resistividad normal corta y

larga, potencial espontáneo y conductividad del fluido). La colocación de filtros dependerá de la situación y potencia de los tramos que aporten agua y de la calidad de la misma.

Todas estas operaciones deben realizarse con cuidado pero sin pérdidas de tiempo con el fin de minimizar el tiempo durante el cual el sondeo está sin circulación de fluido, con el consiguiente riesgo de derrumbe de las paredes del sondeo, caso de acuíferos detríticos no consolidados.

A continuación se describen los registros geofísicos más comunes para la hidrogeología.

Radiactividad Gamma Natural.

Este registro refleja el valor de radiación gamma que, de forma natural, emiten las distintas litologías. Litologías diferentes emitirán intensidades diferentes de radiación lo que permitirá diferenciar capas de distinta radiactividad natural y, por atribución, capas de distinta litología (Rider, 1986).

Este registro es el más común y el más relacionado con la litología. Entre las aplicaciones principales de este registro se pueden señalar: la identificación litológica y la determinación del porcentaje de contenido en arcillas.

Es muy importante disponer de los datos aportados por las muestras de la perforación (ripios o testigos) pues muchas veces hay litologías que pueden dar valores de radiactividad parecidos. Una serie en la que alternan capas de caliza con capas de margas puede confundirse con una serie detrítica de alternancia de arenas cuarcíticas con arcillas. Tanto las calizas como las cuarzoarenitas tienen bajos valores de radiactividad y tanto las margas como las arcillas presentan valores altos.

Potencial Espontáneo

Este registro refleja las medidas de la diferencia de potencial natural entre un electrodo localizado en el sondeo y otro emplazado en superficie. Estas diferencias de potencial se generan a partir del desequilibrio eléctrico creado al poner en contacto, mediante un sondeo, formaciones litológicas que naturalmente están desconectadas.

Para que se produzcan estas diferencias de potencial se hace necesaria la coexistencia de tres factores: existencia de un fluido conductor en el sondeo, presencia de una capa permeable rodeada por una formación impermeable y una diferencia de salinidad (o presión) entre el fluido del sondeo y el agua de formación. Con todo ello se producen las corrientes potenciales al entrar en contacto los fluidos correspondientes a partir de un medio poroso o de un medio semipermeable (en función de que sea uno u otro medio la polaridad va a ser opuesta, positiva o negativa, respectivamente).

Entre las aplicaciones más importantes de este registro destaca la determinación de la permeabilidad o impermeabilidad de las capas, es decir, que permite diferenciar las capas que contienen agua y son permeables de las capas que son impermeables (o que están cementadas) y, por otro lado, diferenciar las capas permeables con agua dulce de las que contienen agua salinizada.

Resistividad

Es el registro que refleja la propiedad intrínseca de cada material para oponerse al flujo de la corriente eléctrica. Este parámetro, opuesto a la conductividad, es muy elevado en los materiales que forman la roca (cuarzo, calcita, dolomita), del orden de 100×10^6 ohm·m, pero el agua de los poros y la capacidad del cambio catiónico de los minerales arcillosos reducen su valor en gran medida. Al final, la resistividad de una formación va a depender de diversos aspectos, como:

- La salinidad del agua de formación
- El volumen de saturación de agua en los poros
- La geometría de los poros
- La temperatura de la zona
- La morfología y tipos de minerales arcillosos

La resistividad va a ser, por tanto, función de la litología y su textura (porosidad, fracturación, etc). En términos generales, calizas, dolomías, areniscas y granitos, por ejemplo, van a presentar mayores resistividades que arcillas, margas o calizas fracturadas, dolomías fracturadas o granitos fracturados o alterados. Esta fracturación y/o alteración va a ser uno de los condicionantes del descenso del valor de resistividad de dicha formación.

Teniendo en cuenta que una formación porosa o fracturada va a sufrir invasión por el lodo, esta invasión va a condicionar que la resistividad varíe entre la zona invadida y la zona virgen.

Si la resistividad somera y la profunda son iguales implica que la invasión es muy penetrante (poca porosidad o fracturación). Si es mayor la profunda, implica que el agua de la formación es más dulce que el lodo de perforación. Si, por el contrario, es menor la resistividad de la formación, es indicativo que el agua de la formación es más salina que el lodo.

Dada la importante relación entre resistividad y litología, este registro es uno de los más empleados para interpretaciones litológicas y de la textura. Así, una formación calcárea presentará una determinada resistividad alta y los descensos en dicho valor van a indicar tramos de mayor porosidad, relacionados con presencia de fracturas.

Conductividad y temperatura del Agua

Este registro geofísico refleja el valor de conductividad del agua contenida en el pozo. Las sondas pueden medir o la conductividad o la resistividad o ambas. La conductividad del agua es un parámetro que, en cierta medida, indica la mayor o menor concentración de sales en la misma, es decir, su salinidad, dado que los incrementos en la concentración de sales en un fluido van a facilitar la conducción de la corriente eléctrica.

Este parámetro de los fluidos puede variar en función de la temperatura.

Para una misma concentración, a mayor temperatura, la conductividad va a ser también mayor y, a menor temperatura, la conductividad disminuye. Por esta razón, de forma combinada a la resistividad, se mide la temperatura del fluido con la misma sonda para observar dos aspectos: por un lado, comprobar que las posibles variaciones de conductividad son debidas a variaciones en la concentración de sales y no a variaciones de temperatura y, por otro lado, para corregir en el registro de la conductividad el efecto que produce la temperatura.

Entre las ventajas de este registro destaca la posibilidad de ver de forma continua el valor y la variación en la vertical de este parámetro, continuidad que no pueden ofrecer ni el

conductímetro ni la sonda tomamuestras. Es esta continuidad la que permite identificar los aportes de agua de las diferentes capas, la posición de interfases de agua e, incluso, inferir la existencia de flujos dentro del sondeo.

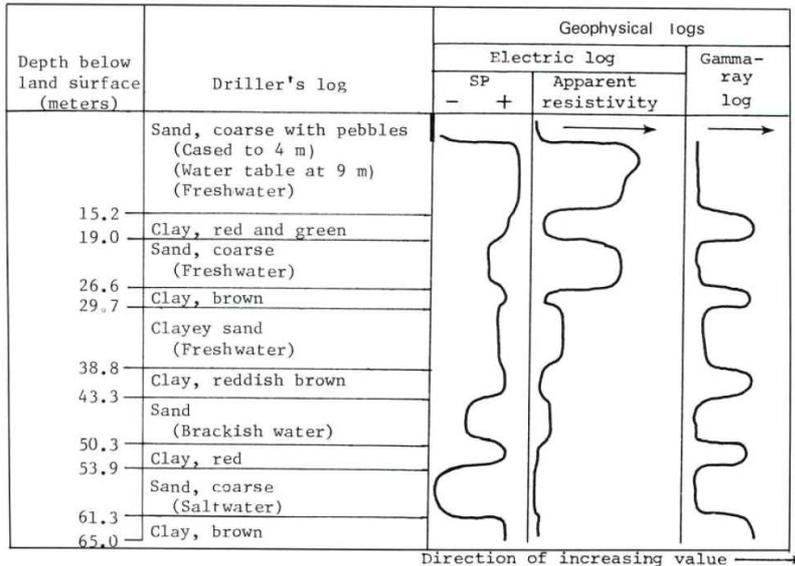
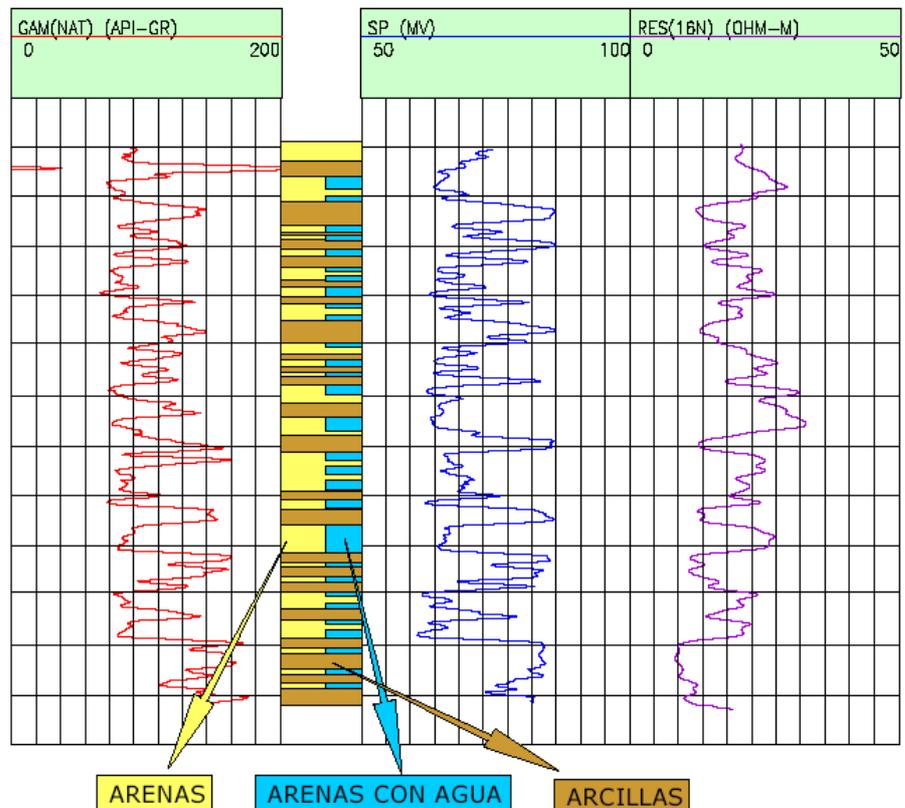


Figura nº 7. Registros geofísicos de Radiactividad Gamma Natural (izquierda), Potencial Espontáneo (centro) y Resistividad Normal 16" (derecha) obtenidos en un sondeo perforado en la Cuenca Detrítica de Madrid para identificación de niveles arenosos y determinación de su contenido en agua (Aracil, 2014). En el esquema superior registro de potencial espontáneo, resistividad y gamma natural (Heath, R., 2004).



Verticalidad y Desviación

La sonda que mide la verticalidad del sondeo proporciona, con dos inclinómetros que definen los ejes menores de la sonda (Plata et al., 1986), un registro continuo de la desviación del pozo con respecto a la vertical. Así, si el sondeo es vertical, su desviación será de 0° y los grados que mida serán aquellos que se desvíe de la vertical. Del mismo modo, con una brújula, registra de forma continua la orientación de cada profundidad del pozo con respecto al Norte geográfico.

Estos registros, fundamentalmente el de verticalidad, son muy importantes para definir la calidad constructiva del sondeo, la cual está muy relacionada con la fase inmediatamente siguiente a la perforación y testificación geofísica del sondeo, que es la entubación del mismo. Si un sondeo hidrogeológico está vertical ni la entubación ni el engravillado van suponer, en principio, ningún problema. Pero si tiene cierta desviación de la vertical pueden surgir problemas a la hora de entubar y, sobre todo, a la hora de engravillar el sondeo; ya que, en determinados puntos apoyará la tubería en la formación y, si en esos puntos de apoyo la litología es arcillosa o limosa, puede entrar material fino por los filtros al pozo. La falta de verticalidad del sondeo también genera problemas en la colocación del grupo de bombeo y de la tubería de impulsión y en el funcionamiento de aquélla, pudiendo llegar a producir roturas. Es preciso establecer límites a la desviación de la verticalidad del sondeo.

Se puede admitir como criterio de control de calidad de la verticalidad del sondeo una desviación igual a dos veces el diámetro interior de la entubación por cada 100 m de profundidad del sondeo (Herrera, et. al, 2012).

En definitiva, se trata de un registro geofísico de la calidad de la perforación que debe registrarse con el sondeo desnudo o entubado con PVC ya que la tubería de hierro impide la determinación de la orientación del mismo.

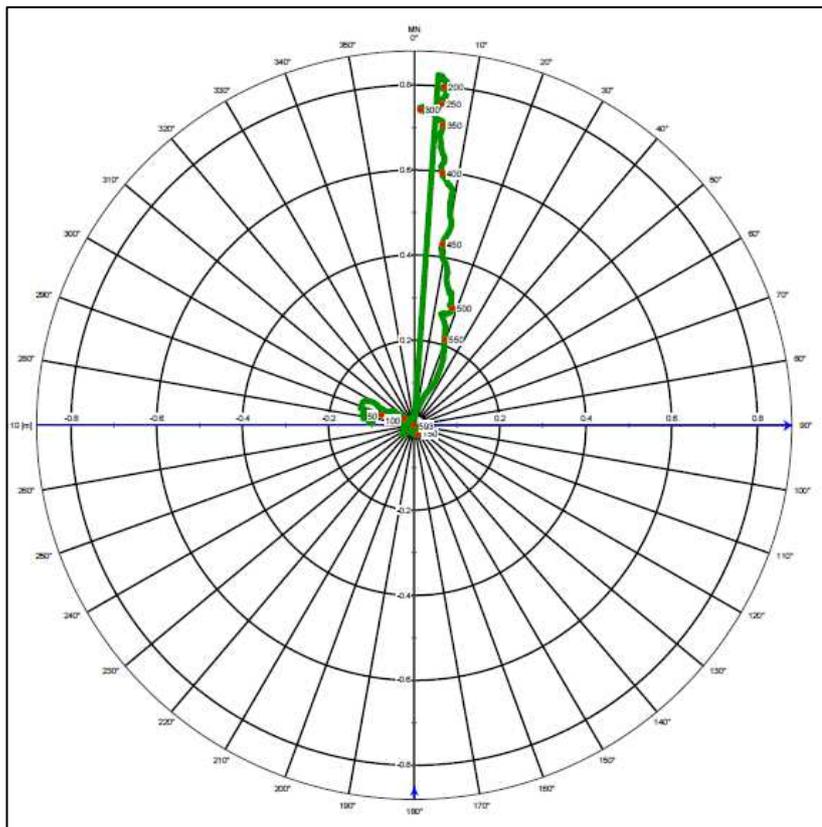


Figura nº 8. Ejemplo de un registro de verticalidad de un sondeo.

3.3. ENTUBACIÓN

Una vez terminada la fase de perforación, o incluso durante la propia perforación, es preciso proceder a la entubación del sondeo para impedir que se produzcan efectos negativos por desprendimientos y derrumbes del terreno. Existen terrenos con gran estabilidad en los cuales no es necesario realizar entubaciones durante la perforación y en los que tampoco sería preciso efectuar entubación definitiva si no se van a instalar equipos de bombeo.

Sin embargo y a diferencia de otras perforaciones, en el caso de los pozos para captación de agua subterránea se instalará una bomba y otros elementos electromecánicos para la extracción de agua, lo que dará lugar a circulación del agua del acuífero hacia el pozo. Si los pozos de agua no se entubaran, al menos en la zona comprendida desde la superficie hasta donde se instale el grupo de bombeo, la circulación de agua podría producir desprendimientos y derrumbes que afectarían al equipamiento electromecánico.

El tipo de material que habitualmente se utiliza para la entubación definitiva de un pozo de agua suele ser el acero al carbono (fotografía nº 5), el acero inoxidable y el PVC-U roscado. Basándose en los datos obtenidos en el control geológico y geofísico, se define la columna de entubación de revestimiento, que consiste en la alternancia de zonas de tubería filtrante, en las zonas correspondientes a los niveles acuíferos detectados, con zonas de tubería ciega en el resto.

En el caso de la tubería auxiliar, que es la que se utiliza durante la perforación del pozo y que se extrae una vez efectuada la entubación definitiva, el material empleado es el acero al carbono.

Entubación de emboquille

El inicio de la perforación del sondeo se hace con un diámetro superior al resto de la perforación en una profundidad de 10-30 m. Esta primera parte del sondeo se entuba con una tubería ciega, cementándose posteriormente el espacio anular entre esta tubería y la pared del sondeo. Esta entubación se denomina tubería de emboquille.

El emboquille tiene varias funciones:

- Estabiliza la zona superior del terreno, que suele estar suelta y es muy inestable, para permitir la perforación posterior del pozo, evitando que se pueda caer con el empuje de la máquina de perforación.
- Sirve de soporte, mediante los elementos de sujeción adecuados, de la tubería de revestimiento definitiva que en muchas ocasiones se coloca suspendida sin apoyar en el fondo del pozo, para evitar efectos de pandeo.
- Junto con la cementación que se hace entre la tubería de revestimiento del pozo y la pared del sondeo, sirve como sello aislante frente a contaminaciones superficiales.



Fotografía nº 5. Se puede observar un acopio de tubería metálica de acero al carbono (alternancia de tramo filtrante de puentecillo y tramo ciego), un tubería filtrante tipo Johnson y la colocación en el interior del pozo del tramo de tubería con la colocación de unos cartabones alrededor de la tubería, que sirven de centradores de la tubería en el interior del sondeo.

Entubación definitiva o de revestimiento

En general esta tubería es de acero al carbono. Para pozos de aguas minerales o cuyas aguas captadas sean destinadas a procesos de la industria alimentaria se utiliza la tubería de acero inoxidable, puesto que además de la potabilidad del agua se puede garantizar también la constancia de las características físico-químicas del agua captada. La tubería de PVC-U se emplea para entubación en ambientes agresivos como pueden ser los salinos cuando se captan aguas salobres.

El diámetro interior de la tubería de revestimiento debe de dejar un espacio libre con el grupo de bombeo que permita un flujo de agua suficiente para refrigerar el motor. Esta velocidad debe de ser inferior a 3,5 m/s y superior a la que establezca el fabricante como mínima para refrigerar el motor del grupo de bombeo, según se expone en el apartado 4.1.1. Si este flujo no se produce de forma natural, será preciso colocar una campana de aspiración que fuerce la circulación del agua desde la parte inferior del motor del grupo de bombeo. Es preciso tener en cuenta el diámetro de esta campana en el diseño del diámetro interior de la tubería de revestimiento para que quepa y deje espacio suficiente para la circulación del agua. Por tanto, hay que hacer una estimación del caudal de explotación del pozo y altura manométrica en la fase de proyecto, para definir las características del grupo de bombeo a instalar (diámetro máximo) y definir los diámetros interior y exterior de la tubería de revestimiento, el espesor del empaque de gravas (si es preciso colocarlo) y finalmente el diámetro de perforación, como se ha expuesto en el apartado 2.2.

La resistencia al aplastamiento de la tubería de revestimiento puede ser estimado a partir de la fórmula de Allievi:

$$P = \frac{2E}{K} \cdot \left(\frac{e}{d} \right)^3 \quad \text{Fórmula de Allievi}$$

Donde:

P = Presión máxima admisible frente al aplastamiento (8 Kg/cm²)

e = Espesor de la tubería, en cm

d = Diámetro interior de la tubería (cm)

K = Coeficiente de seguridad

E = Módulo de elasticidad del acero (kg/cm²)

Estas presiones son debidas a la acción del peso de los terrenos y la diferencia de contrapresión del agua durante el bombeo. Este efecto es creciente, en general, conforme aumenta la profundidad del pozo.

Para un determinado tipo de material de la tubería de revestimiento, será preciso incrementar el espesor de la tubería conforme aumente la profundidad del pozo y el diámetro de la entubación. En el cuadro nº 2 se recogen, a título orientativo, los espesores mínimos recomendables para chapa de acero, para profundidades menores de 200 m.

Diámetro interior (mm)	Espesor de pared (mm)
Hasta 350	5
De 350-500	6
Más de 500	7-8

Cuadro nº 2. Espesores mínimos recomendables para entubaciones de pozos con chapa de acero al carbono (profundidades menores de 200 m) (García, 2014).

Para profundidades superiores a las indicadas en el cuadro nº 2 se toma el espesor de chapa inmediatamente superior.

Sobre la base de los datos obtenidos en el control geológico de los detritus en la perforación y de los registros geofísicos del pozo se pueden establecer los niveles acuíferos donde deberán situarse los tramos filtrantes en la columna de entubación.

Los tipos de tubería filtrante que se utilizan habitualmente son los de filtro de puentecillo (fotografía nº 5). Otro tipo de filtros, que son menos utilizados, son los de tipo Johnson y los de persiana.

La abertura de filtro de puentecillo está relacionada con la granulometría de la grava a emplear, de tal manera que se impida la entrada de arenas al pozo, generándose la menor pérdida de carga posible. Para ello se utiliza la siguiente expresión que relaciona la granulometría de la grava del empaque y la abertura del filtro de puentecillo:

$$2 d_f \leq d_g \leq 4 d_f \quad (4)$$

Donde:

d_f = Diámetro de los filtros de la tubería.

d_g = Diámetro de la grava del empaque.

Es decir, la granulometría de la grava a emplear en el empaque debe estar comprendida entre 2 y 4 veces la abertura del filtro a utilizar en el tramo filtrante. Por ejemplo, si la grava a utilizar en el empaque está comprendida entre 3 y 6 mm, la dimensión óptima del filtro de puentecillo será de 1,5 mm.

La tubería de revestimiento debe quedar suspendida desde la boca del pozo para evitar efectos de pandeo en la columna, hormigonándose el anular entre esta tubería y la de emboquille, haciendo que esté a tracción.

La tubería definitiva también se cementa en el mismo tramo que la tubería de emboquille. En caso de presentarse tramos que pudieran tener efectos negativos sobre el agua captada se procede a su cementación en la tubería definitiva. Si existe presencia de yesos o anhidritas en las zonas a cementar será preciso el empleo de cementos resistentes del tipo “SR” (sulforesistentes).

3.4. ENGRAVILLADO

En un pozo perforado en un acuífero detrítico no consolidado, después de la entubación del mismo, se rellena de grava el espacio anular que queda entre la pared del sondeo y la cara exterior de la tubería de revestimiento. La dimensión de la grava a utilizar viene determinada por la granulometría del acuífero interceptado. En los acuíferos con porosidad secundaria no es imprescindible el engravillado, aunque también se realiza en algunas ocasiones.

Las funciones fundamentales del macizo de grava son:

- Estabilizar el terreno.
- Evitar el bombeo de arenas.
- Aumentar la permeabilidad en el entorno de las rejillas.

La grava que se utiliza para el empaque debe ser de naturaleza silíceo con clastos subredondeados, con la granulometría que se determine y coeficiente de uniformidad inferior a 2,5.



Fotografía nº 6. Acopio de grava en las inmediaciones de un pozo.

El espacio anular entre la pared del sondeo y la tubería de revestimiento debe quedar completamente relleno de grava, para evitar que durante la explotación del pozo se puedan producir asientos bruscos de la misma, que generasen el colapso de dicha tubería.

Diseño del engravillado

Para definir las características de la grava a utilizar en el empaque de gravas es necesario hacer un análisis granulométrico a partir de distintas muestras del acuífero atravesado obtenidas durante la perforación del pozo.

Una vez obtenido el análisis granulométrico existen varios procedimientos para la elección de la grava.

Un criterio ampliamente utilizado, que resulta de sencilla aplicación y con el que se obtienen buenos resultados, consiste en que una vez efectuado el análisis granulométrico de los terrenos muestreados y dibujada la curva granulométrica se separa el 10 % del material más fino (d_{10}) y el 30 % más grueso (d_{70}). Se determina de esta forma el diámetro

medio del 60 % restante, resultando que la composición del macizo de grava vendría determinado por los siguientes límites:

- Límite superior: Seis veces el diámetro medio del 60 % anteriormente definido.
- Límite inferior: Tres veces el diámetro medio del citado 60 %.

Con este criterio se consigue eliminar en el posterior desarrollo un porcentaje elevado de finos, aumentando la permeabilidad, y se retienen suficientemente los elementos de mayor granulometría.

Posteriormente los tamaños calculados se ajustarán a los disponibles comercialmente.

3.5. DESARROLLO

Una vez que el pozo está engravillado es preciso limpiarlo y desarrollarlo con el fin de obtener el mayor caudal específico posible, lo que se traduce en la práctica en obtener la mayor rentabilidad de la inversión realizada.

Inicialmente en la operación de limpieza, se consigue extraer del propio pozo todos los restos de los lodos de perforación así como de los detritus producidos durante la propia perforación. La forma más utilizada para la limpieza es la de inyección de agua limpia en el interior del pozo mediante un varillaje introducido en el mismo. A través de este varillaje se inyecta agua hasta que se observa que el agua de retorno está suficientemente limpia. Cuando se perfora con compresor la circulación de agua se realiza mediante la inyección de aire comprimido. En algunas ocasiones para la limpieza se añaden agentes dispersantes, como los polifosfatos que favorecen la extracción de las arcillas.

Las operaciones de desarrollo tienen como objetivo acondicionar el propio acuífero en un entorno del pozo para obtener la mayor productividad en cuanto a los caudales de agua bombeados, disminuyendo las pérdidas de carga y aumentando, por tanto, el rendimiento específico (caudal aportado por metro de descenso del nivel piezométrico, en $l/s \cdot m$), y la vida útil de la obra. En la práctica las operaciones de limpieza y desarrollo se realizan en muchas ocasiones de manera conjunta.

Las operaciones de desarrollo se fundamentan en la mejora de la permeabilidad en las proximidades de la captación y por lo tanto persiguen básicamente, además de la extracción de los lodos que hayan podido introducirse en la perforación, la eliminación adecuada de finos del acuífero en el caso de terrenos detríticos con porosidad primaria y en el aumento de los huecos y fisuras, en el caso de los acuíferos con porosidad secundaria.

Métodos de desarrollo

Los métodos de desarrollo se pueden clasificar en:

Mecánicos:

- Sobrebombeo.
- Bombeo con aire comprimido.
- Pistoneo.
- Sistema de pozo cerrado.

Químicos:

- Acidificación.

Métodos mecánicos

Los métodos de desarrollo mecánicos se aplican fundamentalmente en terrenos detríticos no consolidados en los que se ha colocado un empaque de grava. Para que estos desarrollos sean efectivos se debe cumplir que existan las relaciones que se han descrito anteriormente entre la granulometría del acuífero, el empaque de grava y el tamaño de filtro de puentecillo.

Lo que se persigue en todos los casos es extraer los restos de lodo que hayan podido penetrar en la formación durante la perforación pero sobre todo actuar sobre el propio acuífero en un entorno del pozo extrayendo los materiales más finos de la formación.

En todos los casos lo que se realiza es un movimiento de agua para el arrastre de finos con velocidades de circulación, y por tanto caudales, superiores a los que se utilizarán durante la explotación del pozo.

Con el fin de que durante las operaciones de desarrollo no se produzcan puentes de grava en el empaque de grava, que como en el caso del engravillado, pudieran producir asientos posteriores de la grava con peligro de colapso de la tubería de revestimiento, es preciso alternar el movimiento de circulación del agua periódicamente. En cualquier caso en los periodos de extracción los movimientos deben ser de mayor velocidad para que la componente resultante de circulación del agua para la extracción de finos sea hacia el pozo.

A continuación se describen algunos de estos procedimientos. En algunas ocasiones estas operaciones de desarrollo se realizan sobre tramos seleccionados del acuífero que se aíslan entre sí mediante el empleo de obturadores o “packers”.

- Pistoneo:

Para la realización del desarrollo mediante pistoneo se utiliza una máquina de percusión. Para realizar el desarrollo se sustituye el trépano por un cilindro formado por una serie de discos. El movimiento transmitido por el cable al pistón da lugar a un movimiento alternativo del émbolo que a su vez se traduce en un flujo de agua de sentido alternante pozo-acuífero, que permite la extracción del material más fino del acuífero.

Los finos extraídos quedan en el pozo por lo que es necesario proceder a la limpieza, una vez finalizadas las operaciones de pistoneo.

- Sistema de pozo cerrado:

Este desarrollo se efectúa con aire comprimido y su funcionamiento conceptual es similar al del pistoneo, con la ventaja de que el aire permite realizar también la limpieza final del pozo.

En este método es el propio aire inyectado con un compresor de alta presión el que realiza la función del émbolo del caso anterior. Para ello se dispone de un dispositivo semejante al indicado en la figura nº 9, con la diferencia de que en este caso los dos conductos son de entrada de aire.

Para operar se dispone de un cabezal que permite derivar la entrada de aire por el interior del varillaje o por el espacio anular varillaje-entubación. Esta modificación en la entrada del aire comprimido sobre la columna de agua del pozo es lo que permite provocar los movimientos alternativos a la manera de un pistón. También se presenta en el cabezal un tercer conducto que permite la descarga del aire comprimido, como paso previo al cambio en la entrada del aire.

En la práctica las operaciones de desarrollo con aire comprimido se realizan conjuntamente con las de limpieza, con la utilización de polifosfatos. Es habitual para pozos profundos un programa de desarrollo compuesto por varias etapas similares a las siguientes:

- Disolución de 500 Kg de hexametáfosfato con el empleo de una cuba de 10.000 litros (proporción 5 kilos de hexametáfosfato/100 litros de agua).
- Recirculación en el propio sondeo, durante 4 horas con el empleo de aire comprimido.
- Estado de reposo durante 12 horas.
- Aporte de presiones durante unas 5 horas por el método de pozo cerrado, con el empleo de cabezal especial.
- Operación de limpieza con aire comprimido, hasta el aclarado del agua extraída.

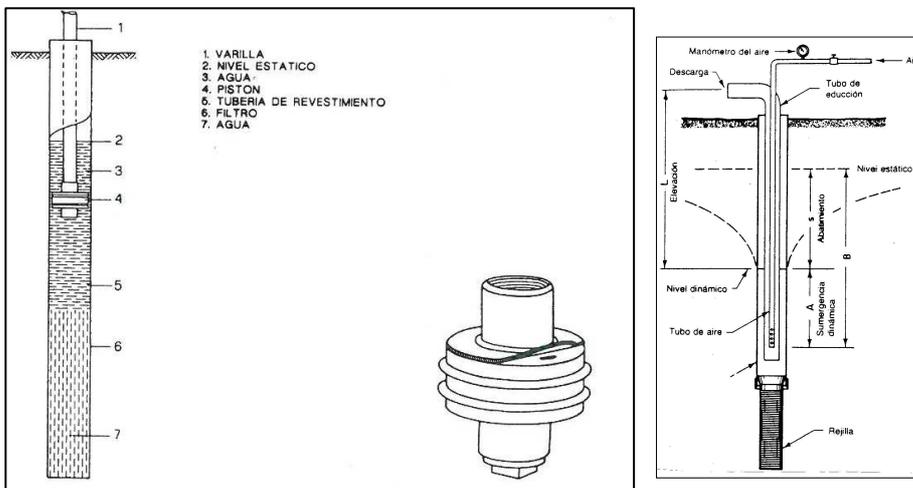


Figura nº 9. Esquemas de los métodos de desarrollo con pistón aire (izquierda) y con aire (derecha).

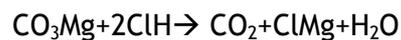
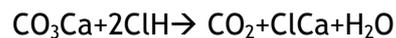
Métodos químicos

El método químico de desarrollo de pozos que más se emplea es la acidificación de acuíferos calcáreos.

El proceso consiste en mejorar la permeabilidad de un acuífero kárstico carbonatado (calizas y dolomías), por disolución de la roca en contacto con el ácido.

El ácido más utilizado es el clorhídrico, por su gran poder de ataque y su relativa facilidad de manejo.

Las reacciones que tienen lugar en un acuífero carbonatado son las siguientes:



La acidificación suele realizarse con el pozo cerrado, pues así se consigue una mayor penetración del ácido en el acuífero, ya que al no poder escapar el anhídrido carbónico la reacción se retarda y permite una mayor penetración del ácido.

Posteriormente a la inyección del ácido se inyecta agua y una vez finalizada la reacción se procede a un bombeo a modo de limpieza.

Junto con el ácido clorhídrico se inyectan una serie de aditivos como son inhibidores de la corrosión, agentes quelantes para evitar la precipitación de hidróxidos, agentes tensoactivos y retardadores de la reacción.

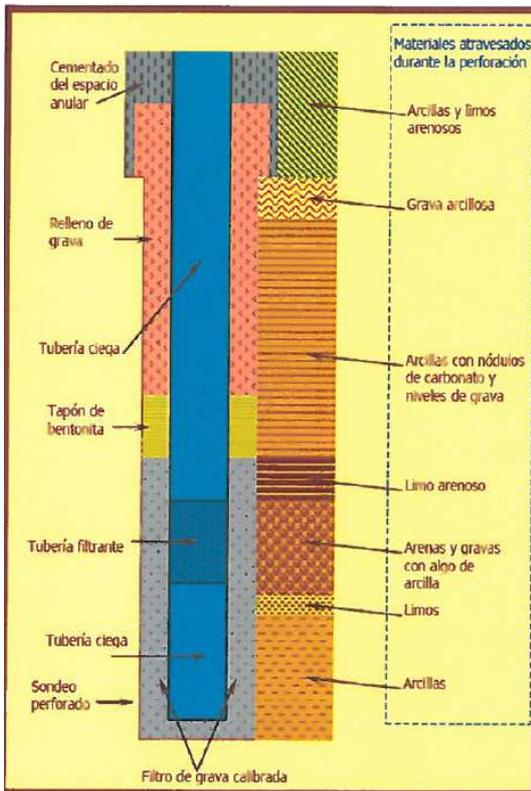


Figura nº 10. Esquema tipo del diseño de un pozo: emboquille, tubería de revestimiento (tramos ciegos y tramos filtrantes), empaque de grava (Herrera et al., 2012).

3.6. AFORO

Una vez finalizada la obra de captación es imprescindible realizar un ensayo de producción o aforo del pozo, para proceder a su evaluación cuantitativa y cualitativa.

El aforo de un pozo es una operación cara y es necesario obtener la mayor información posible de la prueba por lo que, además de programarla adecuadamente, conviene verificar la disponibilidad de piezómetros de control para registro de la evolución de niveles de agua, pues en un piezómetro se pueden obtener datos de gran interés para conocer el funcionamiento hidrodinámico de un acuífero.

El interés en la realización de estos ensayos viene determinado por la consecución de los siguientes objetivos:

- Realizar una limpieza final del pozo, e incluso un desarrollo del mismo.

- Conocer la curva de respuesta del acuífero y el caudal óptimo de explotación para poder diseñar los equipos electromecánicos definitivos de extracción de agua del pozo.
- Evaluar los parámetros hidrodinámicos del acuífero como la transmisividad, coeficiente de almacenamiento (si se dispone de piezómetros de control, etc.).
- Obtener muestras de agua del acuífero para poder determinar la calidad de las mismas.

Equipos a utilizar

- **Equipo de bombeo:**

Los equipos que más se utilizan son las electrobombas sumergibles, que a su vez son los que normalmente se emplean para el equipamiento definitivo del pozo (fotografía nº 7).

- **Tubería de impulsión:**

Normalmente está constituida una por tubería metálica embridada que se une a la tubería de descarga, en general de mayor diámetro, mediante un acoplamiento formado por un codo de 90° y el correspondiente carrete.



Fotografía nº 7. Montaje del grupo electrobomba sumergible en el pozo.

- **Instalación eléctrica:**

Para el suministro de energía a la electrobomba se utiliza un grupo electrógeno montado sobre camión. Para el control de la electrobomba se emplea un regulador de frecuencia y tensión actuando directamente sobre las revoluciones del motor de combustión interna que acciona el grupo.

- **Control de los caudales de bombeo:**

Normalmente se realiza mediante un aforador con diafragmas y tubo pitot (fotografía nº 8); en algunos casos se utiliza un contador volumétrico o caudalímetro.

Para el ajuste del caudal se utiliza tanto el control de revoluciones del motor que acciona el grupo electrógeno como la válvula de compuerta situada en la cabeza de la impulsión. En algunos casos también se utilizan variadores de frecuencia, que permiten regular el caudal de bombeo, mediante la variación de la velocidad del grupo de bombeo.

- **Control de niveles piezométricos:**

Durante el aforo para el control de niveles piezométricos, tanto en el pozo de bombeo como en los piezómetros de que se disponga, se utiliza un hidronivel con indicador luminoso.



Fotografía nº 8. Aforador y tubo pitot para medición de caudales.

Desarrollo de la prueba

Antes de comenzar la prueba debe garantizarse la evacuación del agua hasta un cauce superficial para evitar causar encharcamientos que pudieran producir daños en las fincas colindantes a la ubicación del pozo. Para ello hay que realizar una canalización desde el pozo hasta el cauce superficial más cercano, bien por excavación de un pequeño canal o bien mediante una conducción al efecto.

En algunas ocasiones, dada la proximidad a un cauce superficial, el vertido de agua se realiza directamente sobre dicho cauce.

En caso de acuíferos libres para evitar la infiltración de agua al sistema es necesario disponer en el punto de salida del aforo de un sistema de revestimiento de la canalización hasta el cauce superficial más cercano.

En la primera fase de la prueba se realiza un aforo escalonado, con aumento de caudal hasta la estabilización de los niveles para poder establecer la curva de respuesta del acuífero. Durante este periodo es preciso incrementar los caudales de manera suave y controlada, evitando descensos bruscos que pudieran dar lugar a la formación de puentes y golpes de grava que pudieran colapsar la tubería de revestimiento.

En los primeros estadios del ensayo escalonado se produce una limpieza del pozo.

La fase de aforo escalonado se prolonga hasta llegar al caudal crítico, o antes del mismo si ya se dispone de escalones suficientes y se ha rebasado ampliamente el caudal de explotación proyectado.

La segunda fase del bombeo corresponde al aforo a caudal constante de duración mínima de 72 horas, cuya interpretación permitirá conocer los valores de los parámetros hidrodinámicos del acuífero. A la finalización de esta fase se recoge la muestra de agua que se considera más representativa de la calidad y características hidroquímicas del acuífero.

Con los datos de nivel y caudal de la parte de bombeo escalonado se puede llegar a determinar la ecuación del pozo y la curva característica. Con los datos del bombeo a

caudal constante se determinarán el caudal y el nivel dinámico de explotación con los que se hará la elección del grupo de bombeo a instalar, como se expone en el apartado 4.1.

Uno de los objetivos más importantes del aforo es obtener muestras de agua para conocer su calidad. Durante el bombeo también se realizan muestreos para realizar mediciones “in situ”. Además de estos valores obtenidos durante el bombeo también se dispone de los registros hidroquímicos del pozo efectuados durante la testificación geofísica (generalmente conductividad y temperatura). La integración de los distintos datos obtenidos permite conocer la potabilidad del agua, su aptitud para usos distintos a los de consumo humano, sus facies o características hidroquímicas e incluso establecer hipótesis en cuanto al funcionamiento del acuífero en el entorno del pozo (variación de conductividad con la profundidad, anomalías de gradientes de temperatura, etc.).

Habitualmente se controlan “in situ” la conductividad, pH y temperatura y en algunos casos también el Eh.

4. EQUIPAMIENTO

Con la información obtenida de la fase de perforación y aforo del sondeo se realiza el diseño del equipamiento del pozo. El proyecto de equipamiento electromecánico del pozo debe definir las siguientes instalaciones:

- Instalaciones hidráulicas: grupo de bombeo, tubería de impulsión, tuberías auxiliares y piezas especiales, válvulas, caudalímetro, ...
- Instalaciones eléctricas: transformadores, cables de alimentación, variadores de frecuencia, condensadores, ...
- Instalaciones de control y protección: cuadro de control, analizador de redes, autómatas programables, ...
- Obra civil y urbanización de la parcela en la que se ubica el pozo: centros de transformación y de baja tensión, arqueta del pozo y cerramiento de la parcela del pozo.

Las instalaciones del pozo se distribuyen en tres elementos principales, que hay que diseñar y construir:

1.- **Centro de transformación:** alberga el transformador de potencia, cuya función es dar alimentación eléctrica a la instalación completa. También contiene las correspondientes celdas de seccionamiento, protección y medida; en algunos casos, incorpora otros transformadores (elevador y/o auxiliar) si la instalación lo requiere.

2.- **Centro de baja tensión:** en el que se encuentran los cuadros de protección y control de la instalación (batería de condensadores, analizador de redes, autómatas programables, etc.) y el variador de frecuencia, si es preciso instalarlo.

3.- **Arqueta de bombeo:** en ella se encuentra el pozo y un tramo de la tubería de impulsión en el que se instalan los elementos hidráulicos y de control: ventosa, válvulas de corte, caudalímetro.

4.1. INSTALACIONES HIDRÁULICAS

El elemento más importante de las instalaciones hidráulicas es el grupo de bombeo, que extrae el agua del interior del pozo hasta el punto de entrega. Hay varios tipos de bombas: de eje horizontal, de eje vertical y grupo electrobomba sumergible; estas últimas son las más empleadas en el equipamiento de pozos de captación de agua subterránea, ya que permiten extraer agua desde elevadas profundidades.

4.1.1. GRUPO ELECTROBOMBA

Grupo electrobomba sumergible: es un conjunto compuesto por un cuerpo de bomba centrífuga vertical de una o varias etapas, accionada por un motor eléctrico construido especialmente para funcionar totalmente sumergido en agua.

En la figura nº 11 se presenta un esquema del grupo electrobomba: bomba y motor con sus respectivos componentes.

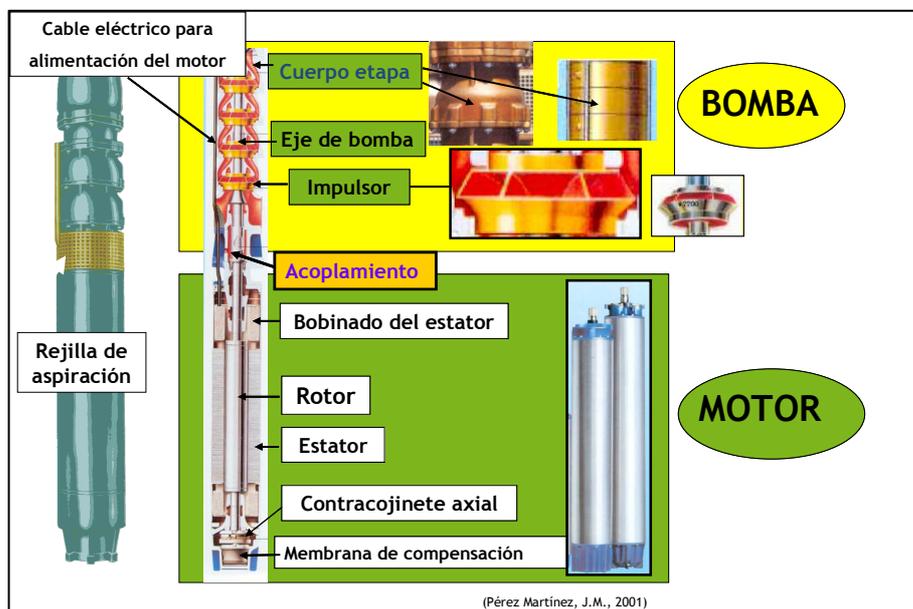


Figura nº 11. Principales elementos de un grupo electrobomba sumergible (Pérez Martínez, 2001).

Dimensionamiento del grupo de bombeo

Los datos básicos a tener en cuenta para dimensionar el grupo de bombeo son:

- Del aforo: Caudal máximo y niveles estático y dinámico, calidad del agua.
- Del pozo: diámetro útil de la entubación del revestimiento, posición de cada uno de los filtros, profundidad.
- Otros: cota del punto de entrega del agua y presión en el mismo, pérdidas de carga en la conducción.

Los aspectos a considerar en la selección del equipo de bombeo son:

- **Ubicación:** se debe situar dentro de un tramo de tubería de revestimiento ciega, para evitar que la posible entrada de arena desde un filtro desgaste los impulsores. La zona en la que se coloca, denominada cámara de bombeo, debe de tener algún filtro por debajo de ella que aporte agua, para garantizar que haya un flujo de agua ascendente circulando a lo largo del motor de la bomba para refrigerarlo. Si estos filtros inferiores no aportasen agua, habría que revestir el grupo de bombeo con una camisa de aspiración que fuerce a que el agua, que viene de los tramos filtrantes situados por encima del grupo de bombeo, entre por la parte inferior de la campana y refrigere el motor. En este caso, hay que tener en cuenta que quede suficiente espacio anular entre la campana y la tubería de revestimiento para que pueda circular el caudal de agua adecuadamente.

La profundidad a la que se sitúa debe ser tal que su sumergencia (profundidad por debajo del nivel dinámico) sea la adecuada para evitar el fenómeno de cavitación (vaporización del fluido elevado a temperatura muy inferior a su punto de ebullición). Para ello hay que tener en cuenta el N.P.S.H. (altura neta disponible en la aspiración) del grupo de bombeo. También hay que dejar altura suficiente desde el final del grupo de bombeo hasta el final del pozo para evitar que los depósitos de arena y limos que se pudieran producir alcancen al grupo de bombeo.

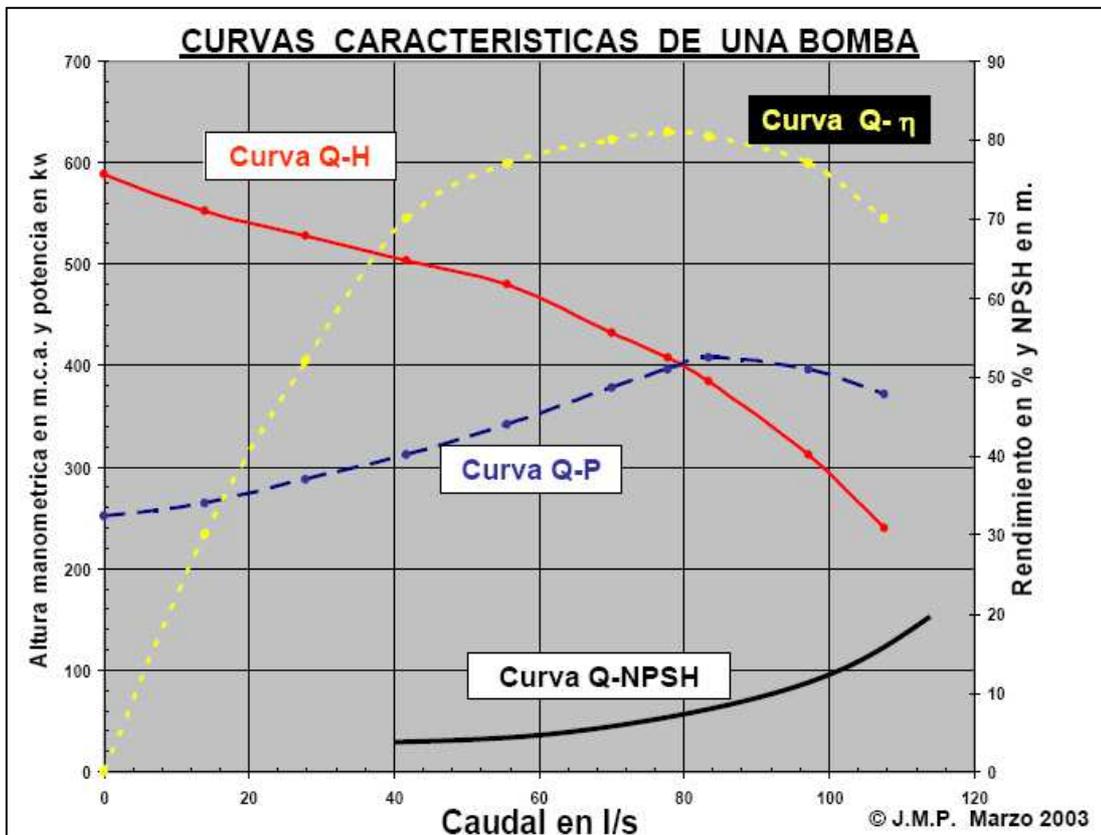


Figura nº 12. Ejemplo de curvas características de un grupo de bombeo: altura manométrica, rendimiento, potencia absorbida y N.P.S.H. (Pérez Martínez, 2003).

- **Caudal de explotación.** La Hidráulica de Captaciones permite calcular el descenso total del nivel piezométrico creado por todos los pozos existentes dentro del radio de influencia de un pozo; así como el descenso real que se crea en el pozo para un determinado caudal de bombeo (sumatorio del descenso necesario para que se mueva el agua dentro del acuífero en función de sus características y de las pérdidas de carga causadas por la entrada del agua al pozo en función de lo mejor o pero construido que esté), que se puede calcular por medio de la ecuación del pozo. Sin embargo, no siempre se tiene conocimiento de todos los datos necesarios para hacer estos cálculos, (principalmente pozos existentes en su área de influencia y los caudales de explotación de los mismos), por lo que para calcular el caudal de

explotación se parte del caudal máximo de aforo, aplicándole un coeficiente corrector.

Aunque este coeficiente se elegirá en función de la experiencia en el acuífero o tipo de acuífero en que se ha hecho el pozo, el caudal de explotación podría acotarse entre el 65 % y el 85 % del caudal máximo de aforo, con el fin de tener en cuenta las afecciones creadas por otros pozos, envejecimiento de la tubería de revestimiento del pozo, descensos por bombeos prolongados, etc.

El caudal de explotación determinando será el que se use para diseñar el grupo de bombeo a instalar en un pozo.

- **Altura de elevación:** es la suma del nivel dinámico del bombeo, de las pérdidas de carga en el sistema y de la diferencia de cota con el punto de entrega. Al igual que se hace con el caudal de explotación, para calcular el nivel dinámico de explotación también se debe de aplicar un coeficiente corrector que aumente el nivel dinámico máximo de aforo (que tenga en cuenta el incremento del descenso causado por las afecciones creadas por los pozos que puedan extraer agua en el entorno, de los que no se conozca su presencia); siendo recomendable incrementarlo un 20 % (aunque también se debe de definir en función de la experiencia en el acuífero en el que esté el pozo).

$$H_m = H_g + H_{\text{pérdidas carga}} + H_{\text{vertido}}$$

H_g = altura desde el nivel dinámico hasta la cabeza del pozo

Con los valores determinados del caudal de explotación y de la altura manométrica, se consultarán los catálogos de los fabricantes, en los que a partir de la curva característica (figura nº 12) de los grupos de bombeo, se elegirá aquella que aporte el máximo rendimiento para esos valores de caudal y la altura manométrica definidos para el pozo a equipar.

Es preciso considerar el diámetro máximo del grupo de bombeo elegido, comprobando que hay espacio anular suficiente entre este grupo y la tubería de revestimiento para que haya una correcta refrigeración del equipo. La velocidad de circulación del agua en torno al motor debe ser inferior a 3,5 m/s (para evitar flujo turbulento). La velocidad mínima para

refrigerar el motor es preciso consultarla con el fabricante del grupo de bombeo teniendo en cuenta la temperatura del agua a bombear.

4.1.2. TUBERÍA DE IMPULSIÓN

La tubería de impulsión comienza a la salida del grupo de bombeo y llega hasta la boca del pozo, finalizando en el punto de entrega del agua. En la fotografía nº 9 se puede ver el grupo de bombeo y los cables de alimentación eléctrica del mismo, así como el primer tramo de la tubería de impulsión durante su montaje en el pozo.

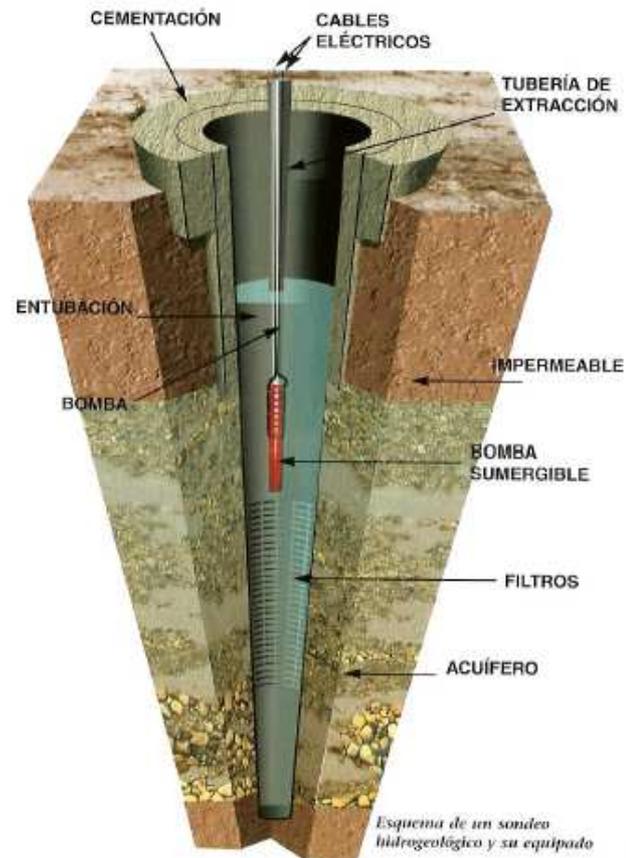
Esta tubería debe soportar una presión nominal suficiente para aguantar las posibles puntas de presión previstas en la instalación, al igual que las juntas intercaladas entre las bridas. Las bridas de unión serán macho-hembra para embutir la junta entre ambas y los tramos de tubería se ensamblan con tornillería cincada. Estas bridas llevan muescas por las que pasan los cables de alimentación del grupo de bombeo y la tubería piezométrica.

La tubería de impulsión debe de tener un diámetro suficiente para quepa dentro de la tubería de revestimiento del pozo, teniendo en cuenta el diámetro máximo de la brida, incluyendo el cable de alimentación del grupo electrobomba y las tuberías piezométricas (que se colocan alrededor de ella en las muescas que tienen las bridas de unión de los distintos tubos), y, a su vez, debe reducir al máximo las pérdidas de carga. La velocidad del agua en esta tubería debe de ser inferior a 3,5 m/s para que el flujo sea laminar.

4.1.3. TUBERÍAS AUXILIARES, PIEZAS ESPECIALES, VÁLVULAS

Es preciso instalar otro conjunto de elementos en el equipamiento hidráulico del pozo (figura nº 13):

- El control del nivel piezométrico del pozo se realiza a través de dos tuberías de dos pulgadas de diámetro que se colocan junto a la tubería de impulsión, alojadas en sendas muescas de las bridas de unión, llegando hasta la posición del grupo de bombeo. En una de ellas se coloca la sonda de nivel para el control automático en continuo del nivel piezométrico y la otra es para medir la profundidad de este nivel con una sonda manual para hacer la calibración del sensor.



Fotografía n° 9. Montaje de un grupo de bombeo y de la tubería de impulsión en un pozo de captación de agua subterránea (a la izquierda). Esquema de cómo queda el grupo de bombeo dentro del pozo (a la derecha)

- Válvulas de distintos tipos que permiten:
 - verter el agua extraída al campo, si es preciso.
 - Ventosas bifuncionales para que salga el aire de la tubería de impulsión en el llenado de la misma al poner en marcha el grupo de bombeo, o para que entre aire en la misma durante la parada del grupo de bombeo y evitar que se puedan producir depresiones que causen la rotura de la tubería.
 - Válvula de retención. Puede colocarse tanto por encima del grupo de bombeo para impedir la descarga brusca de la tubería de impulsión tras la parada del grupo de bombeo, evitando daños en éste; como en la tubería de conducción al

punto de entrega en superficie para evitar los flujos en sentido inverso tras la parada de la conducción hasta el punto de entrega del agua.

- Grifo tomamuestras para realizar el control de la calidad del agua extraída.

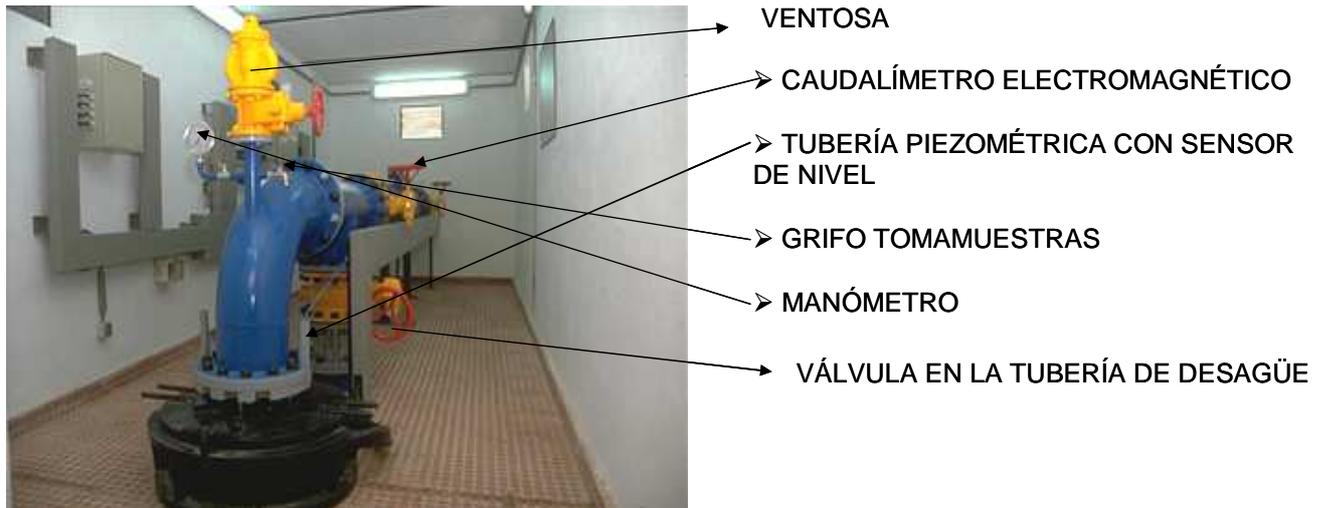


Figura nº 13. Situación de tubería piezométrica, válvulas y caudalímetro en la arqueta del pozo.

Todos estos elementos van dentro de la arqueta en la que está el pozo de bombeo.

4.1.4. DESAGÜE

El pozo debe ir provisto de una conducción que permita verter el agua a un cauce público en el caso que se preciso hacer un bombeo de limpieza del agua extraída por no reunir el agua las características adecuadas para el uso previsto. La tubería de desagüe se deriva de la tubería de impulsión, generalmente dentro de la arqueta en la que está la boca del pozo y se finaliza en una arqueta de desagüe antes de salir a cauce público.

4.2. INSTALACIONES ELÉCTRICAS

La instalación eléctrica está compuesta por los siguientes elementos:

4.2.1. TRANSFORMADOR DE POTENCIA

Si la compañía suministradora da la energía en alta tensión será preciso colocar un transformador de potencia, que reduzca a la tensión de funcionamiento del grupo de bombeo. Las tensiones de funcionamiento más habituales, cuando las potencias instaladas son altas, son en baja tensión 400 V, 500 V, 690 V o 1.000 V. También se puede alimentar el grupo de bombeo en alta tensión, si ha sido preciso reducir la sección del cable de alimentación. Hay grupos de bombeo que funcionan a 3.300 V.

El transformador debe dimensionarse adecuadamente para que sea capaz de alimentar toda la instalación sin que se den calentamientos en éste, cortes inesperados y averías.

Para el dimensionamiento del transformador hay que calcular su potencia aparente (S), que es:

$$S = \frac{P_{\text{abs. mot.}}}{\cos \Phi}$$

S = Potencia aparente (KVA)

P_{abs. mot.} = potencia absorbida por el motor del grupo bombeo (KW)

cos Φ = factor de potencia de la instalación

La potencia absorbida por la bomba es igual a:

$$P_{\text{abs. g. bom}} = \frac{9,81 \cdot Q \cdot H_m \cdot \rho}{1.000 \cdot \eta_b}; \quad P_{\text{abs. mot}} = \frac{P_{\text{abs. g. bom}}}{\eta_m}$$

Q = Caudal de bombeo (l/s)

H_m = Altura manométrica (m)

η_b = rendimiento de la bomba grupo de bombeo

P_{abs. g. bom.} = Potencia absorbida por el motor del grupo de bombeo (KW)

ρ = densidad del fluido a elevar

Los valores de rendimiento de la bomba y del motor y del factor de potencia del grupo de bombeo elegido se toman de su curva característica y de la ficha técnica. Se pueden despreciar el resto de consumos de la instalación, ya que son insignificantes en comparación con los consumos del grupo electrobomba.

4.2.2. CABLES DE ALIMENTACIÓN

El cable es un conductor que transporta la energía eléctrica desde el secundario del transformador, a la tensión adecuada, hasta el grupo electrobomba. Estos cables suelen ser de cobre apantallado con aislamiento de etileno-propileno (EPR) o etileno-propileno de alta densidad (HEPR).

Dado que los empalmes de los cables permanecerán sumergidos en el agua, estos han de ser especiales. Se realizarán con terminales prensados y soldados en los dos extremos, independizando las capas interiores consecutivamente de las exteriores con cinta vulcanizada; se termina con manguitos termorretráctiles y recubriendo en su totalidad el empalme realizado.

- Cable que conecta el transformador con el cuadro de protección y control. Se calcula la intensidad máxima que circulará y la caída de tensión (1,5 % máximo admitida en reglamentación española).

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V} \quad \Delta V = \frac{\sqrt{3} \cdot \rho \cdot L \cdot I \cdot \cos\Phi}{S}$$

ΔV = caída de tensión
 S = Sección del cable (mm²)
 I = intensidad máxima suministrada por el transformador (A)
 ρ = resistividad del conductor (Ω/mm²/m)
 L = longitud del cable (m)

- Cable de alimentación al motor del grupo de bombeo. Se calcula la intensidad absorbida por el motor y la caída de tensión.

$$I_{\text{abs. mot.}} = \frac{P_{\text{abs. mot.}}}{\sqrt{3} \cdot V \cdot \eta_m \cdot \cos\Phi}$$

$P_{\text{abs. mot.}}$ = Potencia absorbida por el motor
 η_m = rendimiento del motor
 $I_{\text{abs. mot.}}$ = Intensidad absorbida por el motor

La caída de tensión se calcula con la siguiente expresión:

$$\Delta V = \sqrt{3} \cdot I \cdot (R \cdot L \cdot \cos\Phi + X \cdot L \cdot \sin\Phi)$$

R = Resistencia ohmica (Ω/km)
 L = longitud del cable (m)
 X = Reactancia (Ω/km)

La caída de tensión se calcula para el momento del arranque, ya que es cuando se produce el mayor pico de tensión consumida. La intensidad de arranque es 5 veces la intensidad nominal del motor.

4.3. CUADROS DE MANIOBRA Y PROTECCIÓN

Constituyen un conjunto de elementos que permiten:

1.- **Maniobrar la instalación:** son los elementos que permiten controlar el proceso de explotación del pozo, facilitando y automatizando los arranques y paradas del grupo de bombeo. Estas funciones las puede realizar un Autómata Programable (PLC: Programable Logic Controller), cuya misión es centralizar todas las señales del proceso con el objeto de unificarlas y enviarlas para poder controlar su explotación en remoto; al mismo tiempo que también protege la instalación complementariamente a la aparatada eléctrica destinada a tal fin.

El modo de arranque del motor del grupo de bombeo más habitual se hace conectando el motor directamente a la red. En este caso se produce una demanda de corriente de la red de entre 5 y 8 veces el consumo normal de corriente del motor. Este tipo arranque, aunque proporciona un elevado par de arranque y un arranque rápido y de bajo coste, puede provocar caídas de tensión en la instalación, que pueden dar lugar a un mal funcionamiento del resto de equipos eléctricos de la instalación, junto con variaciones bruscas de la velocidad de arranque.

En este caso el grupo de bombeo funciona siempre a velocidad nominal, teniendo un punto de máximo rendimiento (figura nº 12), moviéndose el caudal aportado a lo largo de la curva Q-H de la curva característica y, por tanto, reduciéndose el rendimiento al alejarse de las condiciones de máximo rendimiento. Este aspecto es muy importante en los casos en que hay una gran variación de profundidad del nivel piezométrico en el pozo entre distintos momentos del período de explotación, caso de bombeos prolongados entre la situación al inicio y al final del período de bombeo, como se puede observar en la figura nº 14. La figura representa la curva Q-N dinámico de sendos aforos realizados en el mismo pozo en dos momentos distintos: al final de un período de bombeo prolongado y tras varios meses de permanecer todos los pozos parados. Para el mismo caudal de funcionamiento el nivel dinámico está entre 80 y 90 m más profundo en el aforo realizado

al final del período de bombeo prolongado. En estos casos, ¿para qué situación de caudal - nivel dinámico se elige el grupo de bombeo? Si se elige para las condiciones de final del periodo de bombeo, en los primeros momentos habrá que introducir muchas pérdidas de carga, estrangulando la válvula que se coloca a la salida del pozo, para simular mayor altura de elevación y, por tanto, el rendimiento de la instalación será muy bajo en esos momentos; se perderá mucha energía.

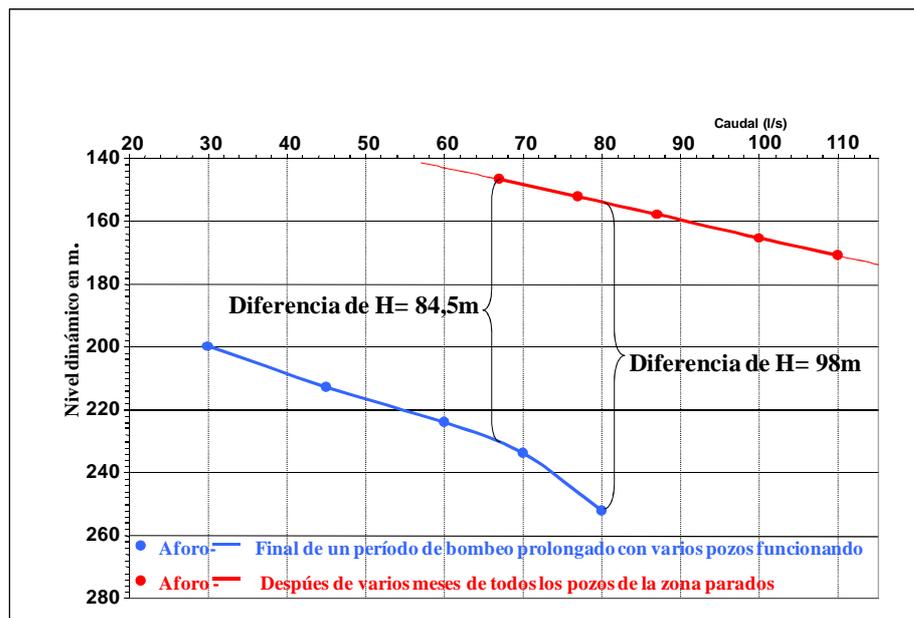


Figura nº 14. Curvas caudal-nivel dinámico final en un pozo al final de un período de bombeo prolongado (en azul) y tras varios meses de permanecer todos los pozos parados.

En ocasiones se puede evitar este problema instalando Variadores de Frecuencia, que permiten variar la velocidad de giro del rotor del motor del grupo de bombeo, manteniendo su funcionamiento siempre dentro de su rango de máximo rendimiento.

La velocidad de giro del motor de inducción viene dada por la expresión:

$$N = \frac{120 \times f \times (1 - s)}{p}$$

N = velocidad de giro del motor
p = nº de polos del motor
f = frecuencia (Hz)
s = deslizamiento.

Puesto que la velocidad de giro depende directamente de la frecuencia de la tensión de alimentación del motor, variando esta frecuencia se consigue variar la velocidad de giro, manteniéndolo siempre dentro la zona de máximo rendimiento para distintos caudales y altura de elevación, figura nº 15. Este sistema también permite arranques y paradas del grupo de bombeo graduales.

Combinando el Autómata Programable con el Variador de Frecuencia se puede realizar la explotación del pozo de varias maneras, entre las que se destacan:

- Caudal constante. La consigna que va a controlar el proceso de extracción de agua del pozo es el caudal de explotación.

El variador de frecuencia realiza un arranque progresivo hasta llegar al caudal de consigna, manteniéndolo constante durante todo el funcionamiento, independientemente del nivel dinámico que haya; pero siempre dentro del rango de máximo rendimiento hidráulico del grupo de bombeo.

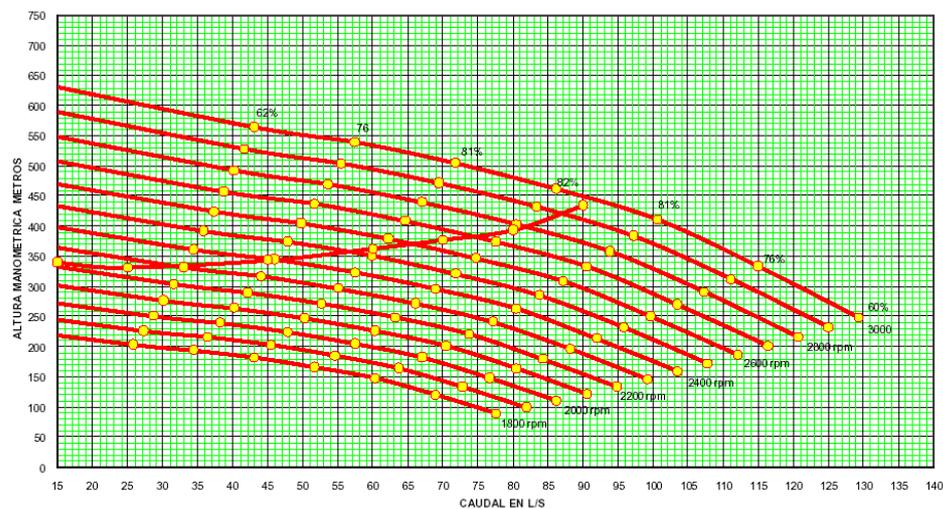


Figura nº 15. Curvas Q-H de un grupo de bombeo a distintas velocidad de giro del motor, con indicación de evolución del rendimiento.

- Nivel constante. El funcionamiento se hace fijando un valor de la altura geométrica a la que hay que elevar el agua (profundidad del nivel dinámico). Caso de no rebajar el nivel dinámico por debajo de un determinado nivel litológico para no

empeorar la calidad del agua extraída. El variador de frecuencia ajusta el caudal de extracción manteniendo constante la altura de elevación.

- Rendimiento máximo. Se introducen en el autómata los puntos de caudal y altura que proporcionan el máximo rendimiento del equipo a distintas velocidades de giro. El variador de frecuencia va ajustando el funcionamiento a cada uno de los puntos en función de la evolución del nivel piezométrico.

2.- Proteger la instalación: son elementos de protección eléctrica del motor y conductores y de las personas. Entre los equipos a instalar para hacer esta protección se puede señalar:

- Analizador digital de redes: potencia activa trifásica, intensidad y tensión de cada una de las fases, factor de potencia. (Los analizadores de redes se encargan de mostrar los valores de las variables eléctricas más importantes. Las principales utilidades de un analizador son: facilitar la detección posibles fallos eléctricos, malos dimensionamientos o funcionamientos indeseados y, sobre todo, analizar la explotación de la instalación para optimizar el proceso).
- Amperímetro analógico.
- Relé de protección integral para: sobrecarga, subcarga, rotor bloqueado, inversión y falta de fases, defecto a tierra.
- Protección diferencial.

En este cuadro también se instala una batería de condensadores para corregir la energía reactiva que se genera en el sistema y por tanto, mejorar el factor de potencia de la instalación, evitando penalizaciones en coste de la energía eléctrica que introduce la compañía suministradora cuando se genera energía reactiva.

4.4. EQUIPOS DE MEDIDA

El control del funcionamiento del pozo y de los equipos instalados requiere la instalación de equipos de medida, entre los que se señalan:

- Sonda de nivel: mide la profundidad del agua en el pozo (nivel piezométrico) de manera continua. Este parámetro es una de las dos variables de referencia que se usan en la programación del control automático de funcionamiento de la instalación en los casos en los que se dispone de un autómata programable para controlar el proceso de explotación del pozo, según se ha expuesto en el apartado 4.3.
- Caudalímetro: mide el caudal que se extrae y que está circulando por la tubería de impulsión. Hay que incorporar un tramo tranquilizador con aletas por delante del caudalímetro, para que la medida sea más precisa. El caudal es la otra variable de referencia en la programación del control automático de funcionamiento de la instalación (figura nº 16).



Figura nº 16. Caudalímetro electromagnético que se instala en la tubería de impulsión para controlar el caudal extraído.

- Manómetro y transductor de presión: permite controlar la presión de la tubería, ya sea analógicamente (manómetro) o digitalmente (transductor de presión), figura nº 17.



Figura nº 17. Manómetro y transductor de presión para medir la presión en la tubería de impulsión.

- Sonda PT-100: se incorpora dentro del motor del grupo electrobomba y sirve para controlar la temperatura del motor durante su funcionamiento, permitiendo su parada automáticamente, si supera la temperatura de consigna. Cuando el motor está parado, da información de la temperatura del agua del acuífero a la profundidad de instalación del grupo electrobomba.

4.5. OBRA CIVIL: ARQUETA, DESAGÜE, CERRAMIENTO

Completan el equipamiento del pozo el diseño de los elementos de la parcela en la que se encuentra el pozo:

- Centro de Alta tensión
- Centro de Baja tensión
- Arqueta del Pozo
- Cerramiento de la parcela

Los centros de alta y baja tensión suelen ser casetas prefabricadas de hormigón, ya preparadas para el alojamiento de los centros de transformación y cabinas de protección, así como del cuadro de control y del variador de frecuencia, respectivamente.

La boca del pozo y el final de la tubería de impulsión con la derivación de la tubería de desagüe y el caudalímetro deben ir dentro de una arqueta de tamaño suficiente para el alojamiento de todos estos elementos, como se muestra en la figura nº 13. El techo de esta arqueta se suele hacer con cobijas, que permiten su retirada fácilmente con una grúa, en el caso en el que haya que extraer la tubería de impulsión y el grupo de bombeo.

Estos tres elementos deben de quedar dentro de una parcela vallada y cerrada, a cuyo interior no tiene acceso nadie más que el personal de explotación y mantenimiento de la misma. Todo ello con el fin de proteger al máximo la calidad del agua y evitando posibles accidentes que contaminen el acuífero (fotografía nº 10).



Figura nº 10. Parcela de pozo con los elementos básicos: centros de alta tensión y de control, arqueta del pozo y cerramiento de la parcela.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aracil, E. (1998). Inspección, control de calidad, envejecimiento y regeneración de pozos. Libro de Comunicaciones de las Jornadas Técnicas de Agua Subterránea y Abastecimiento Urbano. CYII. Madrid
- García, T. (2014). Apuntes de Perforación del Máster en Hidrología y Gestión de Recursos Hídricos (versión presencial).
- Heath, Ralph C. (2014). Basic ground-water hydrology (U.S. Geological Survey Water-supply).
- Herrera, J. y Castilla, J. (2012). Utilización de técnicas de sondeos en captaciones de agua. E.T.S. Ingenieros de Minas de Madrid (U.P. de Madrid).
- López, C, López, E, Ramírez, A, Toledo, J. M. (2000). Manual de Sondeos. Tecnología de perforación. Editor Carlos López Jimeno (U.D. Proyecto. E.T. S. I. Minas Madrid - U.P. Madrid)

- Pérez Martínez, J. M^a (2014). Apuntes de Equipamiento de pozos del Máster en Hidrología y Gestión de Recursos Hídricos (versión presencial).
- Plata, J.L.; Alonso, T.; Alberdi, R.; Aracil, E. (1996). Testificación geofísica de sondeos mecánicos: divulgación y desarrollo metodológico de esta técnica. INSTITUTO TECNOLÓGICO GEOMINERO DE ESPAÑA. Gráficas Baraza, s.l. Oviedo
- Rider, M.H. (1986): The geological interpretation of well logs. Blackie & Son Ltd. Londres. 175 pp.
- Manual de Grundfos para el diseño de equipos de bombeo sumergibles (<http://passthrough.fw-notify.net/download/300984/http://www.grundfos.com/content/dam/Global%20Site/Industries%20&%20solutions/waterutility/pdf/engineering-manual.pdf>).