

**REALIZAR EL DISEÑO DE LA EXTRACCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE AGUA DE  
LOS POZOS PERFORADOS, SEGÚN LAS NECESIDADES Y  
CARACTERÍSTICAS DE LOS POZOS**

**DIEGO FERNANDO ACOSTA SALINAS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2010**

**REALIZAR EL DISEÑO DE LA EXTRACCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE AGUA DE  
LOS POZOS PERFORADOS, SEGÚN LAS NECESIDADES Y  
CARACTERÍSTICAS DE LOS POZOS**

**DIEGO FERNANDO ACOSTA SALINAS**

**Trabajo de grado en la modalidad de práctica empresarial, presentado para  
optar al título de Ingeniero Químico**

**Director**

**MARIA PAOLA MAREDEI G.**

**Ingeniera Química. Ph.D.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO -QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2010**

## CONTENIDO

	Pág.
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>12</b>
<b>1. CONCEPTOS TEÓRICOS</b>	<b>14</b>
<b>1.1 LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS</b>	<b>14</b>
<b>1.2 TIPOS Ó MÉTODOS DE PERFORACIÓN</b>	<b>16</b>
<b>1.2.1 Clasificación de los métodos por aplicación</b>	<b>17</b>
<b>1.2.1.1 Percusión a cable</b>	<b>17</b>
<b>1.2.1.2 Sistema de perforación rotativa</b>	<b>18</b>
<b>1.2.1.3 Sistema de perforación rotativa con circulación directa</b>	<b>20</b>
<b>2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO ACTUAL</b>	<b>21</b>
<b>2.1 ETAPA PREVIA A LA PERFORACIÓN</b>	<b>22</b>
<b>2.2 ETAPA DE PERFORACIÓN</b>	<b>22</b>
<b>2.3 ETAPA DE POST-PERFORACIÓN</b>	<b>23</b>

<b>3. DESARROLLO EXPERIMENTAL</b>	<b>25</b>
<b>4. RESULTADOS</b>	<b>29</b>
<b>5. ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	<b>34</b>
<b>5.1 PROFUNDIDAD</b>	<b>34</b>
<b>5.2 ANÁLISIS SEGÚN LA LONGITUD DE LA TUBERÍA INSTALADA</b>	<b>38</b>
<b>5.3 CAUDAL Y VELOCIDAD</b>	<b>40</b>
<b>5.4 POTENCIA DE LA BOMBA</b>	<b>41</b>
<b>6. CONCLUSIONES</b>	<b>43</b>
<b>7. RECOMENDACIONES</b>	<b>44</b>
<b>8. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>45</b>
<b>9. ANEXOS</b>	<b>48</b>

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1.</b> Tipos de acuíferos	15
<b>Figura 2.</b> Cuadro indicativo de los diferentes tipos de perforación	17
<b>Figura 3.</b> Esquema de sistema y equipo de perforación Utilizado por <i>PERFORAGUAS Y MANTENIMIENTO</i>	21
<b>Figura 4.</b> Diagrama de bloques del método de cálculo utilizado para el desarrollo experimental	25
<b>Figura 5.</b> Flujo de conducción de agua del pozo ubicado en la finca pozo redondo	29
<b>Figura 6.</b> Flujo de conducción de agua del pozo ubicado en la finca El tecal	30
<b>Figura 7.</b> Flujo de conducción de agua del pozo ubicado en las Residencias Aristi	30
<b>Figura 8.</b> Flujo de conducción de agua del pozo ubicado en la Finca el euro	31
<b>Figura 9.</b> Flujo de conducción de agua del pozo ubicado en la Escuela rural carbonero	32

<b>Figura 10.</b>	Curva de comportamiento de la bomba sumergible 4SR75G	36
<b>Figura 11.</b>	Curva de comportamiento de la bomba sumergible 4SR13G	37

## LISTA DE TABLAS

		Pág.
<b>Tabla 1.</b>	Resultados obtenidos a partir del desarrollo experimental	32
<b>Tabla 2.</b>	Relación de presión y profundidad de los pozos	35
<b>Tabla 3.</b>	Resultados de pérdidas de energía para el caudal de 10m <sup>3</sup> /h generado por la bomba 4SR75G	36
<b>Tabla 4.</b>	Relación de pérdidas asociadas a la tubería y a los accesorios Para cada pozo	38
<b>Tabla 5.</b>	Resultados de caudal y velocidad para los pozos descritos	40
<b>Tabla 6.</b>	Potencia de bomba antes y después del análisis energético	41
<b>Tabla 7.</b>	Precios comerciales de las bombas sumergibles Según su potencia	42

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
<b>Anexo 1.</b> Ventajas y desventajas de las fuentes de abastecimiento De agua potable superficiales y subterráneas	48
<b>Anexo 2.</b> Ventajas y desventajas de los diferentes métodos de Perforación en formaciones sedimentarias no consolidadas	49
<b>Anexo 3.</b> Ventajas y desventajas de los diferentes métodos de Perforación según el riesgo de formaciones sedimentarias consolidadas	50
<b>Anexo 4.</b> Ventajas y desventajas de los diferentes métodos de Perforación en formaciones cristalinas	51
<b>Anexo 5.</b> Ventajas y desventajas del método de perforación a Percusión por cable	52
<b>Anexo 6.</b> Diagrama de Construcción final del pozo con todos sus Componentes	54
<b>Anexo 7.</b> Bomba sumergible tipo lapicero	55
<b>Anexo 8.</b> Características generales de las bombas sumergibles	56

<b>Anexo 9.</b>	Tabla de valores aproximados de coeficientes de pérdidas en accesorios para tuberías de PVC	57
<b>Anexo 10.</b>	Capacidad de producción de los principales acuíferos en el Territorio Colombiano	59

## RESUMEN

**TITULO:** REALIZAR EL DISEÑO DE LA EXTRACCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE AGUA DE LOS POZOS PERFORADOS, SEGÚN LAS NECESIDADES Y CARACTERÍSTICAS DE LOS POZOS \*

**AUTOR:** ACOSTA SALINAS, Diego Fernando \*\*

**PALABRAS CLAVE:** Perforación, Profundidad, Tubería, Potencia de la bomba, Bomba sumergible

La empresa PERFORAGUAS Y MANTENIMIENTO se dedica a la perforación de pozos profundos de pequeño diámetro para producción de agua, estos se construyen con base e las condiciones del terreno y principalmente para uso doméstico, sin embargo el agua que producen estos, visiblemente no es la de mejor calidad ya que se puede observar a simple vista sedimentos presentes en el agua que sale de dichos pozos.

Esto se atribuye a la gran potencia de la bomba que succiona materiales no consolidados del fondo de los pozos y logran abrirse paso a través de los filtros instalados en cada uno de estos. El objetivo de este trabajo es el desarrollo de un protocolo de cálculo para el diseño de bombas a utilizar en un sistema de extracción de agua de pozos perforados teniendo en cuenta un mejor rendimiento energético, bajos costos y mejor calidad del agua.

Para esto se utilizará el balance de energía mecánica de Bernoulli con el cual se conocerán los requerimientos energéticos de cada pozo. Este trabajo da una serie de recomendaciones técnicas para la realización de cambio de bombas en los pozos existentes y para los futuros proyectos de pozo de la empresa PERFORAGUAS Y MANTENIMIENTO, que van de la mano con un ahorro económico, energético y de mejoramiento de la calidad del agua.

\*Trabajo de grado

\*\*Facultad de Ingenierías Físico -Químicas. Escuela de Ingeniería Química.

Director Ph.D. María Paola Maradei G.

## SUMMARY

**TITLE:** TO PERFORM THE EXTRACTION AND DISTRIBUTION DESIGN OF THE DRILLED WATER WELLS, FOLLOWING THE WELL'S NEEDS AND FEATURES\*

**AUTHOR:** ACOSTA SALINAS, Diego Fernando \*\*

**KEYWORDS:** Drilling, Deep, Drill Pipe, Pump Power, Underwater Pump

PERFORAGUAS AND MAINTENANCE Enterprise dedicates itself to small diameter deep Wells drilling for water production, these are built taking into account the ground conditions and mainly for domestic use, however the water these wells produce, are not the best quality one, it can be observed sediments in the water obtained from these wells.

This occurs because of the pump high power, that sucks off non consolidate materials the bottom's wells and these achieve to go through the filters installed at every one of it. The target of this elaboration is to the develop a calculation protocol for the water extraction system pumps design to use at the drilled wells, taking into account better energy performance, low cost and better water quality.

For this it will use Bernoulli's mechanics energy balance which will know every energy well requirements, this elaboration introduces several technical recommendations in order to change the pumps used at the actual drilled wells and for the PERFORAGUAS AND MAINTENANCE enterprise future wells projected, going hand in hand with economics, energetic saving and water quality improvement.

\*Grade elaboration

\*\*Physical - Chemical Engineering School. Chemical Engineering College.

Director Ph.D. María Paola Maradei G.

## INTRODUCCIÓN

La empresa *PERFORAGUAS Y MANTENIMIENTO*, perfora pozos para producción de agua, mediante la combinación de dos técnicas de perforación, (a percusión y rotativo con circulación de fluido directa), participa en la construcción del pozo, y en la instalación de bombas tipo lapicero totalmente sumergidas para la extracción del líquido.

Actualmente el diseño final de los pozos está generando problemas, debido a los criterios de selección de bombas que están orientados hacia sistemas muy potentes, lo que les permite cumplir con los requerimientos energéticos del transporte del fluido hasta el lugar de disposición final. Sin embargo, esto ha generado que las arenas y detritos presentes en las paredes del pozo y el agua penetren y traspasen los filtros y el agua salga con cierto grado de turbiedad, lo que baja en gran medida la calidad del agua.

El objetivo de este trabajo es generar una solución viable tanto operativa como económica para responder a la problemática actual de la empresa y que le represente una mejora significativa en la calidad de los pozos y del agua entregada a los clientes finales.

Para esto, es necesario realizar un estudio detallado de los requerimientos energéticos para cada tipo de pozos y brindar una herramienta eficiente que permita solucionar la problemática, esto abarca conocer y calcular variables como el caudal, la velocidad de flujo en la tubería, diferencia de presiones al comienzo y al final del pozo, pérdidas de energía por fricción por accesorios y asociadas a la tubería, con el fin de encontrar la potencia óptima requerida por la bomba.

La validación del trabajo de selección realizado fue efectuada durante la puesta en marcha de la bomba para lo cual se comprobó el funcionamiento de esta y se realizaron análisis de los parámetros de calidad del agua.

En este documento se encontrará un informe detallado de los métodos de perforación normalmente utilizados en la industria, el utilizado por la empresa *PERFORAGUAS Y MANTENIMIENTO*, y en detalle el método utilizado para resolver la problemática de diseño de los pozos de dicha empresa, datos técnicos y variables de diseño en sistemas de agua potable.

## 1. CONCEPTOS TEÓRICOS

En este capítulo se dará a conocer algunos aspectos generales en lo que corresponde a los aspectos generales sobre tipos de acuíferos, técnicas de perforación de pozos de pequeño diámetro con sus respectivas ventajas y desventajas dependiendo del terreno en el cual se van a realizar las perforaciones.

### 1.1 LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Las aguas subterráneas provienen de la infiltración en el terreno de las aguas lluvias o de lagos y ríos, que después de pasar la franja capilar del suelo, circulan y se almacenan en formaciones geológicas porosas o fracturadas, denominadas acuíferos.

Los acuíferos desempeñan un papel fundamental tanto como conductores de las aguas desde sus zona de recarga hasta lagos, ríos, manantiales, pantanos, captaciones construidas por el hombre y como almacenadores de estos recursos que posteriormente pueden ser aprovechados para satisfacer las necesidades de abastecimiento de sus usuarios [1].

Existen básicamente dos diferentes tipos de acuíferos [2]:

**Acuíferos libres**, son generalmente someros, donde el agua se encuentra relleno por poros y fisuras por acción de la gravedad. La superficie hasta donde llega el agua es denominada superficie freática y en los pozos es conocida como nivel freático. (Ver figura 1)

**Acuíferos confinados**, en estos acuíferos el agua se encuentra a presión entre capas impermeables, de modo que si se extrae agua no queda ningún poro vacío,

sólo se disminuye la presión del agua que colabora con la sustentación de todos los materiales, pudiendo en casos extremos, llegar a producirse asentamientos del terreno. La superficie virtual que se formaría si se perforaran infinitos pozos en el acuífero confinado se denomina superficie piezométrica y dentro de un pozo es conocida como nivel piezométrico [3].

Existen también otros acuíferos denominados semiconfinados cuando las capas que lo limitan son de muy poco espesor o semipermeables.

**FIGURA 1.** Tipos de acuíferos



Fuente: EMAS [4]

Los acuíferos son explotados a través de varios tipos de captaciones, entre las cuales las más comunes son:

- Pozos profundos, perforados a través de muchas técnicas y que generalmente requieren de grandes equipos de perforación.
- Aljibes, que son pozos poco profundos generalmente excavados a mano y algunas veces revestidos en piedra, ladrillo o cemento.

- Manantiales, que son exposiciones naturales de las aguas subterráneas en superficie y que son aprovechados directamente, sin necesidad de grandes obras.

La elección de alguna de estas formas de acceder a los acuíferos dependerá tanto de las características hidrogeológicas de la zona en particular, como de las necesidades de abastecimiento de agua y de las condiciones socioeconómicas de la región.

Una de las grandes ventajas de las aguas subterráneas es que generalmente son de buena calidad para consumo humano por estar protegidas naturalmente por capas de suelos o rocas que tienen la capacidad para atenuar, retardar o retener algunos contaminantes, además de ser menos susceptibles que las aguas superficiales a cambios climáticos.

## 1.2 TIPOS Ó MÉTODOS DE PERFORACIÓN

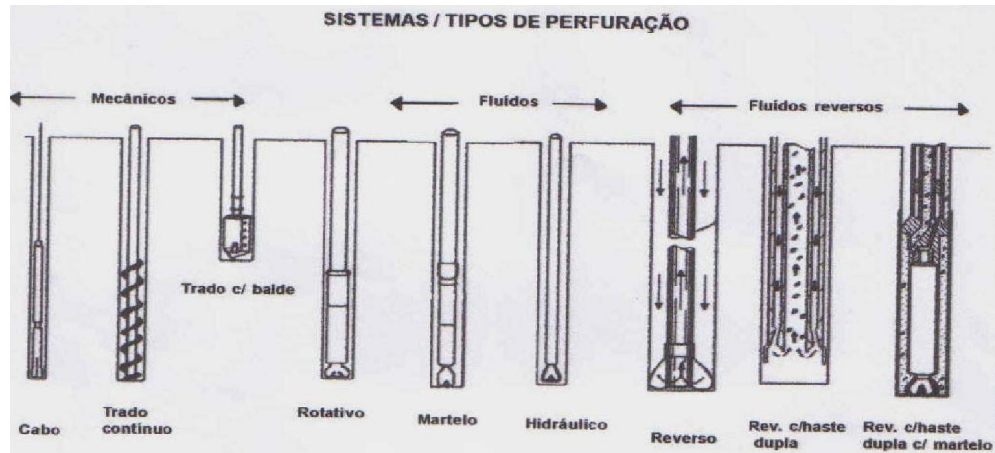
Son conocidos y empleados varios sistemas de perforación en suelo y rocas. Teniendo en cuenta los objetivos para los que se destine la obra, estos pueden ser [5]:

- **Sistemas mecánicos:**
  - Percusión a cable.
  - Sacatestigo continuo (Tornillo sinfín).
- **Sistemas con circulación directa de fluido:**
  - Rotativo con circulación Directa.
  - Martillo neumático o *Down the Hole*.
  - Hidráulico.
- **Sistemas con circulación Inversa de Fluido:**
  - Rotativo con circulación inversa.

Rotativo con circulación inversa con barra doble .

Rotativo con circulación inversa con barra doble y martillo .

**Figura 2.** Cuadro indicativo de los diferentes tipos de perforación.



Fuente: UNEP [5].

### 1.2.1 Clasificación de los Métodos por Aplicación

La clasificación usual es hecha en base a los tipos de formaciones geológicas, adecuándose a sus características litológicas a un determinado proceso de perforación.

Se encuentran diferentes tipos de ventajas y desventajas al utilizar cierto método de perforación en cada uno de los terrenos en los que se realizan trabajos (Ver anexos 2, 3 y 4), con base en esto, se realiza la selección de la mejor forma de perforar los pozos.

#### 1.2.1.1 Percusión a Cable

Los primeros sistemas de perforación por percusión (China, 4000 AC) consistían en un balancín contrapesado por un grupo de hombres, que efectuaban el tiro en

un extremo de una cuerda mientras que de otro colgaba la sarta de perforación construida con cañas de bambú.

Este sistema de perforación ha ido evolucionando incorporando técnicas y materiales modernos, por lo que sigue siendo uno de los procedimientos más usados actualmente para la explotación de acuíferos e investigación, ya que presenta ventajas que los más modernos sistemas de perforación no han podido igualar.

La técnica de perforación consiste en realizar un movimiento alternativo de bajada - subida de una masa pesada que en su caída va fracturando o disgregando la roca, desprendiendo de la misma, trozos de variado tamaño, que después se extraen por medio de una válvula o cuchara de limpieza.

Es una técnica válida para cualquier tipo de material, sobre todo rocas consolidadas [6].

#### **1.2.1.2 Sistema de Perforación Rotativa**

Se trata de una tecnología de perforación de rocas compactas y friables, por medio del uso de un sistema que conjuga la rotación y el peso de una columna rígida sobre una broca, tricónica o no. Complementa el sistema la circulación de un fluido especial que se destina a remover y transportar hasta la superficie los detritos cortados, refrigerar la herramienta y mantener la estabilidad en las paredes del pozo.

En vista de la limitación de los sistemas de perforación a percusión con cable y rotativo con aire comprimido para la perforación de pozos con profundidades superiores a 400-500m en rocas cristalinas y sedimentarias muy consolidadas, se encuentra en el sistema rotativo la alternativa adecuada para esta situación. De

cierta manera, el sistema rotativo de hecho se constituyó en la mejor alternativa, inclusive cuando se considera la perforación en profundidades menores a la indicada, siempre que el desafío sea el de perforar rocas sedimentarias friables o poco consolidadas. En este caso, por la capacidad del sistema, se recomienda para cualquier profundidad.

La tecnología de perforación rotativa alcanzó en los últimos veinte años progresos considerables gracias principalmente a su desarrollo en la industria del petróleo. Los fabricantes perfeccionaron equipamientos cuyos rendimientos y performances resultan en desempeños eficaces, apoyados por el notable desarrollo de nuevos productos para los fluidos de perforación.

El sistema rotativo de perforación, combina el efecto cortante provocado por un peso sobre una broca que gira, con el de un fluido en circulación continua que remueve los detritos cortados llevándolos hasta la superficie. Existen dos tipos principales de sistema de perforación rotativo:

#### **Circulación directa:**

Cuando el fluido de perforación es inyectado en el pozo a través de la parte interna de la columna de perforación, saliendo a través de los orificios localizados en la parte inferior de la broca. Por la acción de una bomba de Lodo el material cortado es transportado a la superficie donde es separado por una zaranda vibratoria, retornando la parte de fluido recondicionada al pozo, repitiéndose el circuito.

#### **Circulación inversa:**

Cuando en sentido inverso los detritos cortados son retirados del hueco por succión (aire comprimido o bombas centrífugas) a través de los orificios de la

broca. Es un proceso inverso al convencional, ya que los tanques de lodos alimentan directamente al pozo sin que se produzca inyección de fluido.

### **1.2.1.3 Sistema de Perforación Rotativo con Circulación Directa.**

El equipamiento de perforación, deberá ser preferentemente una máquina rotativa, con capacidad de perforación y finalización de un pozo tubular profundo, pudiendo ser utilizado el sistema rotativo con circulación directa, rotativo con circulación inversa o roto-neumática. Deberá ser tomada en cuenta las características de los proyectos y las limitaciones de los métodos.

Complementariamente se tiene los sustitutos, los estabilizadores y las reducciones debidas a los necesarios y diferentes tipos de roscas. Junto al equipamiento de perforación se debe disponer de un conjunto de bomba de lodo, el cual puede ser de tipo centrífugo (para pozos de hasta 300 o 400m) o alternativo de doble o triple efecto (a pistón) para pozos más profundos. Un conjunto de tanques metálicos o de mampostería, una zaranda vibratoria, un desarenador y un conjunto de válvulas conecta las mangueras de alta presión que conducen en fluido hasta la máquina rotativa.

Estos son las técnicas de perforación que actualmente son más utilizadas por las diferentes empresas y firmas de perforación, no solo de pozos de producción de agua, sino también de producción petrolera, cabe resaltar que cada uno de los métodos tiene ventajas y desventajas que dependiendo de las necesidades, condiciones del terreno, y en fin, la gran cantidad de variables presentes en el momento de realizar una perforación se hace necesario utilizar alguno de los métodos anteriormente mencionados o una combinación de varios como es el caso de *PERFORAGUAS Y MANTENIMIENTO*, a continuación se tratará de describir el proceso que usa esta empresa en la perforación de sus pozos [7].

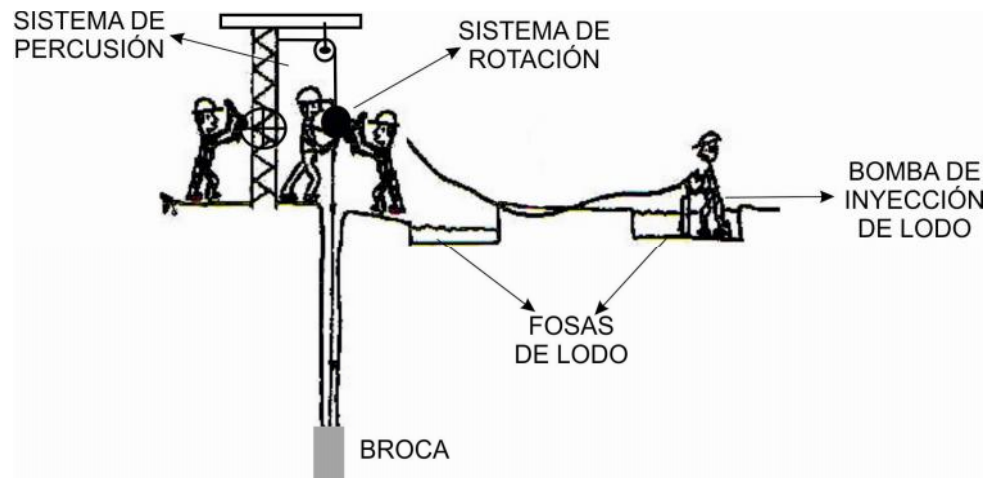
## 2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO ACTUAL

*PERFORAGUAS Y MANTENIMIENTO*, usa una técnica de perforación manual, relativamente fácil, rápida y económica, combina la rotación con circulación directa y la percusión, donde el origen de la fuerza motriz es la fuerza humana.

Como se muestra en la Figura 3, el equipo consta de una torre de perforación, un sistema para rotación (broca, tubería y motor), un sistema de percusión y un sistema de inyección de lodo (fosas de lodo y bomba de lodos).

Con este método se ha logrado perforar hasta 60 m de profundidad en terrenos no consolidados y libres de material rocoso, con un rendimiento máximo de 20 m de perforación en 8 horas y con un grupo de trabajo compuesto por 4 operarios. Las perforaciones generalmente se realizan hasta una profundidad que oscila entre los 20 y 60 m de profundidad.

**Figura 3.** Esquema de sistema y equipo de perforación utilizado por *PERFORAGUAS Y MANTENIMIENTO*.



**Fuente:** El autor.

## **2.1 Etapa previa a la perforación**

Inicialmente se debe seleccionar el sitio apropiado para la perforación, lo cual incluye además de la concertación con el cliente, una serie de estudios hidrogeológicos previos que ayuden a identificar los posibles acuíferos, el sitio debe también estar alejado de las posibles fuentes de contaminación de las aguas subterráneas, se realiza la preparación y montaje de los equipos de perforación con todas las especificaciones técnicas.

Para la perforación manual de pozos profundos, se requiere de los siguientes equipos:

- Torre de perforación.
- Barras ó tubería de perforación.
- Brocas.
- Bomba de lodo.

## **2.2 Etapa de Perforación**

Una vez seleccionado el sitio en el cual se va a realizar la perforación y preparados los equipos, se procede a la etapa de instalación y montaje en el sitio previamente identificado, para esto, se tiene en cuenta el siguiente orden :

- Montaje y anclaje de la torre.
- Construcción de las fosas de lodo.
- Instalación del sistema de inyección de lodo.
- Preparación del lodo de perforación.
- Instalación del primer tubo de perforación con la broca.

La perforación se realiza basada en dos movimientos principales, percusión manual y rotación mecánica de la broca y tubos de perforación, para facilitar las labores de perforación es inyectado el lodo mediante la bomba de lodos , a continuación se describen algunos aspectos generales sobre la perforación.

La percusión es el movimiento repetido de la elevación y caída de las barras de perforación, la elevación se realiza por medio de la torre de perforación, a la cual está empotrado el motor que permite la rotación de la tubería y la inyección de los lodos.

La rotación es le procedimiento por el cual la broca gira arrancando el material rocoso por abrasión del mismo, el motor genera energía mecánica que se ve reflejada en las rotaciones de la sarta de perforación, al mismo tiempo la inyección de lodos va retirando los detritos generados por todo el proceso de perforación, a continuación los residuos generados por este proceso y extraídos por el lodo se decanta en las fosas de lodos.

### **2.3 Etapa de Post-Perforación**

Esta etapa consiste en la limpieza del pozo para extraer todo el lodo y materiales en suspensión sobrantes de la circulación del lodo y prepararlo para el entubado o encamisado, posteriormente se realiza la construcción final del pozo y se procede a instalar la bomba de extracción de agua.

La limpieza del pozo se realiza instalando la bomba de lodo a una fuente con abundante agua que se bombea a través de la sarta de perforación hacia el fondo del pozo con el fin de retirar remanentes de lodo y detritos, esto se hace hasta que el gua salga lo más clara posible. Terminado este proceso, se procede a retirar la sarta de perforación, el entubado se hace con el fin de evitar que se derrumben las paredes del pozo y al mismo tiempo sirve como filtro, esta tubería se ranura en

secciones de 1 m con ranuras cada 5 cm y espaciado entre sección de 50 cm, se hace este procedimiento para los últimos 12 metros de tubería en el fondo del pozo.

Finalizado el entubado del pozo, el espacio entre las paredes de la perforación (diámetro externo), y el encamisado, se rellena con gravilla seleccionada que actúa como filtro debido a su alta porosidad y a la vez como sellante para las paredes del pozo y evitar derrumbes, por último se instala la bomba de extracción de agua: La bomba que se instala en el pozo una vez finalizada su construcción, es una bomba totalmente sumergible tipo lapicero, marca Pedrollo ref. 4SR 75G que se encuentra comercialmente en potencias de 1,5 - 2 y 3 HP en adelante.

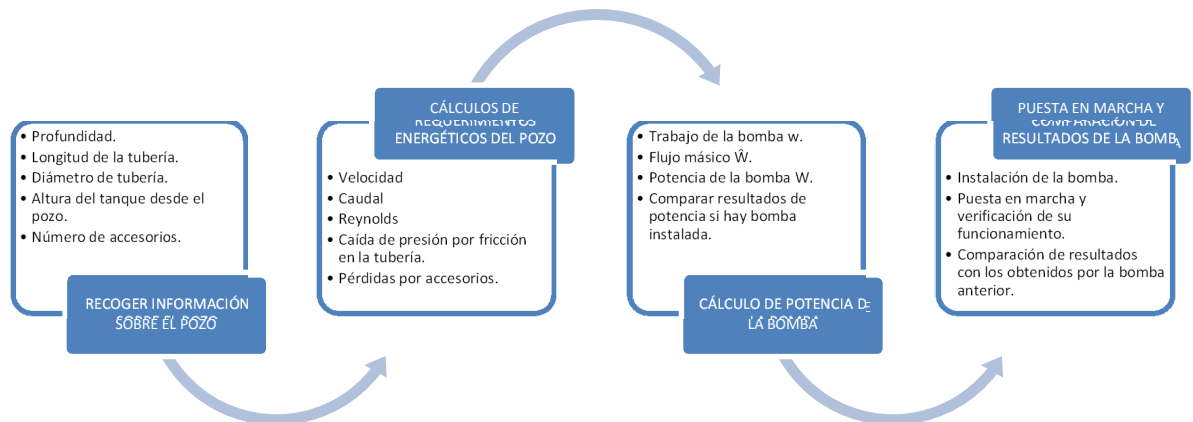
Esta bomba trabaja con corriente eléctrica y su instalación se realiza de la siguiente manera: se procede a hacer la conexión eléctrica la cual debe quedar totalmente sellada para evitar la entrada de agua, y se instala a su salida a un tubo de 2" de diámetro y se va bajando por etapas de 6 m que es la longitud de cada tubo de PVC.

Una vez terminada la construcción final del pozo, se procede a recoger toda la información necesaria que permita la caracterización energética del pozo, a continuación el siguiente capítulo detallará cada paso a seguir a la hora de realizar los cálculos de energía requerida por la bomba para obtener los mejores resultados en el bombeo desde el pozo, buen caudal y calidad del agua.

### 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

El desarrollo experimental de este proyecto se basa principalmente en realizar un a caracterización energética para la producción de agua, con el fin de encontrar la bomba adecuada que se ajuste a los requerimientos técnicos y genere excelentes resultados en cuanto a calidad del agua extraída desde los pozos, además de generar un ahorro económico por utilizar los equipos adecuados; a continuación se encontrará el proceso utilizado para realizar y completar los cálculos y posterior selección del equipo apropiado para el trabajo :

**Figura 4.** Diagrama de bloques del método de cálculo utilizado para el desarrollo experimental.



Recoger la información sobre el pozo, es la primera etapa del proceso de caracterización del acuífero, es necesario consignar la profundidad total  $d$  e esta medida desde el nivel del suelo hasta el punto donde llegó la sarta de perforación, es sencillo medirla contando el número de tubos de perforación utilizados, ya que, cada uno tiene una longitud total de 1,60 m por lo tanto se facilita en gran medida el cálculo de la profundidad total; la longitud de la tubería es tomada por el número de tubos de 6 m de PVC utilizados para llevar el agua desde el sitio de recolección

hasta el lugar de disposición final del líquido, esta tubería generalmente tiene un diámetro de 2" que es el mismo que es instalado a la salida de la bomba.

Se mide la altura del tanque de almacenamiento de agua, que es la distancia entre la parte superior del tanque hasta el nivel sobre el suelo del pozo, por último se toma en cuenta el número de accesorios que pueden generar pérdidas energéticas por cambios de dirección, reducción ó aumento de diámetro, controladores de caudal, etc.

Los cálculos de requerimientos energéticos del pozo permiten realizar un cálculo más exacto sobre la potencia requerida para obtener resultados óptimos en el caudal y calidad del agua, para esto, se toma una base de cálculo del gasto de agua por hora de 2 m<sup>3</sup>, es decir que un tanque de 1 m<sup>3</sup> se puede llenar en 30 minutos lo que permite un caudal de 33,33 L/min, que se consideró un caudal apropiado teniendo en cuenta que el agua es utilizada para uso doméstico, conocido este valor se procede a calcular la velocidad de flujo dentro de la tubería.

Conocida la velocidad, el caudal y el diámetro de la tubería, así como también los valores físicos del agua correspondientes a la densidad y la viscosidad del agua se calcula el número de Reynolds, variable adimensional que permite conocer el régimen de flujo a través de una tubería, y así determinar las pérdidas de presión mediante la ecuación de pérdidas asociadas a la fricción en la tubería [8]:

$$h_f = \sum_i \left( \frac{1}{2} V^2 \frac{L_i}{D} 4f \right) = \frac{2V^2 f}{D} \sum_i L_i$$

Donde,  $h_f$  = pérdidas asociadas a la tubería [m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>]

$L$  = longitud total de la tubería [m]

$f$  = factor de fricción de la tubería [adimensional]

Se toma el factor de fricción para tuberías de PVC correspondiente a 0,009 [9] y se suman todos los trayectos de la tubería para tomar un valor total de tubería sumando también la profundidad del pozo a la longitud total.

Conocido el valor correspondiente a las pérdidas por fricción en la tubería se procede a calcular las pérdidas energéticas asociadas a los accesorios presentes en el trayecto total de tubería :

$$h_x = \sum_i \left( \frac{1}{2} V^2 e_v \right)_i$$

Donde,  $h_x$  = pérdidas asociadas a los accesorios [ $m^2/s^2$ ]

$e_v$  = coeficiente de pérdidas en accesorios (anexo 9)

Se realiza la sumatoria de todos los accesorios que generan pérdidas de presión y se multiplican por su respectivo coeficiente de pérdidas, las uniones a excepción de las bridas generan pérdidas despreciables, por tal razón no se tienen en cuenta en los cálculos de pérdidas por accesorios.

Conocidos los datos de caudal, velocidad, régimen de flujo, pérdidas asociadas a la tubería y a los accesorios, se procede a calcular el trabajo que debe entregar la bomba al fluido en el sistema mediante la ecuación de balance de energía mecánica conocida como ecuación de Bernoulli [10], descrita a continuación:

$$w = \frac{- \left( g \cdot h + \frac{1}{\rho} (P_2 - P_1) + \frac{2V^2 f}{D} \sum_i L_i + \sum_i \left( \frac{1}{2} V^2 e_v \right)_i \right)}{g}$$

Donde,  $w$  = trabajo entregado por la bomba [ $kg_f/kg_m$ ]

El trabajo entregado por la bomba debe ser negativo, ya que se toma como referencia la bomba y se debe ver como la energía mecánica que debe aportar la bomba para el sistema de flujo a través de la tubería. A continuación se debe calcular el flujo másico con el fin de encontrar cuanta masa (en este caso agua) debe transportar la bomba.

Por último, dentro de los cálculos es necesario conocer el valor correspondiente a la energía que debe suministrar la bomba al fluido en caballos de fuerza [hp], para facilitar su selección y compra.

Para calcular la cantidad de caballos de fuerza necesarios se utiliza el factor de conversión correspondiente a  $1 \text{ hp} = 76 \text{ kg.m/s}$ , se comparan los resultados con la potencia de la bomba que haya instalada (si lo está), y se procede a la instalación de la misma revisando los resultados obtenidos después de la puesta en marcha de esta.

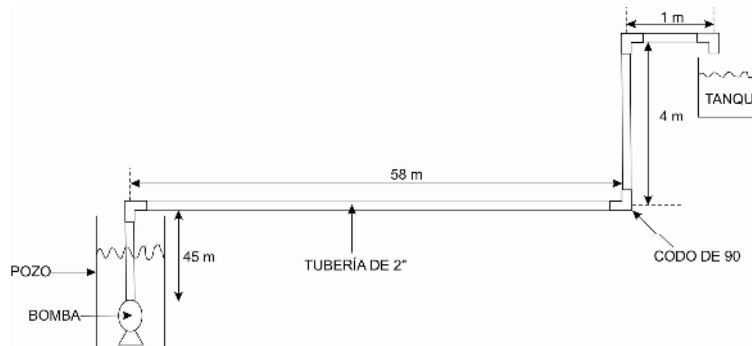
Se conoció en detalle el método de cálculo y caracterización energética del pozo, los requerimientos mínimos que debe tener la bomba para obtener resultados óptimos en la calidad del agua y caudal necesario para suplir las necesidades de los clientes, a continuación se encontrará los resultados obtenidos a partir de la utilización del anterior método.

## 4. RESULTADOS

Se discriminó en 5 tipos de pozos que contenían características diferentes cada uno, es decir, que se analizaron los tipos y dependiendo de las características, ubicación, geometría de la conducción y necesidades, surgieron estas clases, además, coincidían con la problemática descrita al inicio de este proyecto, agua visualmente de baja calidad debido a la turbidez por sedimentos observados en el líquido a la salida de la tubería supuestamente consecuencia de la potencia de la bomba, a continuación se hará una descripción de cada uno de ellos con el fin de contextualizar la información.

**Pozo 1:** Finca Pozo Redondo situada en el Municipio de Puerto Triunfo del Departamento de Antioquia, se seleccionó por la geografía del terreno, totalmente horizontal desde el punto de construcción del pozo hasta el punto de destino del agua, tanque ubicado en el techo de la casa, y una profundidad de pozo considerable.

**Figura 5.** Flujo de conducción de agua del pozo ubicado en la finca pozo redondo.

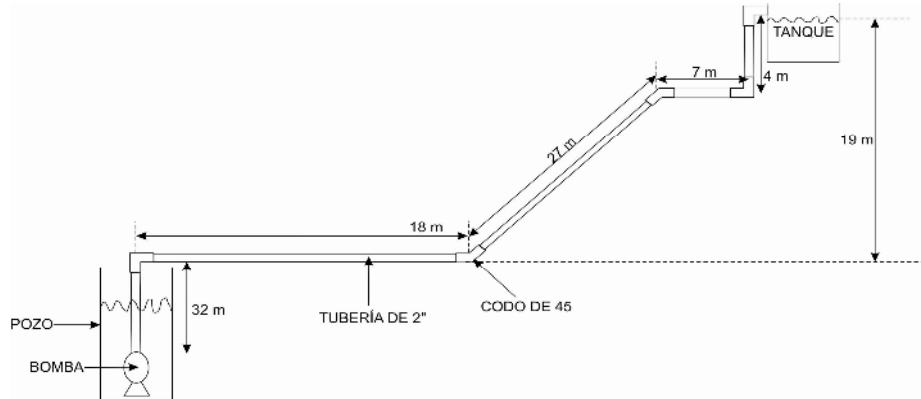


**Fuente:** El autor.

**Pozo 2:** Finca El Tecal, ubicada también en el Municipio de Puerto Triunfo, condiciones similares a las del pozo 1, sin embargo, una longitud de tubería

ligeramente más corta y el pozo situado en la base de una colina de aproximadamente  $45^{\circ}$  de inclinación, y una altura del tanque considerable.

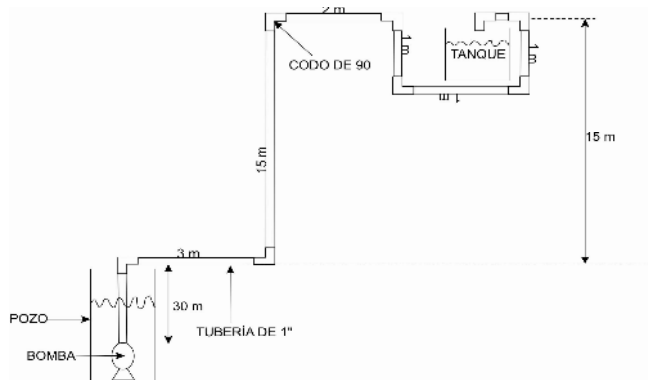
**Figura 6.** Flujo de conducción de agua del pozo ubicado en la finca el tecal.



**Fuente:** El autor.

**Pozo 3:** Residencias Aristi ubicadas en el municipio de Puerto Boyacá Departamento de Boyacá, en el Magdalena medio, agua con baja turbiedad, longitud horizontal desde el pozo al tanque corta pero verticalmente considerable, zona urbana, y diámetro de tubería diferente al normalmente utilizado de 2" y baja profundidad.

**Figura 7.** Flujo de conducción de agua del pozo ubicado en las residencias Aristi.

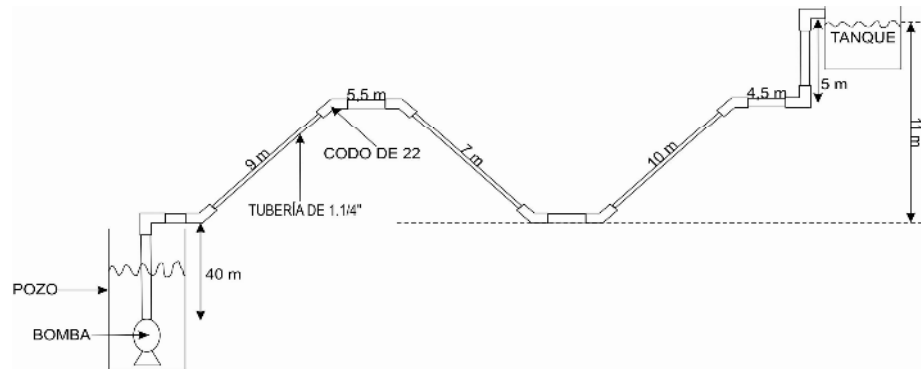


**Fuente:** El autor.

Nota: La tubería que se encuentra por encima de la sección de 15 m, está sob re el mismo nivel, hubo que rodear el tanque por su instalación.

**Pozo 4:** Finca El Euro, ubicada en el Municipio de Sonsón, Departamento de Antioquia, geometría del terreno ondulada, con dos montículos entre la ubicación del pozo y el lugar de desagüe, esta ubicación se dio por que el pozo debe estar ubicado preferiblemente en un lugar bajo para obtener mejores resultados de operación en la perforación y producción del agua, y no se pudo ubicar entre los montículos por que la distancia entre ellos es muy corta y cuando llueve el agua baja por la cañada, lo que pudiera ocasionar daños irreparables en el pozo por el efecto de agua lluvia; potencia de la bomba y diámetro de tubería de flujo diferentes a los valores normalmente utilizados.

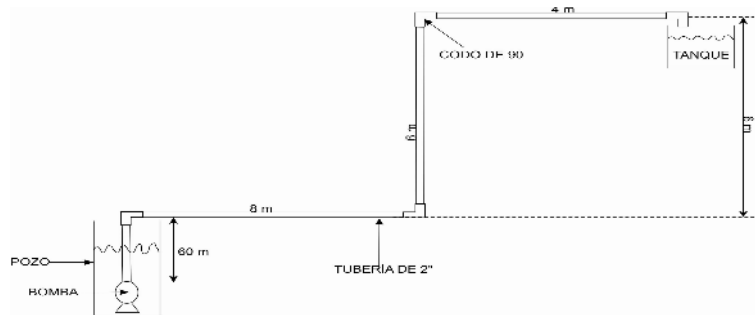
**Figura 8.** Flujo de conducción de agua del pozo ubicado en la finca el euro.



**Fuente:** El autor.

**Pozo 5:** Escuela Rural Carbonero, en el corregimiento El Marfil en el Municipio de Puerto Boyacá, pozo muy cerca del lugar de ubicación del tanque de almacenamiento, sin embargo, la distancia más profunda perforada por *PERFORAGUAS Y MANTENIMIENTO*, por lo tanto, usaron una bomba demasiado potente debido a su profundidad.

**Figura 9.** Flujo de conducción de agua del pozo ubicado en la escuela rural carbonero.



**Fuente:** El autor.

Los resultados obtenidos a partir del método de cálculo descrito en el capítulo anterior y teniendo en cuenta la información de cada pozo descrita anteriormente, son los siguientes:

**Tabla 1.** Resultados obtenidos a partir del desarrollo experimental.

	POZO 1	POZO 2	POZO 3	POZO 4	POZO 5
<b>DATOS DEL POZO</b>					
<b>PROFUNDIDAD [m]</b>	45	32	30	40	60
<b>LONGITUD [m]</b>	63	52	23	41	18
<b>DIÁMETRO DE FLUJO [m]</b>	2"	2"	1"	1.1/4"	2"
<b>ALTURA DEL TANQUE [m]</b>	4	19	15	11	6
<b>POTENCIA de la bomba instalada inicialmente [HP]</b>	2	2	1	1,5	3
<b>TIPOS Y NÚMERO DE ACCESORIOS</b>					
<b>CODOS DE 90°</b>	4	3	8	3	4
<b>CODOS DE 45°</b>	0	2	0	0	0
<b>CODOS DE 22°</b>	0	0	0	6	0
<b>CONTROLADOR DE CAUDAL</b>	1	1	1	1	1
<b>CÁLCULOS DEL POZO</b>					
<b>CAUDAL [m<sup>3</sup>/h]</b>	2	2	2	2	2
<b>VELOCIDAD [m/s]</b>	0,274	0,274	1,096	0,702	0,274
<b>REYNOLDS</b>	13924	13924	27848	22279	13924

<b>PÉRDIDAS EN LA TUBERÍA</b> [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	2,87	2,24	45,15	22,61	2,08
<b>PÉRDIDAS POR ACCESORIOS</b> [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	0,23	0,22	5,83	1,57	0,23
<b>PRESIÓN EN EL POZO [kPa]</b>	480,7	500,3	441,4	500,3	647,5
<b>TRABAJO [kg<sub>f</sub>/kg<sub>m</sub>]</b>	108,6	112,6	105,52	114,8	142,5
<b>FLUJO MÁSICO [kg/s]</b>	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
<b>POTENCIA de la bomba recomendada para este trabajo</b> [hp]	0,794	0,823	0,771	0,839	1,042

En el capítulo siguiente se encuentra un análisis más detenido sobre los resultados obtenidos después de realizar los cálculos y encontrar los valores mínimos de energía requerida.

## **5. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Tras obtener los resultados, después de utilizar el método de cálculo descrito en el desarrollo experimental, es necesario comparar y contrastar los valores hallados, así como también evaluar los resultados después de la puesta en marcha del pozo con la potencia de la bomba instalada equivalente a la energía mínima requerida para la producción de agua.

A continuación se detallará en cada uno de los elementos y variables que intervienen en el diseño final del pozo, con el fin de conocer los detalles que generan o no buenos resultados después de la puesta en marcha de la bomba en el acuífero.

### **5.1 Profundidad**

La profundidad en cada pozo varía según las características hidrogeológicas del terreno en el cual se va a realizar la perforación, para la zona del Magdalena Medio la disponibilidad del agua subterránea es alta [ver anexo 10], por lo tanto, no se hace necesario realizar perforaciones a tan altas profundidades por que el nivel freático se encuentra a muy baja profundidad [11].

Esta es quizá, la variable más importante a tener en cuenta dentro del cálculo del consumo energético del pozo para realizar la respectiva selección de la bomba que permita mejores resultados, ya que, una columna de agua más alta sobre la bomba generará más presión hidrostática sobre ella, y se necesitará más energía para llevar el agua desde el punto donde se extrae hasta el tanque de almacenamiento donde se deposita finalmente el líquido, debido a la fuerza que ejerce la columna en el área de flujo [12].

Un ejemplo de esto, está en contrastar los pozos con mayor y menor profundidad de los tomados para realizar los análisis energéticos antes mencionados, los pozos 3 y 5 con 30 y 60 m de profundidad respectivamente, presentan presiones de columna de agua sobre la bomba de 441 y 647 K Pa respectivamente, el resto de los pozos se encuentran dentro de este rango de presión, esto quiere decir que, aportan entre 42% y 47% del trabajo mínimo necesario que debe generar la bomba para transportar el fluido.

**Tabla 2.** Relación de presión y profundidad de los pozos.

	POZO 1	POZO 2	POZO 3	POZO 4	POZO 5
<b>Profundidad [m]</b>	45	32	30	40	60
<b>Presión sobre la Bomba [kPa]</b>	480,7	500,3	441,4	500,3	647,5
<b>Trabajo sólo por efecto de la presión [kg<sub>f</sub>/kg<sub>m</sub>]</b>	49,05	51,05	45,04	51,05	66,07
<b>Trabajo necesario total [kg<sub>f</sub>/kg<sub>m</sub>]</b>	108,6	112,6	105,52	114,8	142,5
<b>% de trabajo por la profundidad</b>	45	45,3	42,7	44,4	46,3

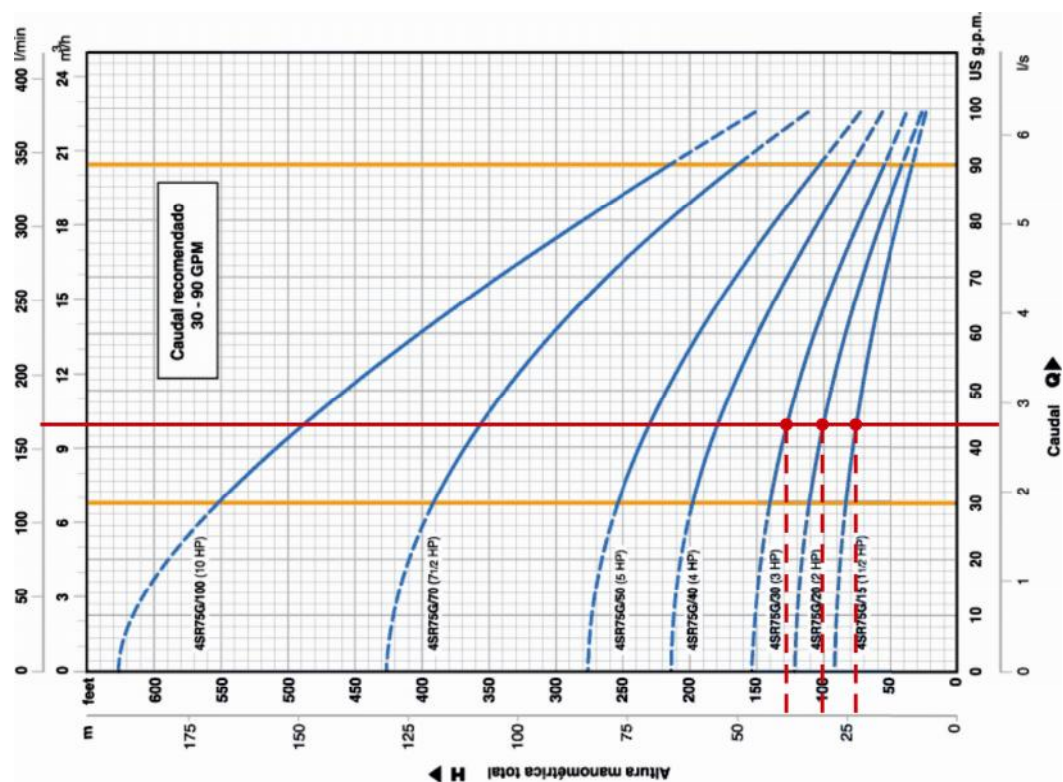
Se debe tener en cuenta que la profundidad de los pozos no depende de un valor específico para todos los pozos, sino más bien de la distancia a la cual se encuentre el nivel freático para asegurar que el pozo no se agote rápidamente, es necesario aplicar un buen análisis a esta variable ya que de ella depende en gran medida realizar una buena selección que genere la potencia suficiente para obtener buenos resultados energéticos, así como también realice el trabajo sin generar turbidez en el agua por arrastre de sedimentos que se produce en los pozos perforados.

En los pozos anteriormente analizados, se encontraban instaladas inicialmente bombas desde 1 hasta 3 hp (referencia 4SR75G), excepto el pozo número 3 en el que se encontraba una bomba 4SR13G de 1 hp, analizando la gráfica de eficiencia de la bomba 4SR75G (ver figura 10) se observa que no necesariamente es adecuada para la profundidad de los pozos, se aproximaría solamente en el

pozo 2, sino además esta bomba genera un caudal de 10 m<sup>3</sup>/h, repercutiendo en mayores pérdidas en la tubería y debida a accesorios (Ver tabla 3), lo que genera turbidez (observación visual) en el agua debido al aumento de la concentración de materiales no consolidados que se succiona del acuífero.

Podemos decir entonces que es evidente que existe un aumento desmesurado en las pérdidas energéticas si se usa el caudal generado por esta bomba.

**Figura 10.** Curva de comportamiento de la bomba sumergible 4SR75G.



Fuente: Pedrollo [13].

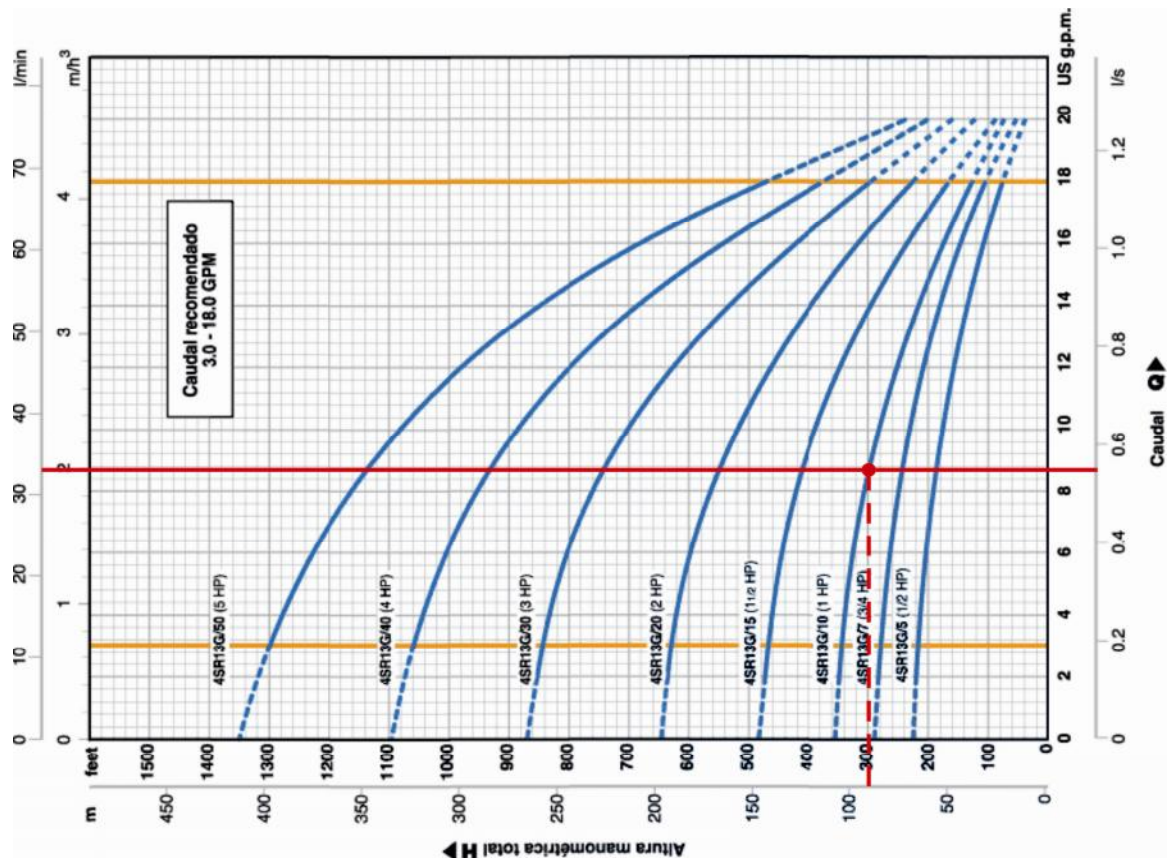
**Tabla 3.** Pérdidas para el caudal de 10m<sup>3</sup>/h generado por la bomba 4SR75G.

	POZO 1	POZO 2	POZO 3	POZO 4	POZO 5
<b>PÉRDIDAS POR CAUDAL DE 2 m<sup>3</sup>/h</b>					
<b>Pérdidas en la Tubería [m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>]</b>	2,87	2,24	45,15	22,61	2,08
<b>Pérdidas por Accesorios [m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>]</b>	0,23	0,22	5,83	1,57	0,23

PÉRDIDAS POR CAUDAL DE 10 m <sup>3</sup> /h					
Pérdidas en la Tubería [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	71,88	55,9	1128,73	565,3	51,91
Pérdidas por Accesorios [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	5,72	5,63	145,75	39,4	5,72

La bomba 4SR13G diseñada para mayores profundidades y menores caudales, cumplió con los requerimientos necesarios en términos de volumen de agua y calidad visual de la misma, además se puede usar una única potencia ya que su gráfica de comportamiento (figura 11) nos muestra que con una potencia de 1 hp esta puede trabajar hasta aproximadamente 90 m de profundidad, produciendo los 2 m<sup>3</sup>/h de agua desde el pozo, evitando así pérdidas energéticas innecesarias y dando una mejor calidad visual al agua que se extrae desde los acuíferos subterráneos.

**Figura 11.** Curva de comportamiento de la bomba sumergible 4SR13G.



Fuente: Pedrollo [14].

Entonces, la bomba 4SR13G cumple mejor la labor de extracción de agua desde los pozos, aprovechando mejor la energía sin sacrificar la producción de líquido, ya que así sea que los tanques se llenen en 30 o menos minutos el consumo de agua va a ser el mismo en los hogares.

## 5.2 Análisis según la longitud de la tubería instalada

Otro elemento a tener en cuenta en el análisis energético de los pozos perforados y en su diseño final es la longitud de la tubería instalada . Esta es importante, ya que dependiendo de la instalación a realizar, pueden aumentar ó disminuir las pérdidas asociadas a la tubería y a los accesorios.

Si bien es cierto que, para los pozos antes mencionados y en general para los construidos por *PERFORAGUAS Y MANTENIMIENTO*, la longitud de la tubería se puede despreciar ya que las pérdidas no superan el 5% del trabajo necesario que debe realizar la bomba (ver tabla 4) por su baja longitud y a las pequeñas distancias entre los pozos y los lugares de almacenamiento del agua, es importante que se conozcan dichos valores por que en el futuro pueden construirse pozos más profundos, con instalaciones más complejas ó incluso de muchísimo mayor longitud que los que se construyen actualmente .

**Tabla 4.** Relación de pérdidas asociadas a la tubería y a los accesorios para cada pozo.

	POZO 1	POZO 2	POZO 3	POZO 4	POZO 5
<b>Longitud [m]</b>	63	52	23	41	18
<b>Diámetro de Flujo [m]</b>	2"	2"	1"	1.1/4"	2"
<b>TIPOS Y NÚMERO DE ACCESORIOS</b>					
<b>CODOS DE 90<sup>o</sup></b>	4	3	8	3	4
<b>CODOS DE 45<sup>o</sup></b>	0	2	0	0	0
<b>CODOS DE 22<sup>o</sup></b>	0	0	0	6	0
<b>CONTROLADOR DE CAUDAL</b>	1	1	1	1	1

CÁLCULOS DEL POZO					
<b>Pérdidas en la Tubería [m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>]</b>	2,87	2,24	45,15	22,61	2,08
<b>Pérdidas por Accesorios [m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>]</b>	0,23	0,22	5,83	1,57	0,23

En este trabajo los cálculos de pérdidas energéticas se realizaron sin tener en cuenta la geometría del terreno con el fin de tener una aproximación rápida y confiable de la caída de presión en los trayectos de tubería y por sus accesorios. Sin embargo si se tuvo en cuenta el diámetro de la tubería necesario para transportar el líquido desde el fondo del pozo hasta su lugar de almacenamiento .

Teniendo en cuenta los diferentes diámetros de tubería se evidencia un aumento significativo de las caídas de presión según el tamaño de diámetro de tubería que se emplea para la construcción del sistema de conducción de agua, por ejemplo, para el caso de los pozos en los que se usó tubería de 2" con respecto a los que se usó tubería de 1" y 1 1/4" se registraron cambios de pérdidas asociadas al flujo a través de la tubería de alrededor de 22 y 11 veces mayores , respectivamente.

Para el caso de los accesorios instalados en cada una de las configuraciones de conducción de líquido, se presentaron valores mayores en las que se usó tubería de menor diámetro al que regularmente se instala que es de 2". De hecho, la caída de presión no sólo depende del diámetro, también depende el número de accesorios presentes en el recorrido , siendo así una combinación de las dos variables.

### 5.3 Caudal y velocidad

El caudal fue definido para todos los pozos en 2 m<sup>3</sup>/h. Este valor se tomó teniendo cuenta que para la construcción de acueductos se supone un gasto de 250 L/día por persona en cada hogar [9]. Como los pozos construidos son para uso doméstico se supone que el consumo de líquido no será importante. Igualmente,

se valoró que en los lugares donde se perforó se encontraban tanques de almacenamiento de 1 m<sup>3</sup> los cuales pueden ser llenados completamente en 30 minutos en caso de agotarse el recurso en dichos tanques, lo que implica almacenamiento rápido.

**Tabla 5.** Resultados de caudal y velocidad para los pozos descritos.

	POZO 1	POZO 2	POZO 3	POZO 4	POZO 5
<b>CAUDAL [m<sup>3</sup>/h]</b>	2	2	2	2	2
<b>VELOCIDAD [m/s]</b>	0,274	0,274	1,096	0,702	0,274

Para el diseño de la potencia de la bomba y teniendo en cuenta el flujo de diseño, se determinó el área transversal de la tubería que garantice velocidades bajas (ver tabla 4). Esto con el fin de minimizar las pérdidas energéticas asociadas al flujo y evitar utilizar bombas demasiado potentes sino más bien, un diseño óptimo que genere buenos resultados de flujo sin un consumo innecesario de energía.

#### **5.4 Potencia de la Bomba**

Se podría decir que es el dato más valioso que se debe obtener del análisis energético que se le realiza a cada pozo, pues de este depende que haya o no buen flujo de agua, y en lo que respecta a este proyecto, se pueda observar buena calidad del líquido.

Además es necesario tener en cuenta las condiciones geológicas de esta importante zona del país, ya que por tener un gran recurso hídrico, se encuentra en terrenos de arenas no consolidadas [15] lo que permite que se desprendan muy fácilmente detritos microscópicos que se filtran a través de los filtros naturales y artificiales instalados en cada pozo generando así turbidez en el agua que se produce desde los mismos.

La tabla 5 presenta la potencia de las bombas antes y después de realizado este trabajo. Se observa que las bombas antes instaladas estaban sobredimensionadas en potencia para los pozos construidos, debido a que no se hizo un estudio concienzudo de las características de las bombas disponibles en el mercado, por ejemplo, para el pozo más profundo se necesita una bomba de por lo menos 1 hp, muy inferior a la anteriormente instalada de 3 hp, esto se puede lograr con la 4SR13G, exceptuando al pozo número 3 que tenía instalada una bomba con estas características.

**Tabla 6.** Potencia de bomba antes y después del diseño realizado en este estudio .

	<b>POZO 1</b>	<b>POZO 2</b>	<b>POZO 3</b>	<b>POZO 4</b>	<b>POZO 5</b>
<b>POTENCIA instalada [HP]</b>	2	2	1	1,5	3
<b>POTENCIA de la bomba recomendada [HP]</b>	0,794	0,823	0,771	0,839	1,042

Finalmente, se logró realizar el cambio de las bombas en los sitios en los que se encontraban instaladas de mayor potencia y se pudo revisar los resultados obtenidos después de la puesta en marcha de las mismas, muy acordes con los que se proyectó obtener después de realizar este trabajo para donde se buscó la necesidad energética para la producción de los pozos perforados.

Después de demostrar la fiabilidad del método desarrollado en este trabajo, *PERFORAGUAS Y MANTENIMIENTO* empezó a emplearlo para todos los pozos que se han venido construyendo últimamente, y logrando grandes resultados no sólo de satisfacción a los clientes sino también económicos. De hecho desde su implementación la empresa empezó a ahorrarse alrededor de un millón de pesos en gastos de equipos para la extracción de líquido desde los pozos, sin perjudicar la eficiencia de los mismos.

La tabla 6 muestra la gran diferencia que existe entre los precios de las bombas dependiendo de su potencia y referencia, se observa que existe un ahorro sustancial cuando se utiliza un equipo que cumpla con los requerimientos mínimos energéticos.

**Tabla 7.** Precios comerciales de las bombas sumergibles según su potencia.

<b>POTENCIA [hp]</b>	<b>1/2</b>	<b>1</b>	<b>1,5</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>4SR13G</b>	1.150.000	1.340.000	1.720.000	2.380.000	-
<b>4SR75G</b>	-	-	-	2.109.000	2.590.000

El ahorro económico es evidente; entre las bombas de 1 y 2 hp existe una diferencia de al rededor de un millón de pesos, por lo tanto se demuestra que se puede generar buenas condiciones de salida de líquido desde los pozos a un menor costo.

## 6. CONCLUSIONES

En los pozos en los que se logró cambiar la bomba, y en los que se construyeron en una etapa posterior a la cual se diseñó el sistema de cálculo desarrollado en este trabajo para determinar los valores de energía mínima requerida de la bomba en la producción de agua desde los pozos, se pudo constatar que la potencia de la bomba era una parte importante dentro de la problemática presentada de turbidez en el agua.

Viendo los resultados obtenidos después de la instalación de la bomba nueva y la puesta en marcha de esta, posterior verificación de resultados, se demostró que el sistema de cálculo utilizado para conocer los requerimientos energéticos del pozo, es una fuente confiable y brinda una aproximación veraz para el diseño final del pozo.

Por lo tanto, al cambiar la potencia de la bomba por la encontrada tras los resultados de los cálculos energéticos, se logró demostrar cambios visibles en la calidad del agua (turbidez) que generan los pozos. Además los costos disminuyeron considerablemente al encontrar un ahorro hasta del 100% en los costos de la bomba, este no sólo es benéfico para la empresa sino que también para los usuarios que encuentran mejores precios en la construcción de pozos de agua, los cuales tendrán un mejor funcionamiento limitando el alto riesgo de que este se seque y cause daños irreversibles al pozo ó a la bomba y en general al sistema de distribución del líquido .

## 7. RECOMENDACIONES

- Aplicar el método de cálculo descrito en el desarrollo experimental para calcular la potencia necesaria de la bomba, para obtener mejores resultados en la producción del agua de los pozos.
- Es mejor utilizar tubería para el flujo del agua de 2", ya que con esta se puede evitar pérdidas asociadas al flujo y a los accesorios.
- Si bien la profundidad es un factor importante en el cálculo de la energía necesaria para llevar el agua desde el pozo hasta el tanque de almacenamiento, no significa que la potencia de la bomba presente un salto tan significativo por ser un pozo más profundo, por lo que es mejor ahorrar en costos y calcular la potencia óptima para evitar comprar una bomba más costosa e innecesaria.
- Instalar una bomba demasiado potente no necesariamente genera mejores resultados, puede generar más pérdidas que eficiencia, por lo tanto se hace necesario revisar las características de diseño de las bombas disponibles en el mercado que cumplan con los requerimientos necesarios para cada pozo .
- La bomba 4SR13G presenta mejores resultados, caudal adecuado, es menos costosa, es ideal para profundidades mayores y cuando se usó no presentó arrastre de sedimentos desde el fondo de los pozos, por lo tanto se recomienda usar esta en vez de la 4SR75G para este tipo de especificaciones.

## 8. BIBLIOGRAFIA

- [1]. Perforación Manual de Pozos Profundos de pequeño Diámetro. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD, SENA. Guía RAS – 007, Bogotá D.C., Colombia, 2007.
- [2]. Martínez Alfaro. P.E., Martínez Santos. P., Castaño. S., “El agua En Las Rocas”. En Fundamentos de Hidrogeología. Ediciones Mundi Prensa Libros S.A., España, 2005, p 73.
- [3]. CORCHO, R.F., DUQUE, J.I., “Agua Subterránea y Pozos”. En Acueductos Teoría y Diseño. Correa Restrepo, L. (Tercera Edición). Sello Editorial Universidad de Medellín, Colombia, 2005, p 549.
- [4]. “El Proyecto de Agua Potable: Técnica de Perforación”. EMAS, Eco-Management and Audit Scheme. 2010, Disponible: [http://www.emas-international.de/spanish/inhalte1\\_12.htm](http://www.emas-international.de/spanish/inhalte1_12.htm).
- [5]. Manual de Perforación de Pozos Tubulares para la Investigación y Captación de Agua Subterránea en el “Sistema Acuífero Guaraní”. UNEP, United Nations Environment Program. Uruguay, 2008.
- [6]. “Perforación a Percusión o Cable”. Virginia. [www.lasperforaciones.com](http://www.lasperforaciones.com) 2010, Disponible: <http://www.lasperforaciones.com/Tecnicas-y-Sistemas-de-Perforacion/Perforacion-a-percusion-o-cable-8/>
- [7]. “Perforación a Rotación”. Antonio Pérez Gómez. [www.lasperforaciones.com](http://www.lasperforaciones.com) 2010, Disponible:

<http://www.lasperforaciones.com/Tecnicas-y-Sistemas-de-Perforacion/Perforacion-a-rotacion-6/>

- [8]. Crane. “Teoría del Flujo de Fluidos en Tuberías”. En Flujo de Fluidos en Válvulas, Accesorios y Tuberías. Reza García C (Comp.). McGraw – Hill, 1989, p 1-1.
- [9]. Criterios de Diseño Para redes de Agua Potable Empleando Tubería de PVC. TUBOS FLEXIBLES, S.A DE C.V , Monterrey, México, 2006.
- [10]. BIRD. R.B., “Balances Macroscópicos en Sistemas Isotérmicos”. En Fenómenos de Transporte. Wiley S.A. Ed. U.S.A, 1987, P 7-1.
- [11]. “Nivel Freático y Aguas Freáticas”. Carlos Giorgi. [www.lasperforaciones.com](http://www.lasperforaciones.com) 2010, Disponible: <http://www.lasperforaciones.com/Control-Freatico/Nivel-freatico-y-aguas-freaticas-1/>
- [12]. Serway. R.A., “Sólidos y Fluidos”. En Física 5<sup>a</sup> Edición, Saunders College Publishing, U.S.A., 1985, p 256.
- [13]. “4SR75G”. Electrobombas Pedrollo. 2010, Disponible: <http://www.pedrollo.com.mx/Catalogo/4sr75g1.htm>
- [14]. “4SR13G”. Electrobombas Pedrollo. 2010, Disponible: <http://www.pedrollo.com.mx/Catalogo/4sr13g1.htm>
- [15]. VARGAS, N.O., Zonas Hidrogeológicas Homogéneas de Colombia. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería. Bogotá D.C., 2001, p 13.

- [16]. Norma Técnica para la Perforación de Pozos Profundos en La Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados. Administración Nacional de Acueducto y Alcantarillado, ANDA. Plan Hidro, El Salvador, 2009.
- [17]. ESPECIFICACIONES TECNICAS PERFORACION DE POZOS EN 22 MUNICIPIOS DE ESTELI, CHINANDEGA, LEON, MATAGALPA, BOACO, JINOTEGA Y RIVAS. FISE, Fondo de Inversión Social de Emergencia. Managua, Nicaragua, 2010.
- [18]. Ríos Sánchez. M., (2003, Septiembre). “Proyecto de exploración y Evaluación de aguas Subterráneas”. Presentado en: *El Agua Subterránea en Ingeominas*. [Tipo de medio electrónico]. Disponible en: <http://www.ucentral.edu.co/pregrado/escuelainge/hidricos/memorias/Presentaci%F3n%20Ingeominas.pdf>
- [19]. Programa de Exploración de Aguas Subterráneas. INGEOMINAS, Instituto Colombiano de Geología y Minería. Bogotá, Colombia, 2004.
- [20]. “4SR”. Electrobombas Pedrollo. 2010, Disponible: <http://www.pedrollo.com.mx/Catalogo/4sr1.htm>
- [21]. Palacios Ruiz. A., “Diseño del Acueducto de Una Urbanización”. En *Acueductos, Cloacas y Drenajes. Criterios para el Diseño Hidráulico de Instalaciones Sanitarias en Desarrollos Urbanos 2ª Edición*. Ávila Balucani E. (ed.). Universidad Católica Andrés Bello, Venezuela, 2008, p 2 9.

## 9. ANEXOS

**Anexo 1.** Ventajas y desventajas de las fuentes de abastecimiento de agua potable superficiales y subterráneas.

SUPERFICIALES		SUBTERRÁNEAS	
VENTAJAS	DESVENTAJAS	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Disponibilidad	Fácilmente contaminadas	Protección	Alto sulfuro de hidrógeno
Visibles	Calidad variable	Bajo color	Alta dureza
Limpiable	Alto color	Baja turbiedad	Relativa inaccesibilidad
Bajo fierro y manganeso	Alta turbiedad	Calidad constante	No limpiables
Bajo sulfuro de hidrógeno	Olor y color biológico	Baja corrosividad	
Baja dureza	Alta materia orgánica	Bajo contenido de materia orgánica	
Baja dureza	Alta formación potencial de trihalometanos	Baja formación potencial de trihalometanos	

**Fuente:** Tubos Flexibles [9].

**Anexo 2.** Ventajas y desventajas de los diferentes métodos de perforación en formaciones sedimentarias no consolidadas.

<b>Formaciones sedimentarias no consolidadas (Aluviones y sedimentos poco o no consolidados)</b>		
<b>Método</b>	<b>Ventajas / Desventajas</b>	<b>Riesgo</b>
Percusión a cable	Buena muestra, buena información de verificación del nivel del agua, proceso lento de perforación (1 a 2 metros/hora)	Alto/aprisionamiento de herramientas
Rotativo	c/circulación directa Muestra del padrón medio, rápida penetración (5 a 20 metros/hora)	Bajo
Rotativo con inyección de aire	Inadecuado	Alto
Rotativo con circulación reversa	Buena muestra y rápida penetración (5 a 20 metros/hora) manteniendo las condiciones de las paredes del pozo. Fluido a base de agua.	Bajo

**Fuente:** UNEP [5].

**Anexo 3.** Ventajas y desventajas de los diferentes métodos de perforación según el riesgo de formaciones sedimentarias consolidadas.

<b>Riesgo Formaciones Sedimentarias Consolidadas: Calcáreos, Siltitos y areniscas calcáreas</b>	
<b>Método</b>	<b>Ventajas / Desventajas</b>
Percusión a Cable	Buen rendimiento, buen control de la muestra y del nivel del agua, avance en el orden de 2 a 3 m/h.
Rotativo con aire, agua o circulación de fluido.	Buen rendimiento, buena penetración (6 a 10 m/h) siendo necesario controlar el fluido de perforación.
Martillo	Rápida penetración (12 a 20 m/h), produce pedazos de detritos y permite muestra de agua.

**Fuente:** UNEP [5].

**Anexo 4.** Ventajas y desventajas de los diferentes métodos de perforación en formaciones cristalinas.

<b>Formaciones Cristalinas Rocas ígneas y metamórficas</b>	
<b>Método</b>	<b>Ventajas/ Desventajas</b>
Perforación a cable Bajo	Rendimiento (0,4 a 0,7 m/h), con buena muestra y variación del nivel y de entradas de agua.
Rotativo con aire, agua o circulación de fluido.	Inadecuados debido al alto costo. Se justifica apenas para grandes profundidades y diámetros, con uso de brocas de dientes de tungsteno y con relación peso-área adecuado.
Martillo	Rápida penetración (6 a 12 m/h). Buen control de muestras y de entradas y volumen de agua potencial.

**Fuente:** UNEP [5].

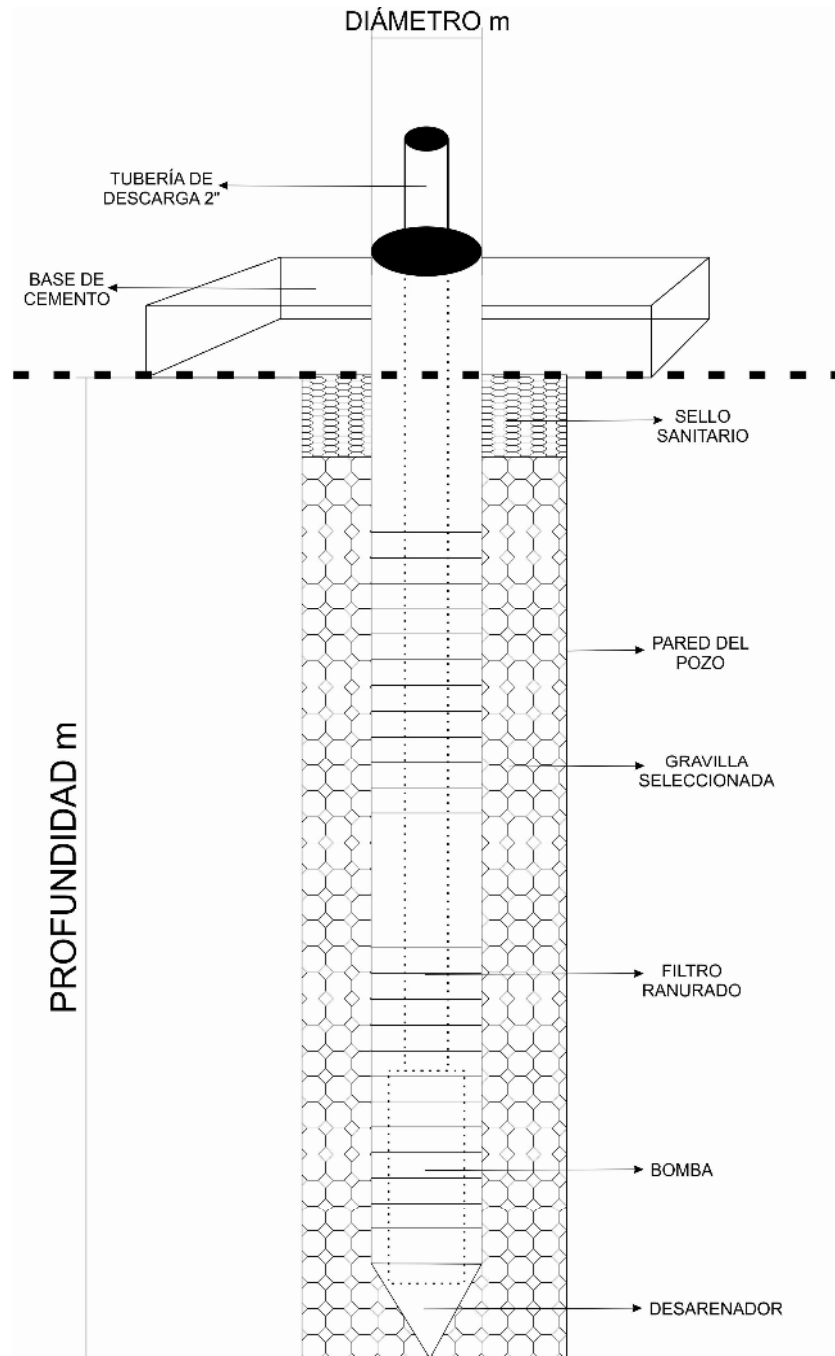
**Anexo 5.** Ventajas y desventajas del método de perforación a percusión por cable.

<b>Ventajas</b>	<b>Inconvenientes</b>
Mayores diámetros (1.100 mm) que permite mayor maniobrabilidad en posteriores actuaciones y la instalación de elementos de bombeo de mayor potencia y volumen	Requiere personal altamente cualificado
Perfecta Verticalidad	El avance es más lento aunque en perforaciones poco profundas es equiparable al de una máquina rotativa.
Profundidades de hasta 800 m	Es sensiblemente más lenta que los sistemas alternativos
Pueden realizar varias reducciones de diámetro, pueden trabajar en lugares remotos debido a la poca cantidad de medios que necesitan (gas-oil, agua, y otros materiales), en comparación con otros sistemas	En terrenos poco consolidados la necesidad de utilizar tuberías auxiliares de revestimiento limita las profundidades/diámetros de perforación
Produce muestras de gran calidad que permiten evaluar con precisión la naturaleza de los terrenos atravesados	
Puede perforar cualquier tipo de terreno	
No presenta problemas en terrenos muy fisurados donde otros sistemas resultan inoperativos.	
No emplea lodos por lo que se evitan	

riesgos de colmatación de las formaciones acuíferas	
Costes relativamente bajos de maquinaria, operacional y de mano de obra	
Pueden instalarse los equipos en áreas de accesibilidad compleja y trabajar en condiciones climáticas extremas.	

**Fuente:** UNEP [5].

Anexo 6. Diagrama de Construcción final del pozo con todos sus componentes.



Fuente: El autor.

**Anexo 7.** Bomba sumergible tipo lapicero.



**Fuente:** Pedrollo [20].

## Anexo 8. Características generales de las bombas sumergibles

SON RECOMENDADAS PARA BOMBLEAR AGUA. GRACIAS A SU ELEVADO RENDIMIENTO Y FIABILIDAD SON ADECUADAS PARA EL EMPLEO DOMÉSTICO, CIVIL E INDUSTRIAL, PARA LA DISTRIBUCIÓN AUTOMÁTICA DEL AGUA ACOPLADAS A EQUIPOS HIDRONEUMÁTICOS, PARA RIEGOS DE HUERTOS Y JARDINES, PARA INSTALACIONES DE LAVADO, PARA AUMENTAR LA PRESIÓN Y PARA SERVICIO CONTRA LOS INCENDIOS. Las bombas 4SR pueden instalarse dentro de pozos de diámetro no inferior a 4". La electrobomba se baja dentro del pozo mediante la tubería de impulsión, hasta una profundidad que garantice la inmersión completa (min. 2 pies y, por lo menos, a 3 pies del fondo del pozo) incluso durante el funcionamiento, el cual puede hacer bajar el nivel del líquido en el interior del pozo. La electrobomba puede instalarse tanto en posición vertical como horizontal; cuando se instala en un pozo en posición vertical, es aconsejable fijarla mediante un cable de acero o nylon, el cual tiene que conectarse a los orificios que se hallan en el cuerpo de impulsión.

- Boca de impulsión roscada 1 1/4" NPT (4SR7G, 4SR10G, 4SR13G, 4SR25G) 2"NPT (4SR33G, 4SR45G, 4SR60G, 4SR75G, 4SR90G). Boca de impulsión y soporte motor en acero inoxidable AISI 304. Ver notas en las tablas de repuestos.
- **VÁLVULA DE RETENCIÓN** en acero inoxidable **AISI 304** resistente, permite descargar el peso de la columna de agua sin esforzar los rodetes y difusores, garantizando el funcionamiento durante largo tiempo.
- **RODETES** en tecnopolímero **Lexan** "General Electric".
- **DIFUSORES** en tecnopolímero **Noryl** GFN2 "General Electric".
- **CAJA PORTA DIFUSORES** en acero inoxidable **AISI 304**.
- **CAMISA BOMBA** en acero inoxidable **AISI 304**.
- **EJE BOMBA** en acero inoxidable **AISI 304**.
- **SOPORTE MOTOR** en acero inoxidable dimensionado según las normas NEMA.
- **ACOPLAMIENTO DE ARRASTRE** en acero inoxidable **AISI 316L**.
- **TORNILLOS** en acero inoxidable **AISI 304**.
- **FILTRO** en acero inoxidable **AISI 304**.
- **PROTECTOR DEL CABLE** en acero inoxidable **AISI 304**.
- **MOTOR ELÉCTRICO** sumergible de 4" "Franklin Electric" en baño de agua o "Pedrollo" en baño de aceite rebobinable.
- **PROTECCIÓN** IP 58 para motores "Franklin Electric"; IP 68 para motores "Pedrollo".
- **CABLE DE ALIMENTACIÓN** del tipo sumergible. Suministro de serie 5 pies.

**Anexo 9.** Tabla de valores aproximados de coeficientes de pérdidas en accesorios para tuberías de PVC.

<b>PIEZA</b>	$e_v$
Ampliación Gradual	0,30
Boquillas	2,75
Compuerta, Abierta	1,00
Controlador de Caudal	2,50
Codo de 90 <sup>0</sup>	0,90
Codo de 45 <sup>0</sup>	0,40
Codo de 22 <sup>0</sup>	0,20
Rejilla	0,75
Curva de 90 <sup>0</sup>	0,40
Curva de 45 <sup>0</sup>	0,20
Curva de 22 <sup>0</sup>	0,10
Entrada Redondeada	0,23
Entrada Normal en Tubo	0,50
Entrada de Borda	1,00
Entrada Abocinada	0,04
Medidor Venturi	2,50
Reducción Gradual	0,15
Válvula de Compuerta, Abierta	0,20
Válvula de Ángulo, Abierta	5,00
Válvula Tipo globo, Abierta	10,00
Salida Tubo	1,00
Te, pasaje Directo	0,60
Te, Salida de Lado	1,30
Te, Salida Bilateral	1,80
Válvula de pie	1,75

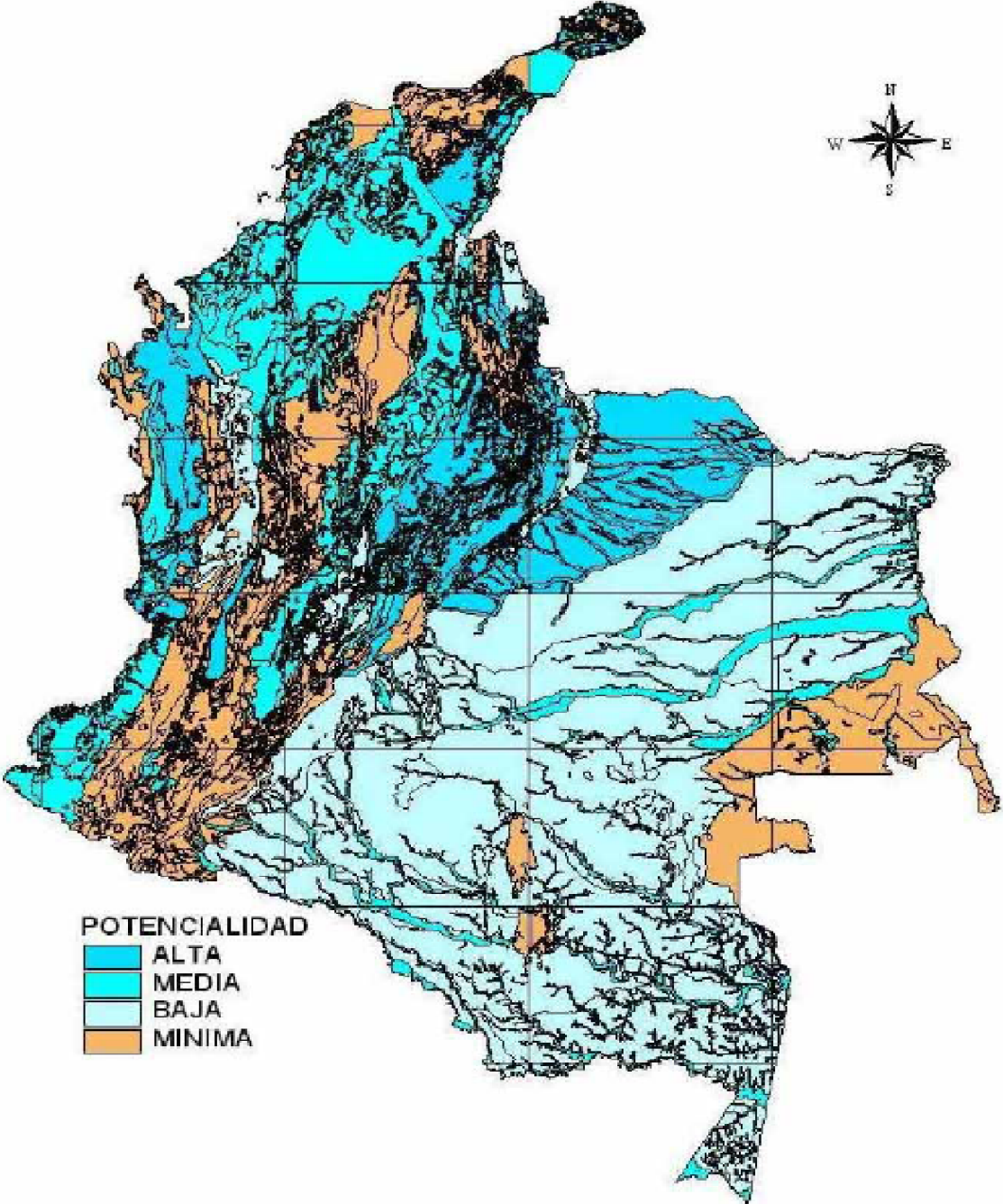
Válvula de Retención (check)	2,50
Ampliación Brusca	$(1 - (D1/D2)^2)^2$
Reducción Brusca $(D2/D1 \leq 0,76)$	$0,42 (1 - D2/D1)^2$
Reducción Brusca $(D2/D1 > 0,76)$	$(1 - (D2/D1)^2)^2$

Nota: para el cálculo de pérdidas en ampliaciones y reducciones bruscas se considera a Q y a -d en el tramo de menor diámetro, por otro lado la dirección del flujo va de D1 a D2.

**Fuente:** Tubos Flexibles [9].

**Anexo 10.** Capacidad de producción de los principales acuíferos en el territorio Colombiano.

CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN DE LOS PRINCIPALES ACUÍFEROS EN EL TERRITORIO COLOMBIANO



Fuente: INGEOMINAS [18]