

Universidad de los Andes  
Facultad De Ingeniería  
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental



**TESIS DE ESPECIALIZACIÓN  
INGENIERÍA DE SISTEMAS HÍDRICOS URBANOS**

**EVACUACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS POR BOMBEO EN LA  
CONSTRUCCION DE TÚNELES.**

**CASO HIDROELÉCTRICA AMOYÁ.**

Preparado por:  
Ing. Ximena Portilla Yépez

Asesor:  
Ing. Jaime Loboguerrero

**Informe Final Tesis**

**Bogotá, 17 de Febrero de 2012**

## TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>6</b>
<b>1 ANTECEDENTES Y OBJETIVOS.....</b>	<b>7</b>
1.1 ANTECEDENTES .....	7
1.2 OBJETIVOS .....	7
1.2.1 <i>Objetivos Generales</i> .....	7
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i> .....	7
<b>2 ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>8</b>
2.1 ASPECTOS HIDROGEOLOGÍCOS .....	8
2.1.1 <i>Acuíferos</i> .....	9
2.1.2 <i>Funciones de un Acuífero</i> .....	9
2.1.3 <i>Afluencia de aguas en los Túneles: Régimen hidrológico subterráneo</i> .....	9
2.1.4 <i>Afluencia variable del agua, según las circunstancias</i> .....	10
2.2 DISEÑO DE UNA ESTACIÓN DE BOMBEO. ....	13
2.2.1 <i>Clasificación general de las bombas</i> .....	13
2.2.2 <i>Bombas de desplazamiento positivo</i> .....	13
2.2.3 <i>Bombas Rotodinámicas</i> .....	14
2.3 CURVAS Y PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE LAS BOMBAS.....	15
2.3.1 <i>Potencia y rendimiento</i> .....	15
2.4 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	16
2.4.1 <i>Localización: El sector donde se llevará a cabo el estudio es en el municipio de Chaparral, al sur del Tolima.</i> 16	
2.5 PROCESO DE EXCAVACIÓN.....	20
<b>3 METODOLOGÍA.....</b>	<b>22</b>
3.1 DRENAJE DEL AGUA EN EL PROCESO DE CONSTRUCCIÓN .....	22
3.2 CAUDAL A BOMBEAR.....	23
3.3 PARÁMETROS DE DISEÑO: ANÁLISIS DE LAS INSTALACIONES EXISTENTES.....	24
3.4 MODOS OPERANDI O FRECUENCIA DE BOMBEO .....	24
3.5 TIPOS DE BOMBAS A UTILIZAR. ....	25
<b>4 DATOS Y ANÁLISIS DE DATOS .....</b>	<b>27</b>
4.1 CÁLCULOS DE LA ALTURA DINÁMICA TOTAL. ....	27
4.2 PÉRDIDAS POR FRICCIÓN.....	28
4.3 FACTOR DE FRICCIÓN DE DARCY .....	28
4.4 NÚMERO DE REYNOLDS .....	29
4.5 CÁLCULO DE VELOCIDAD .....	29
4.6 CURVA CARACTERÍSTICA DE LA BOMBA Y DETERMINACIÓN DE LA CURVA DEL SISTEMA .....	30
4.7 CONDICIONES DE TRABAJO:.....	31
4.8 PRINCIPALES PROBLEMAS ASOCIADOS AL SISTEMA DE BOMBEO EN TÚNELES. ....	35
<b>5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>40</b>
<b>6 BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>42</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. LOCALIZACIÓN GENERAL DEL PROYECTO.	16
FIGURA 2. CAPTACIÓN REJA DE FONDO PRESA VERTEDERO.	17
FIGURA 3. DESARENADOR Y TÚNEL DE CONDUCCIÓN	17
FIGURA 4. SECCIÓN DE TÚNEL	17
FIGURA 5. TÚNEL DE ACCESO A CASA DE MÁQUINAS.	18
FIGURA 6. CENTRAL DE MÁQUINAS	18
FIGURA 7. CONSTRUCCIONES INTERNAS DE LA CASA DE MÁQUINAS	19
FIGURA 8. BIFURCADORES	19
FIGURA 9. EQUIPOS DE PERFORACIÓN DE DOS BRAZOS, CONSTRUCCIÓN DE LA CASA DE MAQUINAS.	21
FIGURA 10. AGUA DE INFILTRACIÓN EN LOS TÚNELES DE AMOYÁ.	22
FIGURA 11. FRENTES DE PERFORACIÓN AGUAS ABAJO EN CONTRA PENDIENTE	23
FIGURA 12. CAUDAL A BOMBEAR DEPENDIENDO DE LA LONGITUD DEL TERRENO.	24
FIGURA 13. BOMBA SUMERGIBLE MAJOR	25
FIGURA 14. BOMBA SUMERGIBLE MASTER	26
FIGURA 15. BOMBA SUMERGIBLE MATADOR	26
FIGURA 16. CÁLCULOS DE LA ALTURA DINÁMICA TOTAL	27
FIGURA 17. EJEMPLO DE CURVA CARACTERÍSTICA DEL SISTEMA SOBRE A LA CURVA DE LA BOMBA Y EL PUNTO ÓPTIMO DE OPERACIÓN.	30
FIGURA 18. DAÑOS ELÉCTRICOS	36
FIGURA 19. ESTRANGULAMIENTO EN LA TUBERÍA DE IMPULSIÓN.	36
FIGURA 20. GOLPES A LA BOMBA DEL FRONTÓN DEL TÚNEL.	37
FIGURA 21. BOMBAS TRABAJANDO ENTERRADAS EN LODO ESPESO.	38
FIGURA 22. BOMBAS ENCENDIDAS SIN AGUA SUFICIENTE PARA BOMBEAR	39
FIGURA 23. ROCA ENCONTRADA EN UNA TUBERÍA DESPUÉS DE HABER AVANZADO APROXIMADAMENTE 100 M	39

---

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 .CARACTERÍSTICAS DEL FLUIDO Y DE LA BOMBA.	31
TABLA 2. LONGITUD DE LOS TRAMOS DE BOMBEO, CAUDAL ASIGNADO, DIÁMETRO DE TUBERÍAS.	31
TABLA 3. CÁLCULOS DE LA ALTURA DINÁMICA TOTAL.	32
TABLA 4. CURVA DEL SISTEMA EN CADA POZO DE BOMBEO (1-5 POZO)	33
TABLA 5. CURVA DEL SISTEMA EN CADA POZO DE BOMBEO (6 POZO AL FRONTÓN)	34
TABLA 6. POTENCIA DE LAS BOMBAS	34

---

## ÍNDICE DE ECUACIONES

ECUACIÓN 1. POTENCIA CONSUMIDA.	15
ECUACIÓN 2. CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA.	28
ECUACIÓN 3. ALTURA DINÁMICA TOTAL.	28
ECUACIÓN 4. ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH	28
ECUACIÓN 5. ECUACIÓN COLEBROOK- WHITE	28
ECUACIÓN 6. NÚMERO DE REYNOLDS	29
ECUACIÓN 7. VISCOSIDAD CINEMÁTICA DEL FLUIDO	29
ECUACIÓN 8. ECUACIÓN DE CAUDAL RESPETO A LA VELOCIDAD.	29

---

## ***INTRODUCCIÓN***

---

El Proyecto del río Amoyá, localizado en el municipio colombiano de Chaparral, es una central hidroeléctrica con una capacidad instalada de 80 MW y una generación anual de energía de 546 GWh, la cual, no requiere de almacenamiento para la generación de energía, conduce el agua a través de túneles.

En el proceso constructivo se realizan perforaciones aguas abajo, en contrapendiente, es allí donde se presentan problemas asociados con el agua de infiltración, la cual es necesario bombear para que no se acumule en el frontón e impida el avance.

No se puede garantizar que cantidad de agua se va a drenar y en que momento de la perforación va a surgir por tanto es necesario construir un sistema de bombeo para atender emergencias, sistemas rápidos, de fácil encendido, que genere las mínimas obras de infraestructura para trabajar, es decir, tratar de lograr que no se inunde el frente.

En el proceso de excavación se presentan fallas eléctricas, mecánicas y accidentes que deterioran las bombas, por ello es muy importante hacer una buena selección de los equipos, contar con sistemas de emergencia eléctricos y bombas de reserva, mantenimientos preventivos continuos con el fin de lograr que los equipos trabajen a las eficiencias esperadas.

La presente tesis muestra el trabajo que se desarrolló en la construcción de la hidroeléctrica del río Amoyá con el sistema de bombeo del agua subterránea infiltrada en el proceso de excavación; se presentan los principales inconvenientes en el montaje y construcción del tramo de mayor pendiente.

Agradecimientos al ingeniero Jaime Lobo Guerrero por su orientación en el desarrollo de la tesis, al Consorcio Hidroeléctrica Amoyá por las experiencias adquiridas en el tiempo de ejecución y a la universidad de los andes por difundir el conocimiento.

.

---

## **1 ANTECEDENTES Y OBJETIVOS**

---

### **1.1 ANTECEDENTES**

En la construcción de la Hidro-eléctrica Amoyá localizada en el municipio de Chaparral, Tolima, se aprovecha el río Amoyá para la generación de energía, mediante una obra a filo de agua. Este tipo de obra no requiere un embalse de consideración por lo cual es considerada como un sistema de energía limpia por su bajo impacto sobre el ambiente. El agua se conduce a través de un túnel de carga de 8.700 metros hasta la casa de máquinas. Este túnel posee una sección excavada en herradura y solera plana. En la excavación se construyeron: dos ventanas de acceso de 685 y 701 metros cada una, el túnel de acceso a la casa de maquinas de 874 m, tres galerías internas y el túnel de descarga el cual tiene 2.894 m de longitud donde el agua es regresada al río. Durante todo el proceso de construcción se requiere drenar el agua subterránea que aflora. Para el efecto se construyeron nichos de bombeo en donde la excavación fue realizada en contrapendiente. Adicionalmente para realizar la excavación se utilizó maquinaria de perforación pesada la cual necesita agua limpia impulsada por bombas de alta presión.

### **1.2 OBJETIVOS**

#### **1.2.1 *Objetivos Generales***

Desarrollar una estrategia para el diseño óptimo del sistema de bombeo en un túnel durante su construcción.

Aplicar esta estrategia a la construcción de la hidroeléctrica del Río Amoyá en Chaparral, Tolima.

#### **1.2.2 *Objetivos Específicos***

- Analizar las instalaciones existentes
- Prediseñar con base en la topografía, los sitios para las estaciones y estimar los caudales previstos.
- Establecer el modus operandi y confiabilidad asociada.
- Estimar las curvas de los sistemas de bombeo, puntos óptimos de operación, potencia requerida por cada bomba, selección del diámetro adecuado de tubería por cada frente de perforación.
- Seleccionar las bombas requeridas a lo largo de la excavación que cumplan con las necesidades del equipo de perforación.
- Analizar el desgaste de los equipos de bombeo, fallas y problemas técnicos en el proceso de excavación.
- Calcular el volumen mínimo requerido para la estación de bombeo por cada frente de perforación.

---

## 2 ESTADO DEL ARTE

---

### 2.1 Aspectos Hidrogeológicos

Según el ciclo hidrológico, hay una porción del agua que se infiltra en la tierra y puede llegar a ocupar los poros del terreno, tanto en la zona de aireación, en donde aún existe percolación por coexistencia con poros ocupados por aire, como, posteriormente, en la zona de saturación, donde ya se habla del agua subterránea como tal.

Entonces se encuentra que no existe un único tipo de agua subsuperficial sino que, distribuidos en dos zonas, zona saturada y zona no saturada, se encuentran distintos tipos que obedecen a las fuerzas de capilaridad y gravedad de forma diferente.

Entiéndase como capilaridad como el fenómeno mediante el cual el agua asciende por medio de una red de conductos interconectados (que son la conexión de los intersticios del suelo y materiales granulares) gracias a la cohesión y adherencia a la superficie del suelo que la rodea.

El movimiento del agua, también se verá regido por la presencia o no de poros con aire. Mientras en la zona no saturada o de aireación, la dirección fundamental del movimiento es vertical (primero por infiltración y luego por percolación), en la zona de saturación la dirección del movimiento se vuelve horizontal.

Sin embargo, las reservas de la zona de saturación varían, pues el almacenamiento depende de la geología de la zona, la porosidad, la explotación del agua y el volumen de recarga mediante movimiento subterráneo, infiltración y percolación. Por tanto, no existe un estándar de cantidad de agua, tampoco de espesor de la zona de saturación.

La precipitación y subsiguiente infiltración, hacen posible la permanencia de niveles de la tabla de agua en la zona de saturación. La cantidad de precipitación y su continuidad darán una mayor posibilidad de remplazar el agua extraída mediante explotación, pero sin embargo, la geología del suelo y los patrones de transpiración y absorción radicular, influirá en el agua que percola de manera efectiva hasta la zona de saturación.<sup>1</sup>

---

1. Tomado de: Universidad de los Andes. Seminario: Técnicas de Análisis y Evaluación de Pruebas de Bombeo (1994). Bogotá, Colombia.

## **2.1.1 Acuíferos**

### **Definición**

Los acuíferos son estratos o formaciones geológicas que por sus características permiten el almacenamiento y la circulación del agua subterránea y que en gran medida son aprovechables y están disponibles en la zona de saturación.

Estos medios porosos capaces de transmitir y almacenar agua, sin embargo, pueden estar disponibles en la zona no saturada (vadosa) o en localizaciones de formación esporádica como acuíferos colgantes.

- **Tipos de Acuíferos**

#### **2.1.1.1 Acuíferos Confinados**

En un acuífero confinado el agua se encuentra a mayor presión que la atmosférica, dada por dos estratos impermeables que confinan la capa permeable de donde se extrae el agua.

#### **2.1.1.2 Acuíferos Semiconfinados**

En un acuífero semiconfinado el agua se encuentra bajo las mismas condiciones de presión que las de uno confinado, sin embargo, la capa permeable está confinada por un estrato impermeable y un estrato semipermeable.

#### **2.1.1.3 Acuífero Libre**

En un acuífero libre el agua está ocupando los poros por gravedad (se encuentra a presión atmosférica) y no tiene confinamiento alguno.<sup>1</sup>

## **2.1.2 Funciones de un Acuífero**

Las dos funciones principales de un acuífero son las de almacenamiento y conductividad. Los intersticios de las formaciones acuíferas albergan agua y al mismo tiempo la conducen, de manera en que el almacenamiento es temporal pues circula si no es explotada y puede ser finalmente descargada hacia cuerpos de agua.

## **2.1.3 Afluencia de aguas en los Túneles: Régimen hidrológico subterráneo.**

La corteza terrestre presenta a menudo terrenos más o menos porosos, como arenas, u otros de la naturaleza sólida, pero agrietados en todos los sentidos. No es de extrañar que, al construir un túnel, se encuentren aguas en mayor o menor abundancia. Por lo que concierne a su origen se puede distinguir las aguas superficiales y las aguas subterráneas. Las primeras tienen su origen cercano, debido a la lluvia, al derretimiento de las nieves o a las filtraciones de las corrientes de agua próximas a sitio donde pasan más fácilmente dichas aguas, pues por

ellas, atraviesan los mantos impermeables que separa á veces la extratificación de los terrenos, y sin su existencia no llegarían las aguas tan directamente al punto donde se reúnen.

1 Tomado de: Universidad de los Andes. Seminario: Técnicas de Análisis y Evaluación de Pruebas de Bombeo (1994). Bogotá, Colombia.

Las aguas Subterráneas tienen en definitiva el mismo origen descendente que las aguas superficiales, pero siguen un camino más largo para llegar desde la superficie hasta el sitio donde se las encuentra, pudiendo á veces venir de muy lejos en el sentido horizontal y hasta surgir de grandes profundidades en chorros de presión.

Independientemente de las filtraciones en la masa, á través de innumerables canales, los terrenos presentan a veces verdaderos ríos ó lagos subterráneos, siendo varios los túneles en que se han encontrado venas de agua de un caudal ó sección extraordinaria.

#### ***2.1.4 Afluencia variable del agua, según las circunstancias***

La cantidad de agua que tiende a fluir en los trabajos de túnel, como la que realmente fluye, es variable entre los más extensos límites. Así, por ejemplo se han presentado casos en los que la perforación ha tenido que abandonarse, pues salía más agua que la que pudiera drenarse con todas las bombas instaladas, otros muy profundos se han perforado sin encontrar una gota de agua.

En general, el examen de los terrenos, por lo que se refiere á su naturaleza y topografía y al estudio hidrológico de la zona, puede dar alguna idea respecto a la afluencia más ó menos grande de aguas que se encontrará en un túnel; pero no hay que tener gran confianza en los resultados de este estudio, que siempre es el más aleatorio ó dudoso de los que se deben hacer al emprender la construcción de un túnel. Hay que observar que las consecuencias que se deducen del estudio tienen un carácter más bien positivo que negativo; es decir, que como resultado de dicho estudio se prevé que se encontrarán aguas abundantes, es casi seguro que éstas no faltarán, pero si por el contrario las previsiones son de que no se encontrarán aguas, no es tan seguro de que estas no se presenten.

La afluencia de aguas puede, pues, ser debida á una de las tres causas siguientes:

1. Aguas provenientes de terrenos acuíferos superiores.
2. Aguas provenientes de fallas que se encuentren al ejecutar los trabajos.
3. Aguas de filtración.

*Aguas provenientes de acuíferos superiores.* Estos terrenos, aportan cantidades de agua extraordinarias. Pero si por su extensión es forzoso atravesarlos es preciso hacerlo con ciertas precauciones:

- No abrir los pozos para la ejecución del túnel, por lo menos en toda aquella parte en que se cruza esta clase de terrenos.
- Si la longitud del túnel es considerable y exige para su conclusión, en un tiempo razonable, se debe perforar por los dos frentes para construirlo con dos pendientes inversas para favorecer la natural salida de las aguas sin necesidad de tener que bombear.
- Si las condiciones del terreno imponen un trazado con una sola pendiente, atacar sólo el túnel por el lado de la pendiente favorable y si es necesario acabar con urgencia, también perforar por el otro frente, no debe hacerse sin la instalación de un sistema de bombeo y aun así podrá suceder que por muy reforzado que este el sistema proyectado, no baste para las atenciones de la realidad.
- Si el túnel se construirá en terrenos acuíferos, se debe instalar revestimientos impermeables en toda su longitud y base, para disminuir considerablemente la afluencia constante de agua y que ésta sea sólo importante en el avance, donde todavía no exista el revestimiento.

*Aguas provenientes de fallas que se encuentran con los trabajos.* Cuando la presencia del agua en el terreno es debida, a fallas que se encuentran al avanzar en los trabajos del túnel, las circunstancias son completamente diferentes.

La cantidad de agua que puede proporcionar el encuentro de una falla, es variable entre los más extensos límites. En el túnel de Argentera, cuando la galería de avance correspondiente a la boca de salida llegó al kilómetro K2+250, se encontró una falla, casi completamente vertical, que presentaba un caudal tan extraordinario, que el primer día pasó de 2.000 m<sup>3</sup> para descender en los demás a unos 1.500m, desapareciendo por completo a los 10 días.

Algunas veces, por el contrario, aunque se encuentren fallas, las aguas serán poco abundantes y disminuirán por completo al cabo de cierto tiempo.

Casi siempre la aproximación de la falla se reconoce por la mayor humedad de la roca, aun cuando aquella no reciba directamente filtraciones sensibles que provengan de la superficie.

*Aguas de filtración.* La afluencia de aguas provenientes de niveles acuíferos superiores ó de corrientes de aguas interiores que se encuentran con los trabajos, son circunstancias excepcionales y los puntos de afluencia de estas aguas son puntos singulares entre los que producen la alimentación del caudal de aguas de un túnel.

De ordinario el agua fluye por los diversos puntos de las paredes del túnel, esto es, por los miles de agujeros que ofrecen dichas paredes sin aparecer sobre ninguno en cantidad notable. Estas paredes pueden compararse a una superficie filtrante, que no proporciona ningún gasto apreciable para un elemento dado, pero en las que el gasto total es gran a causa de la extensión de la superficie.

Otro caso importante que mencionar en latino América fue durante la construcción del túnel común del proyecto hidroeléctrico Alfalfal donde ocurrió un caso de afloramiento de aguas

---

subterráneas, con un caudal de hasta 150 l/s y una presión inusualmente alta, de 100 bar. Esta anomalía en la presión constituye un caso inédito, por lo menos en lo que a Chile se refiere. Para superar este problema y poder continuar con la excavación normal de dicho túnel, el Grupo Consultor Alfalfa de Diseño definió una metodología especial de excavación y soporte por tramos, complementada con una inyección sistemática sobre la base de una lechada de cemento bentonita. La interpretación hidrológica considera la experiencia de una zona conductora de agua coincidente con uno de los sistemas preferenciales de discontinuidades, cuya abertura estaría favorecida por el estado tensional del macizo rocoso, permitiendo así la conexión con la superficie, 1.000 m más arriba.<sup>2</sup>

No es fácil calcular la cantidad de agua que se infiltra en un túnel. Hoy en día no existe un método generalizado que ayude en este cálculo. En la mayoría de los casos no se puede encontrar este valor y los problemas por el flujo de agua deben afrontarse durante la construcción, teniendo muchas veces que hacer instalaciones de evacuación de agua sustancialmente más grandes que las inicialmente previstas. Además, no ha sido fácil el desarrollo de dicha metodología porque las características de los terrenos varían sustancialmente de región a región, haciendo imposible la generalización del problema.

Factores como la permeabilidad y el fracturamiento del macizo son dependientes del tipo de material y de los esfuerzos presentes, e incluso entre tipos iguales de terreno pueden variar considerablemente.

Existe una metodología semi-empírica para el cálculo de infiltración de agua en túneles. Se trata de la desarrollada por el ingeniero Ronal E. Heuer, basada en las condiciones geológicas del macizo rocoso. El factor principal que se tiene en consideración es la permeabilidad del macizo, valor que implícitamente representa el grado de fracturamiento de la roca y la cantidad de discontinuidades presentes en el mismo. Este método fue desarrollado con información de túneles construidos en diferentes tipos de roca ubicados en diversas regiones de Estados Unidos.

- 
2. CASTRO, Santiago; CAVIEDES, Jaime; DELUCCHI, Hugo; GAUSEREIDE Leif-Rune; y VELASCO Lucio. Ocurrencia de aguas subterráneas a gran presión en el Túnel Común Alfalfa: características, solución adoptada e interpretación. En: Revista Geotécnica de Chile. Vol 20, Nº 1, (Julio, 1993), p. 85-97.

---

En el año 2000 se realizó un estudio concerniente a la infiltración de agua en túneles colombianos, en el cual se verificó el método Heuer para poder determinar si esta metodología es aceptable evaluando su aplicabilidad con base en casos reales con los registros geológicos y geotécnicos tomados durante la construcción. Se encontró que el método no es aplicable para calcular la infiltración de agua en los túneles colombianos.<sup>3</sup>

Por todo lo anteriormente expuesto es necesario contar con un sistema de bombeo que permita la evacuación de las aguas de infiltración y de perforación que aparezcan en los túneles para que haya menos interrupciones en el avance de la construcción.

## 2.2 Diseño de una estación de bombeo.

Diseñar una estación de bombeo, incluye la selección de equipos de bombeo más adecuados, la definición de todos los elementos y accesorios menores, eléctricos y el dimensionamiento de la obra civil que los contendrá.

Por lo anterior antes de comenzar con las labores de cálculo y definición es fundamental fijar los criterios de diseño;

### 2.2.1 Clasificación general de las bombas

Una bomba es un máquina que transforma energía mecánica en energía hidráulica, evaluada por el producto del caudal a presión. Es decir su finalidad básica es transmitir un caudal dado una presión determinada, y esto lo puede llevar a cabo de varias maneras. Esta forma de transmitir la energía al fluido, constituirá la primera clasificación de las bombas entre las bombas volumétricas y bombas rotodinámicas.

### 2.2.2 Bombas de desplazamiento positivo

*Principios de funcionamiento:* En las bombas volumétricas, la máquina le transmite la presión al fluido mediante un cambio de volumen en el reducto donde éste se halla situado.

*Clasificación:* Depende básicamente de tipo de movimiento del elemento móvil.

1. **Reciprocantes:** En las cuales el movimiento que produce el cambio de volumen que provoca el aumento de presión en el fluido es alternativo o de vaivén.
2. **Rotativas:** En las cuales dicho cambio de volumen, es consecuencia de un movimiento rotativo.

- 
3. CASTAÑO, Juliana. Infiltración de Agua en Túneles Colombianos. Santa Fé De Bogotá, 2000. Proyecto de Grado. Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental.

### *Ventajas:*

- Se puede alcanzar presiones tan altas como aguanten los materiales que las constituyen.
- Requerimientos de transmisión de la energía muy elevados, superiores al 90%.
- Autoaspirantes, no necesitan ser cebadas.
- Altas eficiencias.

### *Desventajas:*

- Son considerablemente más costosas y requieren más mantenimiento que las centrifugas.
- Son más delicadas y con mayor incidencia de fallos.
- Menor potencia específica, son más pesadas y voluminosas que las centrífugas.
- Solo para caudales muy limitados.
- Al tratarse de movimiento no continuo (alternativas) las piezas en movimiento producen fuertes inercias que transmiten esfuerzos considerables al resto del equipo y a los anclajes. Por ello se limita el caudal que puede mover.
- Si falla alguna válvula de seguridad, puede reventar el sistema por sobrepresión.

Campos de aplicación fundamental son los trabajos especiales en los que se requieren muy fuertes presiones y caudales limitados o fluidos viscosos o densos (fangos, aceites, hormigón) como bombas dosificadoras.

## **2.2.3 Bombas Rotodinámicas**

*Principios de funcionamiento:* La bomba le transmite la presión al fluido mediante cambios de velocidad y de dirección en las partículas del fluido, no hay cambios volumétricos de ningún tipo. Por lo tanto la energía se transmite al fluido mediante un elemento móvil denominado impulsor o hélice, siempre rotativo.

*Clasificación:* De acuerdo al tipo de impulsor o forma en que se transmite la energía. A la vez se clasifican:

- Bombas radiales:** Estas bombas transmiten la energía al fluido en forma de velocidad y presión, mediante la fuerza centrífuga, este tipo de bombas de rodete es adecuado para presiones medio altas (5 150 mca) y caudales moderados.
- Bombas axiales:** En estas bombas la energía no se transmite mediante un cambio de dirección de las partículas del fluido, sino mediante un cambio de velocidad como consecuencia del empuje físico que los álabes originan sobre la misma, es decir mediante una fuera superficial. Este tipo de impulsor o hélice es adecuado para presiones bajas (0,5 a 10 mca) y grandes caudales.
- Bombas semiaxiales:** En estas bombas la energía se transmite al fluido por el cambio de velocidad y de dirección de las partículas.
- Bombas en funcionamiento en seco:** Son bombas en las que todas sus partes exteriores, tanto voluta como motor se encuentran fuera del líquido.

- e. **Bombas sumergibles:** Bombas en las que todos o parte de sus componentes principalmente voluta y motor se encuentran sumergidos. No requieren cebado y su arranque es muy sencillo.
- f. **Bombas monoetapas:** Bombas con un solo rodete o impulsor, sencillas, robustas y económicas, tienen limitaciones de presión y requieren mayor espacio.
- g. **Bombas multietapas:** Bombas con varios impulsores conectados en serie, permiten alcanzar presiones mayores, requieren mayor mantenimiento y son más costosas. Son utilizadas en bombeos de alta presión, en bombeos con poco espacio.

## 2.3 Curvas y parámetros característicos de las bombas.

### 2.3.1 Potencia y rendimiento.

Una bomba está constituida por un motor eléctrico, una parte mecánica y una parte hidráulica. El motor eléctrico debe tener la capacidad suficiente para satisfacer la máxima demanda de potencia que le exija el impulsor, más las posibles pérdidas internas.

La potencia consumida en el eje del motor ( $P_{eje}$ ) es siempre menor que la potencia consumida por la red ( $P_{in}$ ). Esto se debe a las pérdidas que se originan en el interior del motor (en el bobinado de cobre y en el núcleo ferramagnético), en los rodamientos, cierres mecánicos y demás componentes mecánicos.

$$P_{eje}(W) = P_{in} - P_{per}$$

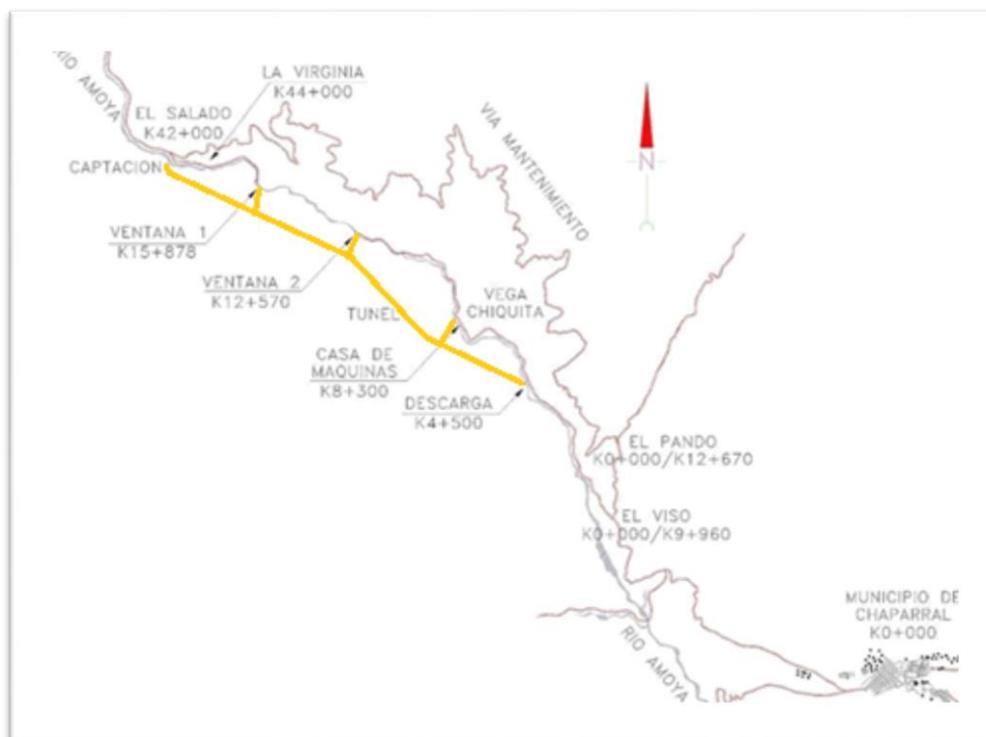
**Ecuación 2.** Potencia consumida.

Por lo tanto, conociendo la intensidad consumida por el motor en amperios, la tensión de la red en voltios y el factor de potencia (coseno de  $j$ ), se puede obtener la potencia consumida por el grupo motor- bomba de la red.

## 2.4 Descripción de la zona de estudio

A continuación se describen las principales características de la zona de estudio que se tienen en cuenta en el desarrollo del proyecto.

**2.4.1 Localización:** *El sector donde se llevará a cabo el estudio es en el municipio de Chaparral, al sur del Tolima.*



**Figura 1.** Localización general del proyecto.

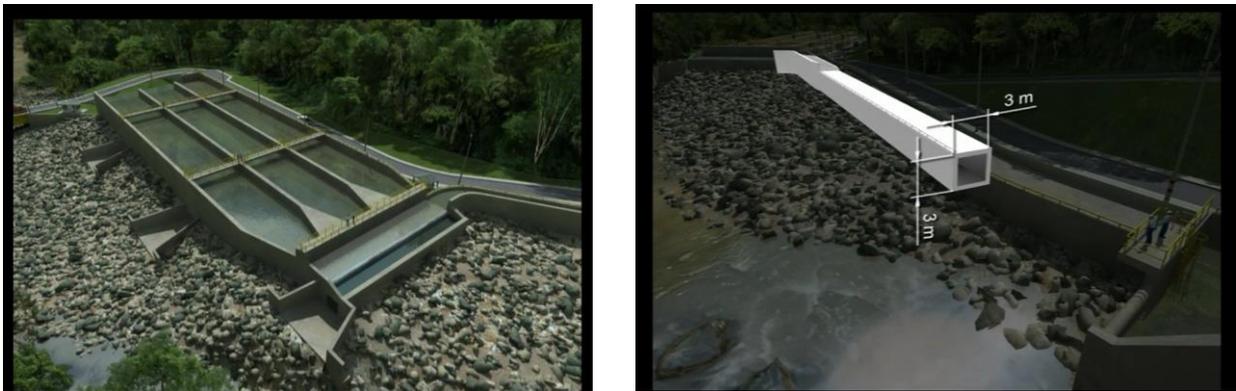
El Proyecto del río Amoyá, es una central hidroeléctrica con una capacidad instalada de 80 MW que pretende reducir las emisiones de CO<sup>2</sup> de la red eléctrica nacional mediante la construcción de una planta de generación de energía a filo de agua.

Este tipo de obra no requiere un embalse de almacenamiento por lo cual es considerada como un sistema de energía limpia por su bajo impacto sobre el ambiente.



**Figura 2.** Captación reja de fondo presa vertedero.

El agua entra a un desarenador y se conduce a través de un túnel de carga de 8.700 metros hasta la casa de máquinas. Este túnel posee una sección excavada en herradura y solera plana.



**Figura 3.** Desarenador y túnel de conducción



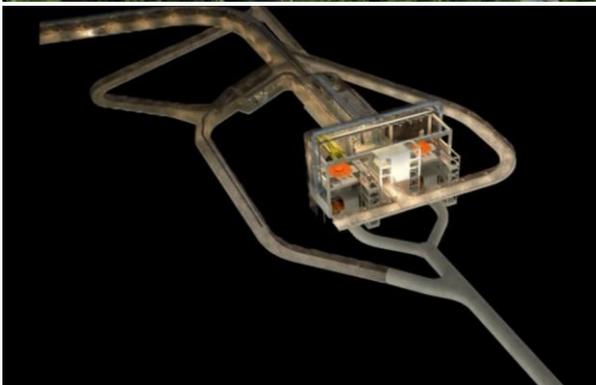
**Figura 4.** Sección de túnel

Antes de la llegada a la casa de maquinas, el túnel llevara un blindaje metálico de aproximadamente 150 m de longitud para controlar el gradiente hidráulico que puede desarrollarse en el sector de aguas arriba de la caverna.

El túnel de acceso a la casa de maquinas de 874 m, donde se alojara la central subterránea tiene tres galerías internas y el túnel de descarga el cual tiene 2.894 m de longitud donde el agua es regresada al río.



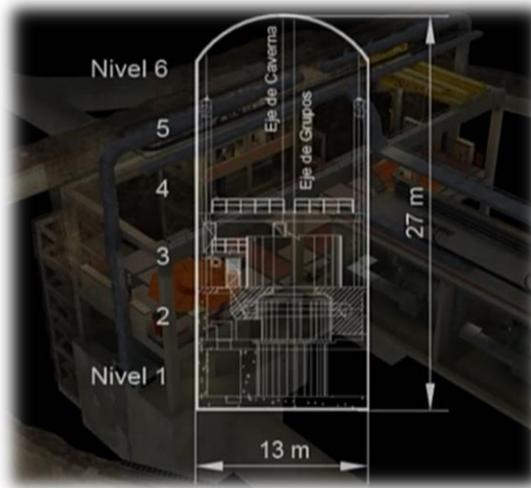
**Figura 5.** Túnel de acceso a casa de máquinas.



**Figura 6.** Central de Máquinas

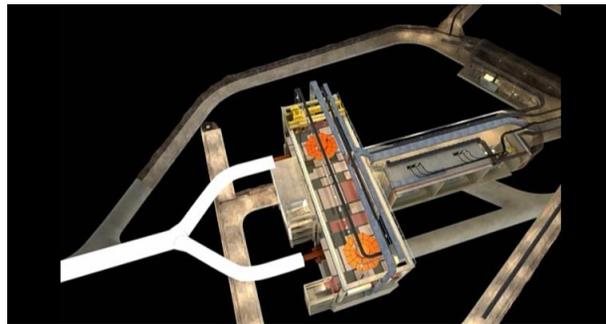
Dentro de esta estructura subterránea se están construyendo 6 niveles en donde se destacan:

- El nivel inferior llamado piso de bombas.
- Los niveles donde se encuentran los pisos de generación llamados pisos de turbinas y piso de equipos electromecánicos y el nivel principal llamado sala de montaje.



**Figura 7.** Construcciones internas de la Casa de Máquinas

En la culata de aguas arriba se encuentra un nicho que alojara un edificio de tres pisos en donde se controlan todos los equipos de la central. El túnel de carga se bifurca en dos ramales blindados que llegan cada uno a una válvula esférica de tipo rotor.



**Figura 8.** Bifurcadores

Proceso de Generación de Energía consiste en la conversión de energía mecánica en energía eléctrica y se logra en forma controlada por medio de la utilización de una serie de dispositivos cuya parte central es el conjunto de la turbina y el generador.

El agua después de su recorrido por el túnel de carga pasa a cada unidad de generación llegando a los blindajes del distribuidor en forma de caracol que se encarga de repartir el agua a presión a cada uno de los 6 inyectores de la turbina pelton de eje vertical generando un movimiento circular.

---

Ese movimiento es transmitido al generador de corriente alterna en donde se genera la energía eléctrica por efecto de inducción electromagnética.

De esta forma cada generador provee de una potencia nominal de 40 mvatios = 80 mvatios entre las dos unidades.

Esta energía es entregada a través de los ductos de barras a una tensión de 13.8 KV a dos transformadores de potencia. La energía pasas a una estación de maniobra encapsulada para ser llevada al exterior, donde la energía se entrega al sistema interconectado nacional.

## 2.5 Proceso de excavación

El proceso de excavación utilizado es el convencional, el cual se realiza a base de una barrenación mediante equipos de perforación neumáticos y el uso de explosivos, la siguiente figura muestra el equipo de perforación “jumbo”. A continuación se presenta el ciclo de excavación en forma generalizada.

- Amacise del frente y acomodo de rezaga.
- Marca topográfica de la sección
- Acercamiento de equipos
- Barrenación de la sección superior (incluye la cuña).
- Sopleteado de los barrenos
- Carga de alto explosivo cebado
- Carga de bajo explosivo
- Conexión de noneles
- Retiro de equipo
- Detonación
- Ventilación

Estos ciclos se llevan a cabo para avanzar con la excavación del túnel, por tanto se requiere realizar varios frentes de excavación para progresar la obra, los avances son a favor de la pendiente o en contrapendiente.



**Figura 9.** Equipos de perforación de dos brazos, construcción de la Casa de Maquinas.

### 3 METODOLOGÍA

#### 3.1 Drenaje del agua en el proceso de construcción

El agua que se infiltra en el interior del túnel debe ser conducida a colectores de drenaje longitudinal que puede ser evacuada por gravedad en túneles superficiales, pero deben ser bombeadas cuando los túneles están a profundidades considerables.

Cuando el avance de obra se hace en contrapendiente al terreno, se presenta el represamiento del agua de infiltración, más el agua que se usa en los equipos para perforación que es 1,5 litros por segundo (l/s) por cada brazo del equipo de perforación, en la zona del frontón, la cual es atacada en el momento del avance.



Figura 10. Agua de infiltración en los túneles de Amoyá.

Varios factores como variaciones en el sistema eléctrico, fallas eléctricas o mecánicas hacen que los túneles se inunden. La siguiente figura muestra los volúmenes de agua que drenan hacia el frente.

Los frentes de perforación que van en contrapendiente tienen necesariamente que bombear el agua hacia la superficie o hacia otra de las galerías donde la pendiente sea positiva y el agua salga por gravedad.

En el proyecto se construyeron: dos ventanas (1 y 2) de acceso de 685 y 701 metros respectivamente, la Ventana 1 será confinada permanentemente mediante un tapón de concreto al finalizar la obra y la Ventana 2 se ha previsto un blindaje que permita trabajos de inspección y mantenimiento del túnel de presión.



**Figura 11.** Frentes de perforación aguas abajo en contra pendiente.

Fue necesario construir las ventanas para acceder a la sección aguas abajo que junto al túnel de presión fueron perforadas en contrapendiente.

El túnel de Presión y la Ventana 1 aguas abajo con una pendiente del terreno negativa del cuatro por ciento (- 4%) y la Ventana 2 aguas abajo con una pendiente del 10,26 por ciento, la cual fue escogida para realizar el estudio por las complicaciones de operación, construcción y acceso.

### 3.2 Caudal a bombear

En la zona de estudio no se cuenta con un estudio de caudales ni con una modelación hídrica, es decir, se desconoce el caudal de diseño de bombeo en los frentes de perforación, por lo cual se recurre a las especificaciones técnicas del proyecto, donde menciona un caudal de 30 l/s por frente de perforación, los cuales se distribuirán a lo largo del tramo de estudio.

### 3.3 Parámetros de diseño: Análisis de las instalaciones existentes.

La longitud total del frente es 1,483.71 metros y se requiere bombear por tramos para controlar el agua en el frontón o zona de perforación, el caudal es variable a lo largo del túnel e incierto.

Se construyeron pozos de bombeo cada 200 metros aproximadamente con una profundidad de 1,5 metros, con el objetivo de que el agua que escurre por la vía debe llegar al pozo y ser bombeado hacia la siguiente estación.

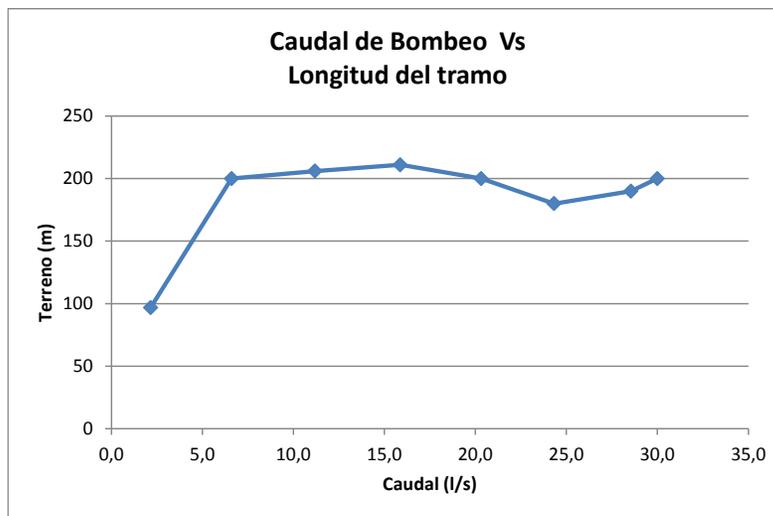


Figura 12. Caudal a bombear dependiendo de la longitud del terreno.

Lograr tramos relativamente uniformes, como se observa en a gráfica anterior, permite hacer cambios de la bomba en la estación cuando se generan daños por caídas de voltaje o caídas de fase, es decir problemas eléctricos o mecánicos causado por desgaste en las piezas.

### 3.4 Modus Operandi o Frecuencia de bombeo

La necesidad del avance en el proceso de excavación exige que el bombeo sea permanente, ya que el desarrollo del proyecto requiere establecer plazos mínimos establecidos en el momento de firmar el contrato. Los daños en una de las bombas serian causante de la interrupción en la secuencia de drenaje lo que implicaría inundación del túnel y retrasos en los trabajos de avance.

Otro problema generado por la interrupción del bombeo es el deterioro de las vías ya que para poder garantizar el tránsito de los equipos se requiere tapar los “peines” o las deformaciones del terreno producto de la voladura usando para ello un material clasificado gravilla fina o recebo para permitir el tránsito de vehículos al interior del túnel. Esto proporciona cumplimiento en las metas establecidas al lograr los tiempos de ejecución programados en cada actividad en el proceso de perforación y avance de obra.

Para evitar estos inconvenientes, retrasos e inundaciones del túnel, se debe contar con bombas de reserva ya que con frecuencia se presentan problemas eléctricos, mecánicos y accidentes. Dejar pasar el tiempo sin reaccionar rápidamente, es evidentemente el principal problema ya que el agua de infiltración inunda rápidamente el túnel y las pérdidas económicas son gigantescas.

### 3.5 Tipos de bombas a utilizar.

Para el desarrollo del proyecto se escogieron bombas sumergibles por las siguientes ventajas:

- No requiere aspiración por lo tanto no requiere cebado, por tanto el arranque es más rápido, punto crucial en proyectos donde la pérdida de tiempo produce grandes pérdidas.
- Requiere una obra civil mínima garantizar la sumergencia de la bomba y un desarenador para finos y arenas.

A continuación se presentan las curvas características de las bombas seleccionadas para bombear el túnel.

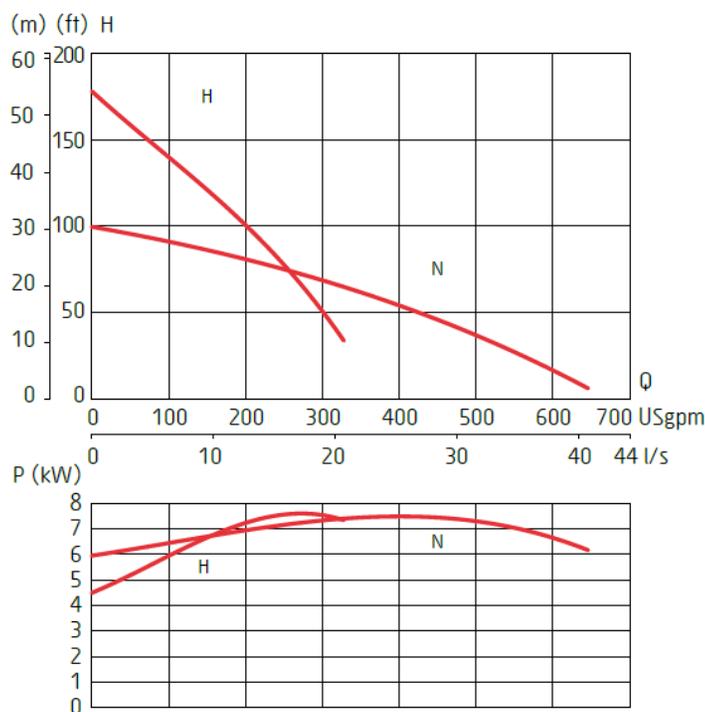
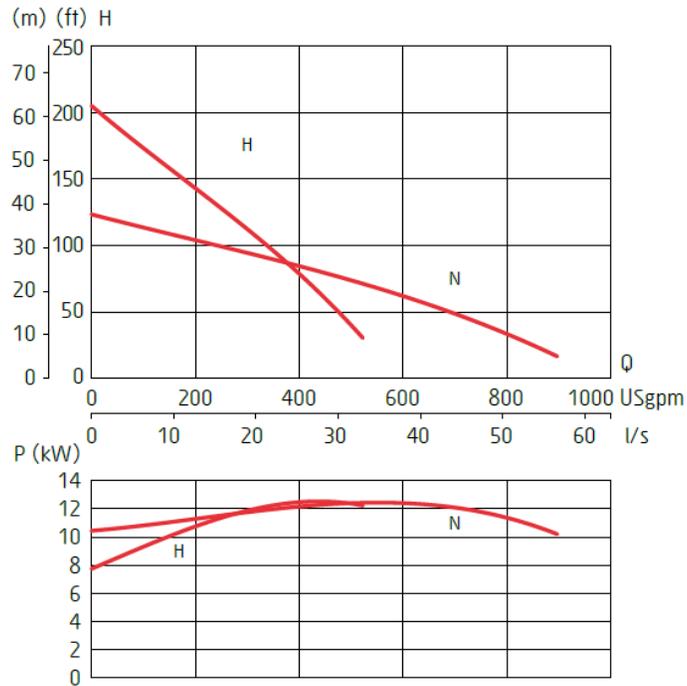
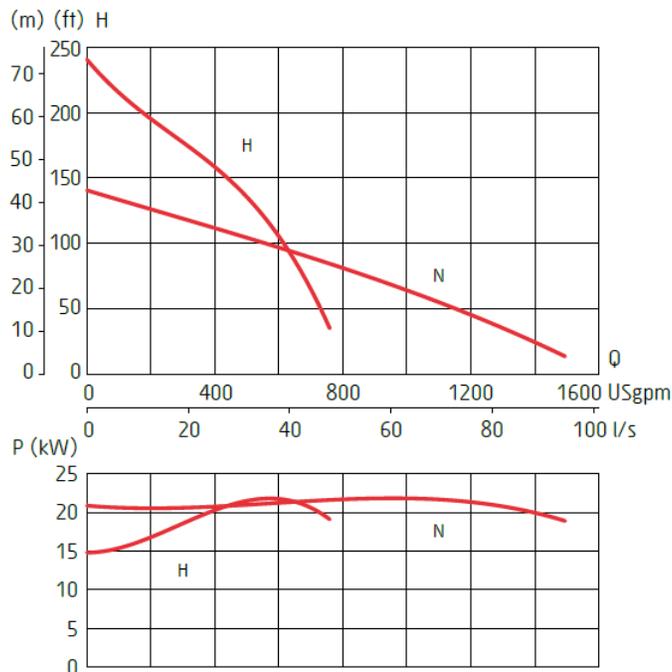


Figura 13. Bomba Sumergible, Marca Grindex, Modelo Major N y H.



**Figura 14.** Bomba Sumergible, Marca Grindex, Modelo Master N y H.



**Figura 15.** Bomba Sumergible, Marca Grindex, Modelo Matador N y H.

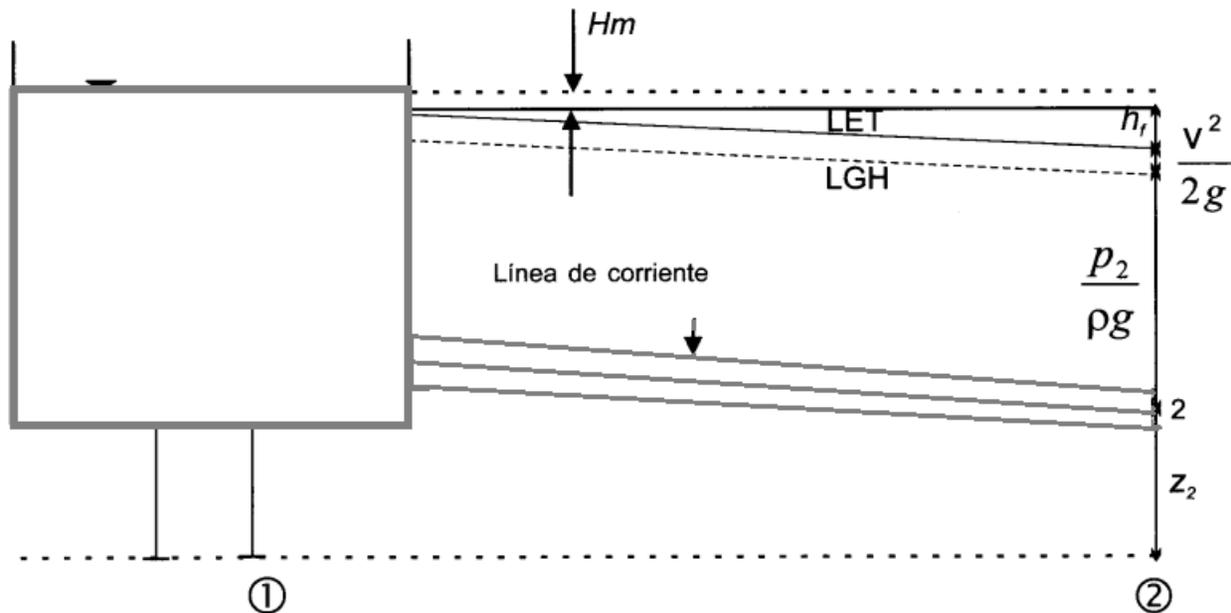
## 4 DATOS Y ANÁLISIS DE DATOS

### 4.1 Cálculos de la Altura Dinámica Total.

Mediante el uso de las ecuaciones de Colebrook-White y la de Darcy-Weisbach se puede llevar a cabo el cálculo de tuberías simples. Se inicia con la ecuación de conservación de la energía para una tubería que parte de un tanque de nivel constante, se puede plantear la ecuación de Bernoulli entre los puntos 1 y 2 para llegar a la ecuación <sup>4</sup>:

$$h_1 + Z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + h_f + \sum h_m$$

**Ecuación 2.** Conservación de la energía.



**Figura 16.** Cálculos de la altura dinámica total

Si el punto 2 es la salida de la tubería, el término de la altura de velocidad desaparece ya que el flujo pierde su velocidad y la presión en la salida es igual a la atmosférica.

4. SALDARRIAGA, Juan. Hidráulica de Tuberías. Abastecimiento de agua, redes, riegos. Alfaomega. Bogotá, D.C., 2007.

$$\frac{v_2^2}{2g} = 0 \text{ y } \frac{p_2}{\rho g} = 0$$

Por tanto la altura total producida por la bomba debe ser la siguiente ecuación:

$$H = z_2 + h_f + \sum h_m$$

**Ecuación 3.** Altura dinámica total.

## 4.2 Pérdidas por fricción

Usando la ecuación de Darcy-Weisbach para el cálculo de las pérdidas por fricción ( $h_f$ ):

$$h_f = f \frac{l v^2}{d 2g}$$

**Ecuación 4.** Ecuación de Darcy-Weisbach

f: factor de fricción

v: velocidad

g: gravedad

d: diámetro de la tubería

l: longitud de la tubería

## 4.3 Factor de fricción de Darcy

Para resolver esta ecuación es necesario conocer el valor del factor de fricción f de Darcy en la ecuación no explícita de Colebrook- White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left[ \frac{k_s}{3,7d} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right]$$

**Ecuación 5.** Ecuación Colebrook- White

Que a su vez depende del número de Reynolds.

#### 4.4 Número de Reynolds

El número de Reynolds relaciona la densidad, viscosidad, velocidad y dimensión típica de un flujo en una expresión adimensional, dicho número o combinación adimensional aparece en muchos casos relacionado con el hecho de que el flujo pueda considerarse laminar (número de Reynolds pequeño) o turbulento (número de Reynolds grande).

$$Re = \frac{\rho v_s D}{\mu}$$
$$Re = \frac{v_s D}{\nu}$$

**Ecuación 6.** Número de Reynolds

donde:

$\rho$ : densidad del fluido

$v_s$ : velocidad característica del fluido

$D$ : diámetro de la tubería a través de la cual circula el fluido o longitud característica del sistema

$\mu$ : viscosidad dinámica del fluido

$\nu$ : viscosidad cinemática del fluido

$$\vartheta = \frac{\mu}{\rho}$$

**Ecuación 7.** Viscosidad cinemática del fluido

#### 4.5 Cálculo de velocidad

$$Q = v \cdot A \quad v = \frac{Q}{A}$$

**Ecuación 8.** Ecuación de Caudal respecto a la velocidad.

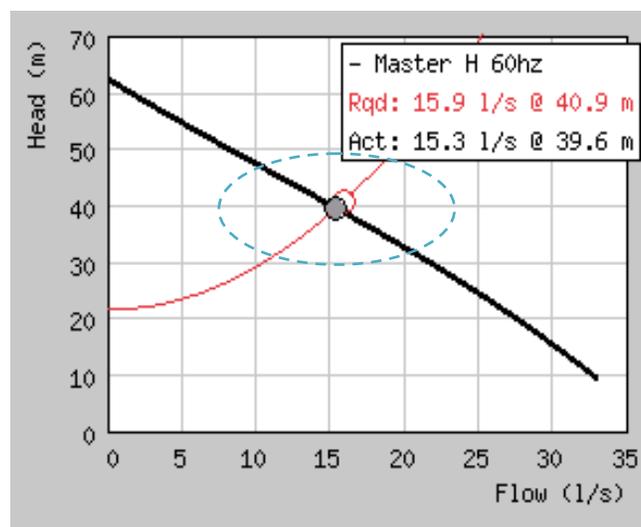
$Q$ : Caudal distribuido hipotéticamente independiente a lo largo del túnel.

$A$ : Área de la tubería utilizada.

## 4.6 Curva característica de la bomba y determinación de la curva del sistema

La curva característica relaciona todas las posibles combinaciones de caudal ( $Q$ ) y presión o altura dinámica total ( $H$ ), que una determinada bomba puede proporcionar, es la curva más importante de las que describen el funcionamiento de la bomba. Esta curva suele venir limitada en sus dos extremos, es decir se restringe el funcionamiento de la bomba en las zonas correspondientes a caudales muy bajos (zonas altas) y a caudales muy altos (zona baja) con el objetivo de protegerla de malos funcionamientos, en la siguiente figura se observa en un círculo azul el punto óptimo de operación.

Con la información obtenida en la etapa de levantamiento de datos se elabora la curva característica del sistema, la cual representa la altura de la carga total que deben vencer las bombas funcionando a los diversos caudales calculados o asignados. La curva del sistema es la representación gráfica de la suma de la altura estática, las pérdidas por fricción, las pérdidas por accesorios menores y las pérdidas singulares del sistema con respecto al caudal. (Figura 17).



**Figura 17.** Ejemplo de curva característica del sistema sobre a la curva de la bomba y el punto óptimo de operación.

## 4.7 Condiciones de trabajo:

Las siguientes son las características del fluido.

**Tabla 1.** Características del fluido y de la bomba.

DATOS	
Características del fluido	
$\rho$	998.2 Kg/m <sup>3</sup>
$\mu$	0.001005 Pa.s
$\nu$	0.00000114 m <sup>2</sup> /s
$g$	9.81 m/s <sup>2</sup>
Características de la bomba	
$\eta$	85%
$K_s$	0.00015
Longitud total del tramo	1,483.71 m
$n$	0.00000114 m <sup>2</sup> /s
$\sum km$	4.21
Pendiente Tramo	10.26%
Caudal Específico	0.02 l/s*ml

Con lo anterior se puede calcular el diagrama de cada tramo de bombeo en una longitud total de 1483.71 con una pendiente del terreno del 10,26%.

Se construyeron siete cárcamos de bombeo, los cuatro primeros con tubería de 6 pulgadas y los otros con tubería de cuatro pulgadas de polietileno de alta densidad, dicha tubería tiene un diámetro diferente al comercial es cual esta especificado en la siguiente tabla, donde se calcula la velocidad y el área.

**Tabla 2.** Longitud de los tramos de bombeo, caudal asignado, diámetro de tuberías.

Tramo/cárcamo de bombeo	Long Tramo (m)	Caudal de Bombeo (l/s)	Tubería (Pulgadas)	Diámetro int. de la tubería (m)	Velocidad (m/s)	Área (m <sup>2</sup> )
Primer tramo	200.00	33.00	6	0.125	2.68	0.0123
Segundo tramo	190.00	28.55	6	0.125	2.32	0.0123
Tercer tramo	180.00	24.33	6	0.125	1.98	0.0123
Cuarto tramo	200.00	20.32	6	0.125	1.65	0.0123
Quinto tramo	211.01	15.87	4	0.090	2.49	0.0064
Sexto tramo	206.00	11.18	4	0.090	1.75	0.0064
Septimo tramo	200.00	6.60	4	0.090	1.03	0.0064
Frontón	96.70	2.15	4	0.090	0.33	0.0064

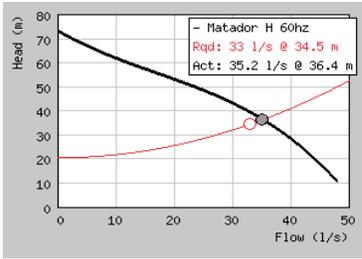
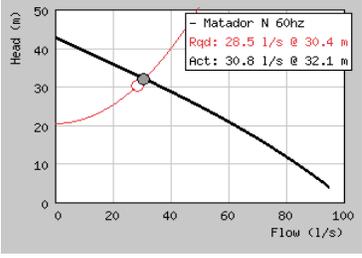
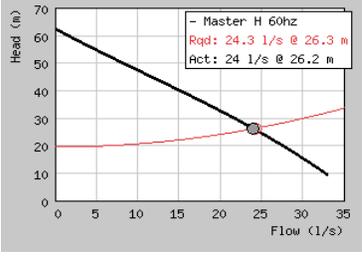
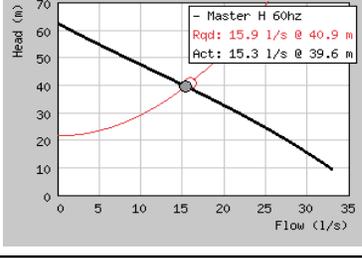
Adicionalmente se calcula el número de Reynolds, el coeficiente de fricción para obtener las perdidas menores y las pérdidas por fricción para finalmente calcular la Altura Dinámica Total y la potencia requerida para mover el caudal bajo esas condiciones.

**Tabla 3.** Cálculos de la altura dinámica total.

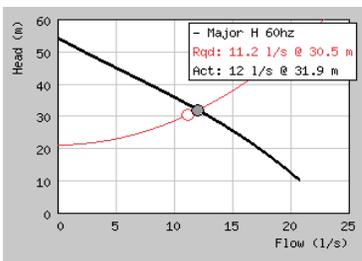
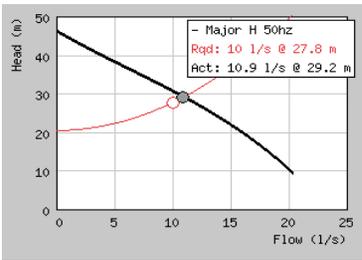
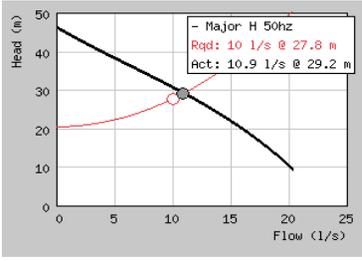
Tramo/cárcamo de bombeo	Re	f	hf (m)	hm (m)	H Altura Topográfica (m)	F de seguridad (m)	Altura Dinámica Total (m)	Potencia Kw
Primer tramo	294,855.47	0.021408	12.64	1.55	20.52	0.69	35.40	11.44
Segundo tramo	255,109.77	0.021533	9.04	1.16	19.49	0.59	30.29	8.47
Tercer tramo	217,351.36	0.021691	6.26	0.84	18.47	0.51	26.09	6.21
Cuarto tramo	181,580.22	0.021896	4.90	0.59	20.52	0.52	26.53	5.28
Quinto tramo	196,992.39	0.023704	17.65	1.34	21.65	0.81	41.45	6.44
Sexto tramo	138,751.14	0.024213	8.73	0.66	21.14	0.61	31.14	3.41
Septimo tramo	81,892.71	0.025296	3.09	0.23	20.52	0.48	24.31	1.57
Frontón	26,690.34	0.027889	0.17	0.02	9.92	0.20	10.32	0.22

Con estos datos se puede calcular la curva del sistema asociado a la curva de la bomba elegida para cada tramo, teniendo en cuenta el caudal asignado de acuerdo a las distancias a bombear. La tubería se escogió tratando de disminuir las pérdidas por fricción, para que la bomba opere en la zona de máxima eficiencia.

**Tabla 4.** Curva del sistema en cada pozo de bombeo (1-5 pozo)

Tramo	Long Tramo (m)	H Altura Topográfica (m)	Caudal (l/s)	Tubería (pulgadas)	H fricción (m)	ADT (m)	Curva de la Bomba	Modelo
1	200.0	20.5	33.0	6	12.62	35.39		Matador H
2	190.0	19.5	28.5	6	9.03	30.28		Matador N
3	180.0	18.5	24.3	6	6.25	26.08		Master H
4	200.0	20.5	20.3	6	4.90	26.52		Master H
5	211.0	21.6	15.9	4	17.63	41.43		Master H

**Tabla 5.** Curva del sistema en cada pozo de bombeo (6 pozo al frontón)

Tramo	Long Tramo	H Altura Topográfica	Caudal	Tubería	H fricción	ADT	Curva de la Bomba	Modelo
	(m)	(m)	(l/s)	(pulgadas)	(m)	(m)		
6	206.0	21.1	11.2	4	8.72	31.13		Major H
7	200.0	20.5	6.6	4	3.08	24.31		Major H
8	96.7	9.9	2.1	4	0.17	10.32		Major H

**Tabla 6.** Potencia de las bombas

Tramo	Long Tramo	H Altura Topográfica	Caudal	Tubería	ADT	P	Modelo
	(m)	(m)	(l/s)	( $\theta$ )	(m)	(Kw)	de la bomba
1	200.0	20.5	33.0	6	35.39	23.00	Matador H
2	190.0	19.5	28.5	6	30.28	21.00	Matador N
3	180.0	18.5	24.3	6	26.08	12.50	Master H
4	200.0	20.5	20.3	6	26.52	12.00	Master H
5	211.0	21.6	15.9	4	41.43	11.00	Master H
6	206.0	21.1	11.2	4	31.13	7.50	Major H
7	200.0	20.5	6.6	4	24.31	6.30	Major H
8	96.7	9.9	2.1	4	10.32	5.00	Major H

---

## 4.8 Principales problemas asociados al sistema de bombeo en túneles.

### ❖ Fallas eléctricas

En cuanto a los problemas más comunes que se puede encontrar en un motor es:

- Quemado de bobinados: las razones pueden ser por fallos en la corriente o fallos en la tensión.

Las altas tensiones por encima de la nominal producen aumentos de temperatura en el bobinado. Esta temperatura no causa normalmente un daño inmediato, se va deteriorando lentamente el aislamiento hasta generarse la falla.

Cuando el fallo es por sobre corriente o por sobrecarga en el motor, puede ser resultado de:

- Tensión baja
- Impulsor bloqueado
- Refrigeración escasa o nula.
- Fricción excesiva en rodamientos, casquillos o impulsor.
- Alta temperatura del agua a bombear.

Otro tipo de fallo es por corriente asimétrica. Las bobinas de una o dos fases del motor resultan quemadas. El fallo puede ocurrir cuando una de las fases de la red de suministro se desconecta, por ejemplo cuando un fusible se funde, el motor continúa trabajando con mayor consumo en las otras fases.

Fallas asociadas a la tensión pueden ser causadas por:

- Sobretensión que produzca un corto circuito
- Baja calidad de material aislante. El aislamiento se puede consumir si el motor se sobrecalienta o se sumerge en el agua.
- Fallo en el bobinado del motor.



**Figura 18.** Daños eléctricos

#### ❖ Cambio del diámetro de la tubería de descarga

En el afán del avance de la excavación se puede improvisar con materiales inapropiados para las bombas, como son las tuberías de descarga.

La siguiente foto muestra una bomba de 11 HP de fuerza con un diámetro de descarga original de 4 pulgadas transformada a 2 pulgadas con un acople de fabricación casera.



**Figura 19.** Estrangulamiento en la tubería de impulsión.

### ❖ Golpes en la bomba de achique o bomba del frontón en el frente de excavación

Después del proceso de voladura, extracción de gases y desprendimiento de materiales sueltos se procede a rezagar para retirar el material demolido, pero en ese tiempo hay una acumulación de agua en el frontón que debe ser removida para que el equipo pueda entrar y retirar la rezaga.

Muchas veces el operador del cargador de bajo perfil “toro” no se prevé la existencia de la bomba y la golpea la siguiente figura ilustra casos de deformaciones de bombas por golpes. Se recomienda una señalización visible para evitar o minimizar esos daños.



**Figura 20.** Golpes a la bomba del frontón del túnel.

### ❖ Falta de mantenimiento.

Trabajar continuamente 24 horas sin suspender actividades implica mayor desgaste, es necesario contar con un programa de mantenimiento, se recomienda una frecuencia de 350 horas de operación aproximadamente.

### ❖ Falta de limpieza en los pozos de bombeo.

Se acumula el lodo residuo del proceso de perforación en cada estación de bombeo, los finos y las arcillas deterioran el interior de la bomba.



**Figura 21.** Bombas trabajando enterradas en lodo espeso.

### ❖ Bombas que trabajan sin agua.

La bomba no es apagada en su debido tiempo sino que sigue trabajando con ausencia de agua.



**Figura 22.** Bombas encendidas sin agua suficiente para bombear.

❖ **Ingreso de roca fracturada de la voladura en las tuberías.**

Si después de la detonación no se protege las tuberías, muy posiblemente pueden entrar rocas a presión en los tubos impidiendo drenaje del agua.



**Figura 23.** Roca encontrada en una tubería después de haber avanzado aproximadamente 100 m.

---

## 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

---

- La cantidad de agua que fluye en los túneles, es variable, se han presentado casos en los que la perforación ha tenido que abandonarse, pues salía más agua que la que pudiera drenarse con todas las bombas instaladas, otros túneles muy profundos se han perforado sin encontrar una gota de agua. Por tanto es necesario instalar el sistema de bombeo oportunamente así no se presenten indicios de grandes vertimientos de agua, ya que los imprevistos se presentan en cualquier momento de la perforación.
- Un factor importante en el proceso constructivo de los túneles es establecer donde se construirán los pozos de bombeo, se recomienda tratar de estandarizar las distancias, mientras el terreno lo permita, para poder hacer mantenimientos y remplazar las bombas averiadas o dañadas, de esta forma se amplía las opciones para remplazar en cada pozo.
- Los procesos de excavación en túneles exigen que no se puede suspender el bombeo ya que implicaría inundación del frente de trabajo, por tanto es necesario plantear estrategias que ofrezcan confiabilidad, como el mantenimiento preventivo antes que el correctivo, la presencia permanente de bombas de reserva, un personal eléctrico capacitado en caso de fallas o variaciones en el voltaje, son algunas maniobras recomendables para evitar problemas con los sistemas de bombeo.
- El mercado ofrece gran variedad de bombas, el uso de bombas sumergibles tiene sus ventajas en este tipo de proyectos ya que el arranque es más rápido, punto crucial donde la pérdida de tiempo se traduce en pérdidas económicas, por otra parte este tipo de bombas requiere de mínimas obras civiles lo que representa ahorro en el momento de la construcción.
- Para seleccionar la bomba adecuada es necesario tener en cuenta que trabaje en la zona óptima de operación con el objetivo de protegerla de malos funcionamientos y para obtener de ella su máxima eficiencia.
- Los principales problemas asociados con el bombeo de aguas en los túneles el proceso constructivo se generan por fallas eléctricas, es indispensable contar con un sistema de emergencia, una planta eléctrica que se encienda rápidamente.
- Hay bombas que necesitan ser “reseteadas” posterior a la falla eléctrica o se apagan hasta que se haga el encendido manual, se recomienda contar con transporte disponible para minimizar los tiempos perdidos, ya que como las bombas están en secuencia, no deben trabajar sin agua.
- Las altas tensiones por encima de la nominal producen aumentos de temperatura en el bobinado de las bombas eléctricas, esta temperatura no causa normalmente un daño

---

inmediato, se va deteriorando lentamente el aislamiento hasta generarse la falla en la parte interna de la bomba.

- Se recomienda contar con dos bombas de reserva por cada frente de perforación, una para el achique del frontón y otra que remplace a las de mayor tamaño.
- Se recomienda cumplir con un programa de mantenimiento cada 350 horas mínimo por cada bomba que trabaje las 24 horas continuas.
- Se recomienda limpiar los pozos de bombeo una vez al día para evitar que las bombas se deterioren de forma acelerada, las arenas y los finos dañan los impulsores y en general la parte interna de la bomba.
- Para disminuir los tiempos de bombeo se recomienda en el momento de la voladura no apagar las bombas, dejar que sigan bombeando en los cárcamos. Apagar solo la bomba del frontón.

---

## 6 BIBLIOGRAFÍA

---

- Tomado de: Universidad de los Andes. Seminario: Técnicas de Análisis y Evaluación de Pruebas de Bombeo (1994). Bogotá, Colombia.
- CASTRO, Santiago; DELUCCHI, Hugo; GAUSEREIDE Leif-Rune; CAVIEDES, Jaime y VELASCO Lucio. Ocurrencia de aguas subterráneas a gran presión en el Túnel Común Alfalfa: características, solución adoptada e interpretación. En: Revista Geotécnica de Chile. Vol 20, N° 1, (Julio, 1993), p. 85-97.
- CASTAÑO, Juliana. Infiltración de Agua en Túneles Colombianos. Santa Fé de Bogotá, 2000. Proyecto de Grado. Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental.
- SALDARRIAGA, Juan. Hidráulica de Tuberías. Abastecimiento de agua, redes, riego. Alfaomega. Bogotá, D.C., 2007.