

**Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas**

**Facultad de Construcciones**

**Departamento de Ingeniería Hidráulica**



**TRABAJO DE DIPLOMA**

**Análisis y Simulación de Alternativas para el Diseño de un Sistema de Acueducto Urbano.**

**Autor: Juan Pablo Cárdenas Reinoso**

**Tutor: Ing. Alberto Díaz Barata**

**Santa Clara**

**Junio 2016**

**"Año 57 de la Revolución."**



Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería Hidráulica, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

---

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

---

Firma del Tutor

---

Firma del Jefe de  
Departamento donde se  
defiende el trabajo

# PENSAMIENTO

# PENSAMIENTO

(...) Hagámonos el propósito de redoblar nuestros esfuerzos y jurémonos ante nosotros mismos que si un día, nuestro trabajo nos pareciera bueno debemos luchar por hacerlo mejor, y si fuera mejor, debemos luchar por hacerlo perfecto; conociendo de ante mano que para un comunista nada será nunca suficiente bueno y ninguna obra humana, será jamás suficientemente perfecta (...)

“Cmte. Fidel Castro Ruz”

# DEDICATORIA

# DEDICATORIA

Dedico este Trabajo de diploma, especialmente a mis padres; José Cárdenas Fuerte Y Maira Reinoso Santos, que con tanto amor y sacrificio han dado de sí para que pudiera ver terminado mi mayor anhelo; graduarme de Ingeniería Hidráulica en la universidad “Marta Abreu de las Villas”.

Hago extensiva ésta dedicatoria y llegue a toda mi familia, amigos y personas que de una forma u otra se sintieron comprometidas con mi formación profesional; las que están a mi lado día a día, y a otros que no se encuentran ya entre nosotros; gracias a los que me ayudaron, los que me apoyaron y en especial a los que confiaron en mí, sin ustedes no se hubiese podido construir este gran sueño.

Llegue esta dedicatoria hasta mi centro de estudio “Facultad de Construcción”, donde existe un claustro de profesores capaces de educar y enseñar a las nuevas generaciones a todos ellos muchas gracias.

# AGRADECIMIENTOS

# AGRADECIMIENTOS

A mi familia, a mis padres, mis abuelos, mis tías y tíos y primos quienes me han brindado su apoyo en todo momento.

A mis padres por su sacrificio a lo largo de la carrera.

A mi esposa por apoyarme ayudarme y comprenderme en cada momento.

A mi tutor Alberto Díaz Barata, por su apoyo a lo largo de la carrera y en el desarrollo de este trabajo.

A todos trabajadores, por su atención en el trabajo realizado en la Empresa de recursos Hidráulicos.

A todos los profesores, por su capacidad de comprensión y por permitirme adquirir los conocimientos necesarios para el futuro.

A mis amigos, por apoyarme en los momentos más difíciles y por los ratos de alegría vividos en el tránsito de estos cinco años.

A los que de una forma u otra han colaborado en el desarrollo de este trabajo.

A todos MUCHAS GRACIAS.

# RESUMEN

## **RESUMEN**

Uno de los principales aspectos a tener en cuenta en las etapas de diseño y explotación de un sistema de distribución de agua con empleo de electro-bombas es el consumo energético necesario para su correcto funcionamiento, el cual dependerá de las características de los componentes y objetos de obra que se consideren, y cuyo objetivo fundamental es garantizar que se satisfagan las necesidades de caudal, presión y servicio estable a los consumidores durante las 24 horas del día.

En este trabajo se analizan alternativas para evaluar el comportamiento hidráulico, el costo de inversión y el costo explotación correspondiente. Los sistemas propuestos para establecer la comparación entre posibles variantes de regulación difieren en que utilizan equipos de bombeo con velocidad fija con o sin depósito de compensación, y equipos de bombeo con variadores de velocidad.

En nuestro país el empleo de modelos de simulación de un sistema de bombeo con velocidad variable para satisfacer la demanda de un acueducto urbano aún no se ha desarrollado con profundidad y en este sentido se logra avanzar en la presente investigación, para poder demostrar la factibilidad de dicho sistema y utilizarlos como herramienta de análisis.

Para el análisis hidráulico y energético, se emplea el software profesional EPANET 2.0, el cual se realiza en período extendido, tomando en consideración las variaciones en el consumo de agua de la población durante los 365 días del año, lo cual ha permitido arribar a conclusiones y recomendaciones importantes en correspondencia con los resultados obtenidos.

# SUMMARY

## **SUMARY**

One of the main aspects to take into account in the desing and explotation in the stages of a system of water distribution with the usage of the electro-bombs is the energetic consumption necessary for the correct working, which will depend from the characteristics of the components and objects of the considered constructions, and the main objective is to guarantee the needs of the volume, pressure and stable service to the consumers during 24 hours.

In this work we analilize alternatives to evaluate the hydraulic behavies, the cost of inversion and cost of the corresponding explotation.

The proposol systems to stablish the comparison among the possible variants of different regulations in which it is used equipments of bombing with a fixed speed with or without deposit of compensation and equipments of bombing with varied of speed.

In over countries the use of models of simulation of a system of bombing with varied speed to satisfy the demanding of an urban aqueduct hasn't been developed and in this point it's get to advance to show the feasible system and use it as object of analysis.

For the hydraulic and energetic analysis, it's used the professional software EPANET 2.0 wich is carries out in a long period, taking into account the changes in the consumption of water by the population during the 365 days of the yaer, it has permitted to get to important conclusions and recommendations in correspondance to the results obtained.

# ÍNDICE

# ÍNDICE

## **Capítulo 1.**

### **1. Fundamentos Teóricos del Diseño de Sistemas de Abastecimiento de Agua en Acueductos Urbanos con empleo de Equipos de Bombeo.**

<u>1.1. Sistemas de abastecimiento de agua.....</u>	5
<u>1.2. Uso eficiente del agua en zonas urbanas.....</u>	5
<u>1.3. Elementos que componen un sistema de abastecimiento.....</u>	6
<u>1.3.1. Fuentes de suministro.....</u>	6
<u>1.3.2. Equipos de bombeo.....</u>	6
<u>1.3.2.1. Empleo de bombas en serie y en paralelo.....</u>	7
<u>1.3.2.2. Leyes de semejanza aplicadas al caso de variación en la velocidad de giro.....</u>	8
<u>1.3.3. Tanques de almacenamiento.....</u>	9
<u>1.3.3.1. Capacidad del tanque de almacenamiento.....</u>	9
<u>1.3.4. Conductoras.....</u>	10
<u>1.3.5. Redes de distribución.....</u>	10
<u>1.3.5.1. Tipos de redes de abastecimiento según su topología.....</u>	10
<u>1.3.6. Elementos complementarios de un sistema de abastecimiento de agua.....</u>	12
<u>1.3.6.1. Válvulas.....</u>	12
<u>1.3.6.2. Elementos de medidas y control.....</u>	13
<u>1.4. La Regulación en redes de acueducto.....</u>	13
<u>1.4.1. Regulación mediante depósitos.....</u>	15
<u>1.4.2. Regulación mediante inyección directa a la red.....</u>	15
<u>1.4.3. Bombas de velocidad fija conectadas en paralelo.....</u>	16
<u>1.4.4. Bombas de velocidad variable conectadas en paralelo.....</u>	16
<u>1.4.5. Regulación compartida entre bombas de velocidad fija y velocidad variable.....</u>	18
<u>1.5. Diseño óptimo de una red de abastecimiento de agua.....</u>	20
<u>1.6. Modelación matemática de redes hidráulicas de distribución.....</u>	21
<u>1.7. Programas para el diseño de los sistemas de abastecimiento de agua.....</u>	22
<u>1.7.1. ROKO: Programa para el cálculo y diseño óptimo de redes hidráulicas urbanas.....</u>	22

<u>1.7.2. EPANET 2.0 Software para el Análisis y Simulación de Sistemas de Abastecimiento de Agua.....</u>	23
--	----

## Capítulo 2.

### 2. Diseño y Simulación de Alternativas Aplicadas a un Sistema de Acueducto Urbano.

<u>2.1. Datos asumidos para el diseño óptimo de la red de abastecimiento de agua.....</u>	24
<u>2.2.Red de distribución.....</u>	25
<u>2.3. Aplicación del programa ROKO – ROCT.....</u>	27
<u>2.3.1 Resultados del diseño obtenido por ROKO-ROCT.....</u>	28
<u>2.4 Simulaciones hidráulicas en EPANET 2.0.....</u>	29
<u>2.5 Análisis de un Sistema – Bomba – Tanque – Red (Variante 1).....</u>	31
<u>2.6. Variante 1 (Tanque de succión - Conductora de impulsión - Depósito de Compensación - Conductora de gravedad – Red de Distribución).....</u>	34
<u>2.6.1. Resultados de la simulación en período extendido para la (DMD).....</u>	35
<u>2.7. Análisis de un Sistema de Bombeo con Inyección Directa a la Red empleando (BVF) (Variante 2).....</u>	37
<u>2.7.1. Resultados de la simulación en periodo extendido para laDMD.....</u>	39
<u>2.8. Análisis de un Sistema de Bombeo con Inyección Directa a la Red con (BVV), variando la velocidad de giro por debajo de la velocidad nominal. (Variante 3).....</u>	40
<u>2.8.1. Resultados de la simulación en periodo extendido de la DMD.....</u>	42
<u>2.9. Análisis de un Sistema de Bombeo con Inyección Directa a la Red con (BVV), variando la velocidad de giro hasta un 10% por encima de la velocidad nominal. (Variante 4).....</u>	43
<u>2.9.1. Resultados de la simulación en periodo extendido para la (DMD).....</u>	45
<u>2.10. Análisis de un Sistema de Bombeo con Inyección Directa a la Red con (BVF) y (BVV) (Variante 5).....</u>	46
<u>2.10.1 Resultados de la simulación en periodo extendido para la demanda máxima diaria (DMD).....</u>	48

## Capítulo 3.

### 3. Comparación Económica para las Variantes de Regulación Analizadas.....

<u>3.1. VARIANTE 1.....</u>	50
<u>3.1.1. Análisis para el 100% delaDMD.....</u>	50
<u>3.1.2. Análisis para el 75% delaDMD.....</u>	52
<u>3.1.3. Análisis para el 60% delaDMD.....</u>	53

## **Análisis y Simulación de Alternativas para el Diseño de un Sistema de acueducto urbano.**

<u>3.2. VARIANTE 2</u> .....	54
<u>3.2.1. Análisis para el 100% de la DMD</u> .....	54
<u>3.2.2. Análisis para el 75% de la DMD</u> .....	56
<u>3.2.3. Análisis para el 60% de la DMD</u> .....	57
<u>3.3. VARIANTE 3</u> .....	58
<u>3.3.1. Análisis para el 100% de la DMD</u> .....	59
<u>3.3.2. Análisis para el 75% de la DMD</u> .....	60
<u>3.3.3. Análisis para el 60% de la DMD</u> .....	61
<u>3.4. VARIANTE 4</u> .....	62
<u>3.4.1. Análisis para el 100% de la DMD</u> .....	63
<u>3.4.2. Análisis para el 75% de la DMD</u> .....	64
<u>3.4.3. Análisis para el 60% de la DMD</u> .....	65
<u>3.5. VARIANTE 5</u> .....	66
<u>3.5.1. Análisis para el 100% de la DMD</u> .....	66
<u>3.5.2. Análisis para el 75% de la DMD</u> .....	68
<u>3.5.3. Análisis para el 60% de la DMD</u> .....	69
<u>3.6. Comparación Económica</u> .....	70
<u>3.6.1. Costos de inversión (Variante 1)</u> .....	73
<u>3.6.2. Costos de inversión (Variante 2)</u> .....	74
<u>3.6.3. Costos de inversión (Variante 3)</u> .....	75
<u>3.6.4. Costos de inversión (Variante 4)</u> .....	76
<u>3.6.5. Costos de inversión (Variante 5)</u> .....	78
<u>Conclusiones y Recomendaciones</u> .....	81
<u>Bibliografía</u> .....	82
<u>Anexos</u> .....	83

# INTRODUCCIÓN

# INTRODUCCIÓN

Actualmente el gran crecimiento poblacional ha influenciado en la conformación de las ciudades a nivel mundial. Dado a las necesidades del ser humano, las mismas están determinadas por una infraestructura técnica urbana que hace posible su funcionabilidad, dígase redes de suministro y evacuación, siendo determinada su complejidad por el alto grado de desarrollo tecnológico.

Los entidades gubernamentales cada vez más hacen énfasis en la optimización de dicha infraestructura para ello establecen estrategias que permiten hacer uso racional y económico de cada uno de los servicios urbanos.

El agua, como recurso natural, obtiene el mayor grado de importancia en las necesidades primarias.

El abastecimiento de agua potable es una más de las actividades fundamentales dentro de los distintos tipos de servicios públicos que aportan calidad de vida a los ciudadanos. Presenta características peculiares frente a otros servicios y su funcionamiento puede ser analizado desde orientaciones muy diversas. Como recurso, la cantidad de agua disponible para el consumo está cada vez más limitada y en ocasiones, su distribución es irregular en el tiempo y el espacio.

De entre todos los usos del agua, el abasto a la población e industrias en los países en vías de desarrollo, constituye el 20% del consumo total, solo superada por el sector de la agricultura con un 80%. En el caso de Cuba, la demanda de agua de estos dos sectores, población e industrias contabiliza el 26%. Con respecto al consumo energético, vale la pena señalar que más del 90% del agua para el abasto a la población e industrias se bombea, representando una factura de aproximadamente el 30% de la energía que se genera en el país. Como resultado, la problemática del diseño y la gestión óptima de los sistemas de abastecimiento de agua, se plantea sobre la base de la búsqueda de sistemas de utilización de agua y de energía más eficientes en su conjunto. [7]

La búsqueda de variantes económicas dentro del diseño de redes de abastecimiento de agua es prioridad dentro de las empresas dedicadas a la proyección de las mismas, la utilización de herramientas informáticas en la etapa de diseño, permite el ahorro de tiempo y la posibilidad de analizar una mayor cantidad de variantes en los proyectos.

La complejidad de los sistemas de abastecimiento de agua y la creciente necesidad de explotarlos de un modo más eficiente, asegurando un suministro de calidad a los usuarios con el menor costo posible, implican cada vez más el requisito de un diseño y gestión óptima de estos sistemas. Uno de los componentes de estos sistemas es la estación de bombeo y es esta precisamente, la que está vinculada con el mayor consumo energético en los sistemas de acueducto.[7]

Estos sistemas fuentes están constituidos por: fuente(s) de agua, estaciones de bombeo, sistemas de tuberías de conducción, sistema de protección contra el Golpe de Ariete, depósitos de regulación y/o compensación, entre otros objetos de obra secundarios. Los sistemas fuente pueden clasificarse en sistemas fuente por bombeo o por gravedad.[7]

Podemos afirmar que una red de distribución es un conjunto de elementos encargados del transporte del agua desde los puntos de producción y/o almacenamiento hasta los puntos de consumo: viviendas, comercios, industrias, hidrantes de riego e incendios, etc. La red está constituida básicamente por tuberías y elementos especiales: (Válvulas, accesorios, hidrantes, elementos de unión, elementos de medición, etc.) Que deben ser dimensionados adecuadamente para suministrar los caudales demandados, para lo cual será necesario mantener en la red unas presiones mínimas como premisas de cálculo según establecen las normas correspondientes.

Nuestro país pretende alcanzar un mayor nivel de desarrollo, tanto en aspectos sociales como económicos, sin embargo esto no es posible si no se resuelven problemas relacionados con el aprovechamiento y control de los recursos disponibles.

En este trabajo se analizan variantes de regulación para el abastecimiento de agua a una ciudad de 90 000 habitantes según caso de estudio hipotético, con el propósito de evaluar económicamente cada una de las soluciones presentadas, lo cual permitirá ofrecer criterios importantes a tener en cuenta en el momento de enfrentarse a un caso de estudio real, que permita proponer la mejor solución ingenieril tomando en consideración el consumo energético correspondiente.

### **Situación Problemática**

Existen empresas e instituciones en nuestro país que se ven en la necesidad de utilizar herramientas informáticas que posibilitan la modelación y simulación hidráulica con el objetivo de poder evaluar la operación de los sistemas de abastecimiento de agua considerando parámetros reales. Estas herramientas permiten el análisis de variantes para encontrar soluciones que sean factibles desde el punto de vista técnico-económico con un ahorro considerable de tiempo, lo cual puede considerarse de mucha importancia para la toma de decisiones asociadas a las inversiones futuras que se pretenden realizar. No siempre las soluciones que se presentan en proyectos ingenieriles resultan económicas, pues en las mismas se dejan de tener en cuenta un grupo de factores importantes que intervienen en el diseño, para que este se ajuste a la realidad y que a largo plazo defina la mejor solución.

## **Planteamiento del Problema**

¿Cómo lograr en el diseño hidráulico de sistemas de abastecimiento de agua, una solución que se justifique desde el punto de vista técnico económico, utilizando herramientas informáticas para este fin y para su simulación hidráulica?

## **Hipótesis**

Si consideramos en la modelación factores como el consumo de agua durante las 24 horas del día y durante los 365 días del año, y la tarifa eléctrica a aplicar en los diferentes horarios del día, entonces será posible obtener los costos de explotación reales de un sistema de abastecimiento de agua, que unidos con los costos totales de inversión y mantenimiento de acuerdo con la tecnología empleada para su regulación, definirán la variante más económica.

## **Campo de la Investigación**

Diseño y simulación de redes de abastecimiento de agua empleando técnicas de modelación matemática.

## **Objetivos generales**

Ofrecer criterios a tener en cuenta en la etapa de proyecto que posibiliten una valoración técnico económico de un sistema de abastecimiento de agua urbano, y puedan avalar la solución ingenieril propuesta con empleo de un modelo de simulación hidráulica.

## **Objetivos específicos**

- 1- Efectuar el diseño óptimo de una red de abastecimiento de agua empleando el programa ROKO – ROCT, con su correspondiente simulación hidráulica obtenida de la aplicación del software profesional EPANET 2.0.
- 2- Desarrollar diferentes simulaciones en EPANET 2.0 bajo diferentes condiciones de operación de acuerdo con la variante analizada para permitir validar su diseño.
- 3- Realizar una valoración económica teniendo en cuenta los resultados obtenidos en las simulaciones de cada variante analizada, considerando los costos implicados y utilizando técnicas de análisis financiero.

## **Métodos de investigación**

- Métodos matemáticos: Al hacer uso de programas informáticos existentes con el objetivo de desarrollar las bases del modelo de simulación hidráulica.
- Métodos teóricos: El método hipotético-deductivo utilizado en la elaboración de la hipótesis y como método guía para la obtención progresiva de resultados parciales.

- Método histórico-lógico y dialéctico: empleados en el análisis crítico de los trabajos precedentes que forman parte de la bibliografía existente, extrayendo aspectos interesantes de ellos, a fin de organizar una línea de desarrollo histórico – lógica de esta temática, para que sean tomados como punto de referencia y constatar el alcance de los resultados alcanzados.
- Método de análisis-síntesis: para analizar los métodos que se emplean para abordar el problema del diseño hidráulico de los sistemas de abastecimiento de agua, que constituyen los acueductos urbanos, desarrollando una síntesis de éstos, resumiendo sus esferas de acción y aplicación.
- Método de inducción-deducción: se utiliza para analizar y profundizar en el estudio de los factores que deben considerarse para enfrentar el diseño hidráulico de los sistemas de abastecimiento de agua con el objetivo de inducir y deducir tendencias, regularidades y perspectivas comunes empleadas en este tema de investigación.

### **Aportes del Trabajo**

Los aportes y resultados prácticos alcanzados en este trabajo se centran en el desarrollo de métodos que permitirán obtener el diseño óptimo de sistemas de abastecimiento de agua en acueductos urbanos y demostrar la potencialidad de las herramientas informáticas empleadas con esta finalidad.

### **Estructura de la investigación**

**Capítulo 1.**Fundamentos Teóricos del Diseño de Sistemas de Abastecimiento de Agua en Acueductos Urbanos con empleo de Equipos de Bombeo.

**Capítulo 2.**Diseño y Simulación de Alternativas Aplicadas a un Sistema de Acueducto Urbano.

**Capítulo 3.** Comparación Económica entre las Variantes de Regulación Analizadas.

# CAPÍTULO 1

# Capítulo 1.

## 1. Fundamentos Teóricos del Diseño de Sistemas de Abastecimiento de Agua en Acueductos Urbanos con empleo de Equipos de Bombeo.

### 1.1. Sistemas de abastecimiento de agua.

Se puede definir como sistema de abasto de agua al conjunto de tuberías, instalaciones y accesorios destinados a conducir las aguas requeridas por una población determinada para satisfacer sus necesidades, desde su lugar de existencia natural o fuente, hasta el hogar de los usuarios. [9]

Las redes de distribución deben cumplir los siguientes requisitos:

- Suministrar agua potable a todos los usuarios en la cantidad y calidad requerida.
- Proveer agua para el combate de incendios en cualquier punto del sistema.
- Proveer agua para otros usuarios tales como fuentes, servicios públicos, etc.

### 1.2. Uso eficiente del agua en zonas urbanas.

El uso eficiente del suministro de agua en zonas urbanas, es la estrategia que se utiliza para lograr la optimización de este recurso incluyendo la contenida infraestructura de acueducto, con la participación de todos los consumidores para establecer y complementar metas que garanticen su ahorro.

Las principales acciones del uso eficiente son: la recirculación, el rehúso, la reducción del consumo, y la detección y reparación de fugas. Las actividades básicas que lo controlan son: la medición y el monitoreo de la calidad del agua que se suministra a los consumidores.

El uso eficiente del agua desencadena un grupo de beneficios socio-económicos en general, como los que se presentan a continuación:

- Menor explotación de las fuentes de abastecimiento de agua.
- Mayor calidad del agua que se consume.
- Disminución de la necesidad de inversión en nuevas obras de acueducto.
- Mayor facilidad para tratar las aguas residuales.
- Menor cantidad de agua residual.
- Disminución de la necesidad de inversión en nuevas obras de alcantarillado.
- Disminución del riesgo de contaminación de los cuerpos receptores.
- Menor consumo de energía eléctrica.

### **1.3. Elementos que componen un sistema de abastecimiento. [15]**

Generalmente los sistemas de abastecimiento de agua potable están compuestos por los siguientes elementos:

- Fuentes de suministro.
- Equipos de bombeo.
- Tanques de almacenamiento.
- Conductoras.
- Redes de distribución.
- Elementos complementarios.

#### **1.3.1. Fuentes de suministro.**

La fuente de abasto es el aspecto principal en la elaboración de un proyecto de acueducto, por lo que no debe iniciarse el diseño de otros elementos sin tener garantizado el caudal de circulación necesario. El agua para el consumo humano puede clasificarse en agua pura, potable, sospechosa o mala; pero de acuerdo a su captación pueden ser subterráneas o superficiales. Las aguas subterráneas se pueden obtener de cuevas, ríos subterráneos, manantiales, galerías de infiltración o pozos perforados. Este tipo de abastecimiento por lo general no necesita una planta de tratamiento. Las aguas superficiales se obtienen de ríos, lagos, arroyos, lagunas o presas; pero en este tipo de fuente es imprescindible el tratamiento de las aguas mediante plantas potabilizadoras.

#### **1.3.2. Equipos de Bombeo.**

La primera clasificación posible de las bombas es separarlas en el grupo de bombas de desplazamiento positivo y bombas rotodinámicas.

Las primeras operan de forma volumétrica: desplazan un determinado volumen por unidad de tiempo, independientemente de la presión. Son bombas de émbolos, paletas, engranajes, etc., donde se requieren unos caudales ínfimos con presiones muy elevadas.

Las bombas rotodinámicas, en cambio, consiguen incrementar la energía del fluido a base de aumentar la energía cinética -por medio de la deflexión y el efecto centrífugo que provocan los álabes del rodete- recuperando esta energía posteriormente en forma de presión.

La principal forma de clasificación de las bombas rotodinámicas es separarlas en bombas axiales, mixtas y radiales, según la dirección de salida del flujo con respecto al eje.

El nombre común para las radiales es *bombas centrífugas*, a pesar de que algunos autores utilizan este término para referirse a todo el conjunto de bombas rotodinámicas.

La utilización de bombas axiales está indicada cuando se necesitan grandes caudales con pequeñas alturas de elevación. Las centrífugas, cuando se necesitan grandes alturas y pequeños caudales. Las bombas mixtas constituyen un caso intermedio.

Hay otras muchas características que hacen a las bombas susceptibles de clasificaciones distintas, y así se pueden tener bombas de una o varias etapas, bombas de cámara partida, bombas auto-aspirantes, bombas sumergibles, bombas horizontales o verticales, etc.

Uno de los parámetros más importantes es que las bombas tengan un rendimiento óptimo lo más cerca posible del punto de trabajo habitual. No resulta rentable elegir una bomba sobredimensionada con vistas a posibles ampliaciones futuras del sistema.[11] pág. 70.

Algunas bombas tienen curvas  $H-Q$  con pendiente positiva en la zona de caudales inferiores. Es conveniente alejarse de esas zonas porque se puede producir un funcionamiento inestable de la instalación. [11] pág. 51.

El rendimiento es máximo en el punto llamado *de diseño* de la bomba, y disminuye tanto para caudales superiores como inferiores. Normalmente, tanto la potencia como el rendimiento se refieren únicamente a la bomba, sin tener en cuenta el motor que se utiliza para accionarla. Los valores máximos de rendimiento se encuentran entre el 85% y el 90%.[11] pág. 52.

### **1.3.2.1. Empleo de Bombas en serie y en paralelo**

Para colocar bombas en serie, y sobre todo en paralelo, es conveniente que sean similares, mejor aún si son idénticas, para evitar que alguna de ellas trabaje en una zona poco adecuada.[11] pág. 55.

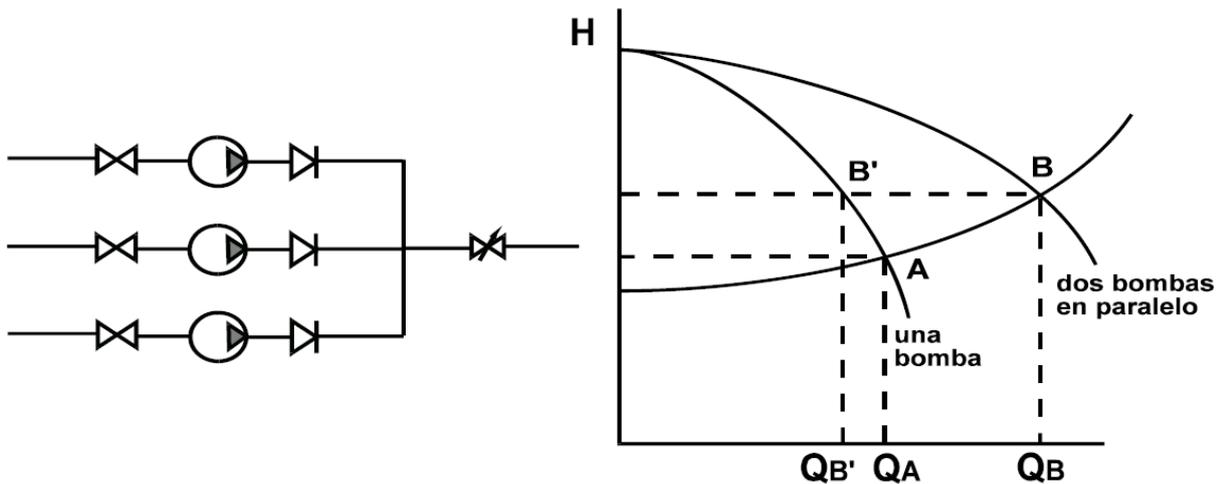
En la práctica hidráulica no es tan común el empleo de bombas en serie, excepto en el caso de bombas en pozos profundos que son axiales y se usan varios impelentes en serie.

El caso de bombas en paralelo es más frecuente para sistemas de abasto de cierta magnitud. Es muy importante hacer notar que el caudal con dos bombas iguales siempre será menor que dos veces el caudal de una sola porque el comportamiento real viene dado por el punto de operación y éste viene de la curva del sistema que se inclina hacia arriba. De hecho, y por esta misma razón, cada bomba que se añade en paralelo incrementa un gasto cada vez menor al anterior.[5]

Utilizar varias bombas en paralelo es útil cuando se exige una gran variación de caudal. La fiabilidad del servicio es otra de las ventajas. Es frecuente encontrar tres bombas en paralelo cada una con una capacidad del 50%. Así se puede hacer trabajar una o dos bombas según el caudal requerido, y tener otra en previsión de averías y para mantenimiento.

De esta forma se aumenta mucho la seguridad sin elevar demasiado los costes de instalación, (otra opción es cuatro bombas, cada una con capacidad del 33%). [11] pág. 100.

**Figura 1.1 Esquema de 2 bombas en paralelo y 1 de reserva instalada.**



**1.3.2.2. Leyes de semejanza aplicadas al caso de variación en la velocidad de giro.**

Una forma sencilla de obtener una amplia gama de prestaciones consiste en cambiarla velocidad de giro de la bomba ( $\omega$ ). Esto se puede conseguir si se utiliza un motor de corriente continua, uno de alterna con variador de frecuencia, o un convertidor hidráulico, por ejemplo:

Al variar únicamente la velocidad, no sólo se respeta la semejanza, sino que al ser la bomba la misma,  $D1=D2$ , y las ecuaciones que relacionan las curvas características a una y a otra velocidad se reducen a:

- El gasto Q es proporcional a  $\omega$  ---->  $Q1 / Q2 = (\omega1 / \omega2)$
- La carga H es proporcional a  $\omega^2$  ---->  $H1 / H2 = (\omega1 / \omega2)^2$
- La potencia P es proporcional a  $\omega^3$  ---->  $P1 / P2 = (\omega1 / \omega2)^3$

Para el cálculo se escogen puntos H, Q y P de la bomba original y se calculan puntos homólogos de la nueva situación. Como que estas variaciones no pueden ser muy grandes se acepta que la eficiencia es la misma en los puntos homólogos.[11] pág. 61.

Desde el punto de vista hidráulico, la variación de velocidad es el método óptimo de regulación, pero también tiene a veces algunos inconvenientes. La principal ventaja frente a la regulación con válvulas es el ahorro de energía. Esto es significativo si se va a trabajar a menudo fuera del punto de diseño. En el punto de máximo rendimiento las pérdidas del sistema de variación de velocidad lo hacen menos eficaz que una bomba sola bien seleccionada. Otra de las ventajas es la facilidad de regulación, aunque esto depende del sistema de accionamiento.[11]

El inconveniente principal es el coste del sistema de variación de velocidad. También hay que tener en cuenta que las características hidráulicas del sistema pueden hacer que su funcionamiento no sea rentable.[11]

Normalmente, las bombas no se suelen accionar a velocidades mayores que las de diseño por cuestiones mecánicas: cojinetes, juntas..., porque aumenta el NPSHr, y porque con algunos accionamientos no es físicamente posible.[11] pág. 117.

### 1.3.3. Tanques de almacenamiento

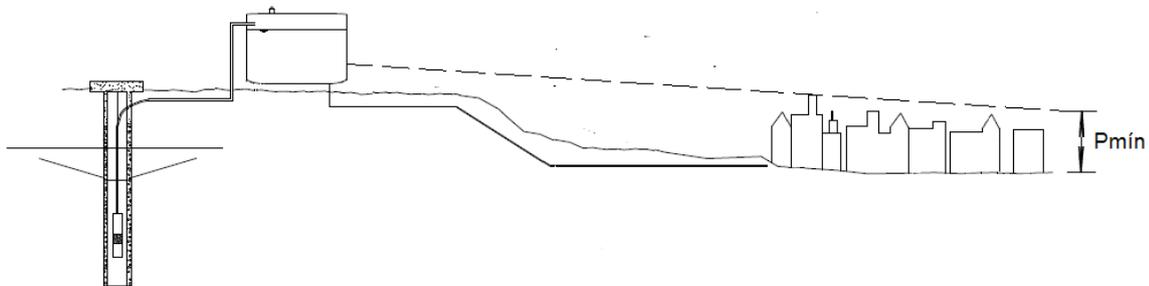
Debido a que el consumo por parte de la población no es constante, sino que, varía según la hora del día, y dado que el suministro es un caudal teóricamente constante, es necesario la construcción de un tanque de almacenamiento que suministre agua a la hora de mayor consumo, para amortiguar los picos de la demanda máxima horaria en la red de distribución.

La función básica del tanque es almacenar agua en los períodos donde la demanda es menor que el suministro, de tal forma que en los períodos que la demanda sea mayor que el suministro, se complete el déficit con el agua almacenada en el tanque.

Además el almacenamiento permite brindar presiones adecuadas en la red de distribución y disponer de reserva ante eventualidades e interrupciones en el suministro de agua.

Los tanques pueden ser construidos sobre el terreno (superficial, semi-enterrado, enterrados) si se dispone de un desnivel topográfico adecuado que permita el funcionamiento de la red de distribución bajo las normas adecuadas de presión. En el caso de no disponer de la condición topográfica anterior, se debe proyectar un tanque elevado, sobre torre.

**Figura 1.2 Esquema del funcionamiento de un tanque de distribución.**



El material de construcción del tanque puede ser de concreto, mampostería o metal; su forma puede ser rectangular o circular.

En teoría la red de distribución resulta más económica si el tanque se localiza en el centro de gravedad de la población; sin embargo, por razones de espacio, estética y seguridad, lo anterior casi nunca es posible.

#### 1.3.3.1. Capacidad del tanque de almacenamiento:

El volumen del tanque debe ser calculado en base a los datos de consumo de la población y su distribución horaria. La distribución horaria de consumo de una población depende en gran parte de las costumbres de sus habitantes.

### **1.3.4. Conductoras.**

Las conductoras son las tuberías encargadas de conducir el agua desde la fuente de abasto hasta el tanque o hasta el inicio de la red de distribución. Las tuberías empleadas para este fin, pueden ser de distintos materiales como por ejemplo: Termoplásticas, plástico reforzado con fibra de vidrio, acero, hormigón centro acero, asbesto cemento, entre otros.

Cada material cuenta con varios sistemas de unión y con una amplia gama de elementos accesorios (reducciones, ampliaciones, codos, etc.). Asimismo, existe una gran variedad de piezas capaces de realizar la transición entre dos materiales diferentes o entre los diferentes materiales y los diversos elementos a instalar (válvulas, hidrantes, caudalímetros, etc.).

Pueden clasificarse:

1- Atendiendo al origen de la energía disponible para transportar el flujo:

- Conductoras de gravedad: Son aquellas en las que el agua fluye por una diferencia de nivel entre dos puntos del sistema.
- Conductoras de bombeo: En este caso es necesario imprimirle una energía adicional al fluido (bombeo) para vencer una diferencia de nivel adversa entre dos puntos del sistema.

2- Atendiendo al régimen de circulación del flujo:

- Conductora a presión: En las que el fluido circula a presión en todo momento dentro del conducto.
- Conductora libre: Son aquellas en las que el flujo circula en una sección parcialmente llena del conducto a lo largo de este.
- Conductora mixta: Son aquellas en las que el fluido circula a presión por un tramo del conducto y libre por otro.

### **1.3.5. Redes de distribución.**

En el caso de las redes de distribución, los elementos constituyentes son principalmente las tuberías, depósitos, estaciones de bombeo, válvulas, etc.

#### **1.3.5.1. Tipos de redes de abastecimiento según su topología:[9]**

Atendiendo a como están conectadas las tuberías entre sí se pueden distinguir los siguientes tipos de redes:

- Ramificadas.
- Malladas.
- Mixtas.

Una red ramificada pura solo puede tener un punto de alimentación, ya que en caso contrario pasaría a ser mallada, pues sólo con la ecuación de continuidad no sería posible determinar la proporción de caudal que debería entrar desde cada uno de los puntos de alimentación.

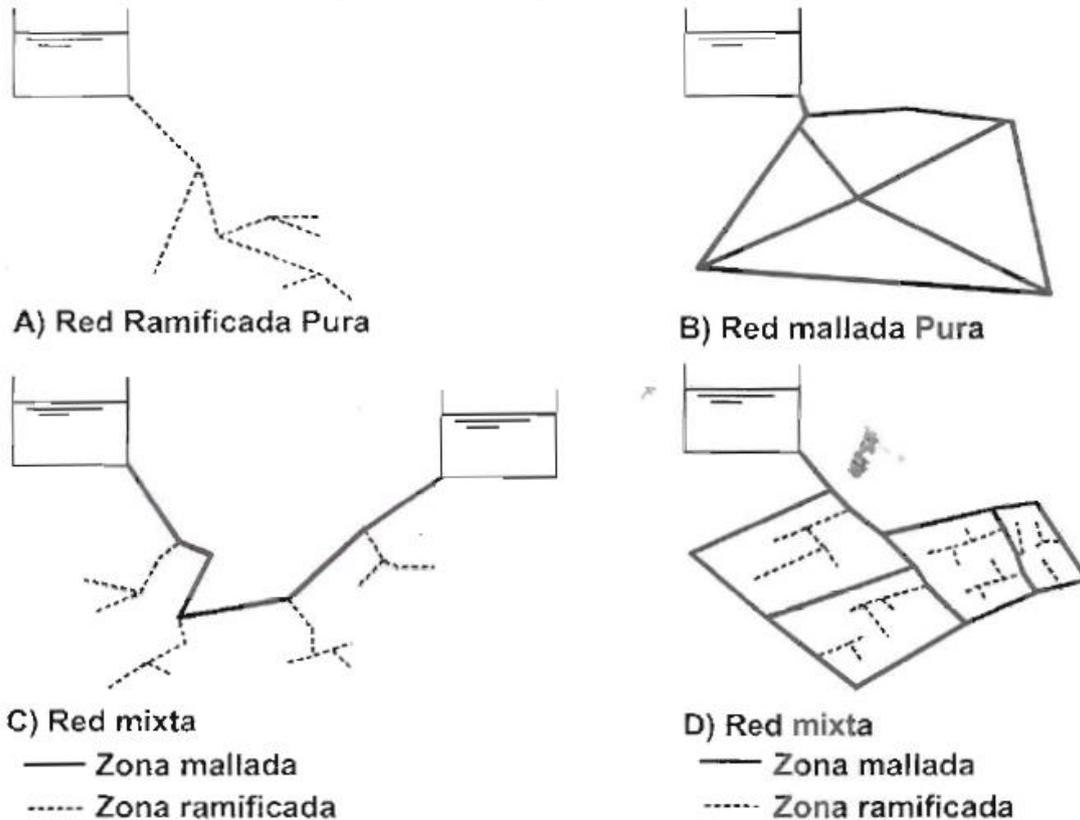
En las redes malladas, los caudales circulantes por las conducciones no quedan definidos aplicando únicamente las ecuaciones de continuidad, sino que es necesario para determinarlos, utilizar ecuaciones de equilibrio de mallas.

En redes mixtas, se podrán calcular de forma inmediata los caudales circulantes en las arterias ramificadas, pero no en las mallas.

En los sistemas ramificados el agua solo puede seguir un camino para llegar a cada uno de los nodos del sistema, mientras que en los malladas las posibilidades son múltiples: como mínimo son posibles dos caminos diferentes. Ello se traduce en una mayor seguridad en el suministro, pues en caso de corte en una conducción existen caminos alternativos para la alimentación de los nudos de la red que hayan quedado desabastecidos. Esta es la principal razón por la que se utilizan redes malladas en los sistemas de abastecimiento sobre todo en las conducciones principales que abastecen a un gran número de usuarios. En otro tipo de redes tales como las redes de riego, las redes de suministro interiores en viviendas o redes de servicio de industrial el valor de la garantía de suministro es menor y por ello con frecuencia suelen ser ramificadas.

Algunos esquemas que aclaran estos conceptos, se presentan en la figura siguiente:

**Figura 1.3 Tipos de redes según la topología. Tomada de[9]**



**1.3.6.Elementos complementarios de un sistema de abastecimiento de agua.[12]**

Como elementos complementarios pueden agruparse de acuerdo con la función que realizan estos en: válvulas, elementos de medida y control, y otros elementos a instalar.

**1.3.6.1. Válvulas:**

Las válvulas están presentes en un gran número en una red de distribución, realizando diversas funciones. La mayoría de ellas se utilizan como elementos que permiten aislar tramos de la red de distribución para realizar operaciones de mantenimiento. Para este tipo de válvulas, a título orientativo se recogen las cifras correspondientes a una ciudad española de unos 500 000 habitantes:

- 10 válvulas por cada km de tuberías(valor medio)
- 3 válvulas por ha (centro ciudad)
- 15 válvulas por km de tubería (centro ciudad)

Las válvulas a instalar en una red de distribución puede clasificarse, con arreglo a la función que desempeña, en:

- Válvulas de seccionamiento.
- Válvulas de control.
- Válvulas de retención.
- Válvulas de regulación.

- Ventosas.
- Válvulas de protección.
- Válvulas de control de depósitos.

### **1.3.6.2.Elementos de medidas y control.[12]**

Su finalidad es la de proporcionar un conocimiento de las principales variables físicas que nos indiquen el estado de la red .Aunque su utilización es siempre recomendable y en algunos casos resulta imprescindible (sobre todo en sistemas complejos y/o de grandes dimensiones),en la práctica su uso está limitado por cuestiones económicas. No incluimos dentro de esta descripción a los contadores de los abonados, sin duda los más ampliamente presentes.

Además las variables que podríamos denominar hidráulicas (presión, nivel y caudal o volumen) existen una serie de variables adicionales que es preciso conocer, como por ejemplo, posición de válvulas, estado de bombas, velocidad de giro de las mismas. Asimismo, es necesario disponer de datos de variables de tipo eléctrico, potencia, tensión, energía consumida, etc.

### **Los principales tipos de medidores que puede encontrarse en una red de abastecimiento de agua son:[12]**

- Medidores de presión.
- Medidores de nivel.
- Medidores de caudal / volumen.
- Medidores de cloro.

### **Otros elementos a instalar.**

Entre los otros elementos a instalar para que cumplan determinada función, se encuentran los siguientes:

- Desagües.
- Bocas de riego.
- Hidrantes de extinción de incendios.
- Acometidas.

## **1.4. La Regulación en redes de acueducto. [12] pág. 187**

Las redes de distribución tienen como misión satisfacer las necesidades de agua potable de los usuarios de la misma.

Hidráulicamente, caudales circulantes por la variedad en el tiempo suponen distintos estados hidráulicos en la red: diferentes necesidades energéticas, distintos estados de presión, condiciones de calidad de agua, etc.

Si bien la curva resistente no se puede calcular, los patrones de demanda sí que se pueden pronosticar, basándose en los hábitos de consumo. Es por ello que, siendo conscientes de cómo y por qué se produce la variación del consumo, se trabaje frecuentemente con las curvas de modulación de la demanda en lugar de con las curvas resistentes de los sistemas hidráulicos.

La curva de consigna de una determinada red de distribución, se define como la altura mínima que tiene que haber en cabecera de la red en cada instante para que en el punto de consumo más desfavorable de la misma se satisfaga la demanda de caudal con el valor de presión residual mínima que garantiza el servicio.

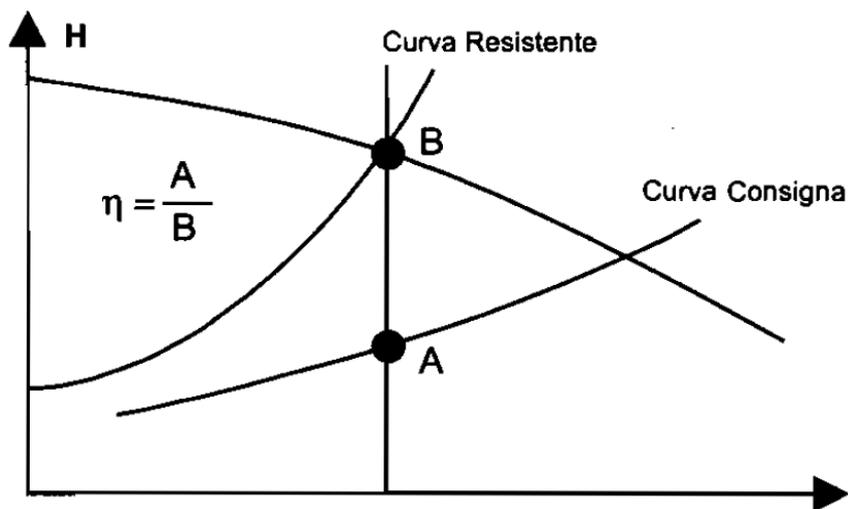
La curva de consigna refleja la altura con la que se satisface cada demanda con la mínima energía posible, y por tanto con menor coste posible.

Para valorar lo bien o lo mal que está regulando una instalación, se va a comparar en todo momento, y para el caudal de funcionamiento, la altura motriz del sistema con la altura mínima necesaria definida por la curva de consigna.

Teniendo en cuenta que el producto de la altura piezométrica de impulsión por el caudal es proporcional a la potencia de impulsión, se define el rendimiento en regulación como el cociente entre la potencia mínima necesaria para satisfacer las demandas en los puntos de consumo,  $P_c$ , y la potencia hidráulica cedida al fluido en la impulsión,  $P_f$ , según el modo de regulación.

$$\eta = P_c / P_f$$

**Figura 1.4 Rendimiento de la regulación.**



Obviamente, el problema de la regulación es tan antiguo como los abastecimientos mismos, de manera que existen diversas soluciones desde hace bastante tiempo. De una manera muy simplificada podemos clasificar la regulación en dos tipos bien diferenciados: mediante depósitos o mediante inyección directa a la red.

### **1.4.1.Regulación mediante depósitos.[12]**

Desde un punto de vista energético, la utilización de depósitos como fuente de alimentación no es la óptima a causa de la rigidez que tiene el sistema. Esto significa que, una vez construido el depósito, la cota de mismo es un invariable que permanece constante (salvo los pocos metros que varía durante el llenado y vaciado) a lo largo de todas las horas del día y todos los años de vida útil.

Junto con la poca eficiencia desde el punto de vista energético a causa de su rigidez (lo cual ya ha sido comentado), otros problemas que plantea la utilización de depósitos son debidos a la necesidad de cota en el terreno. Si no existe cota suficiente, la opción de construir un deposito elevado es muy problemática, fundamentalmente, por dos causas: su excesivo precio par volúmenes un poco grande y, cada vez más, el enorme impacto ambiental que provocan.

No obstante, hay que comentar que la regularidad del suministro eléctrico, la cálida del material electromecánico y sus continuos avances, el mallado de las redes, las consideraciones sobre la calidad del agua y sobre todo, el ahorro en inversión y gastos energéticos, han puesto hoy en tela de juicio la necesidad de los depósitos reguladores por gravedad. En cualquier caso, no podemos obviar la existencia de numerosos depósitos en la gran mayoría de los abastecimientos actuales.

### **1.4.2. Regulación mediante inyección directa a la red.[12]**

Las estaciones de bombeo para inyectar agua directamente a la red, equipadas con grupos de velocidad fija y/o variable, se presentan como una solución alternativa muy interesante a la construcción de depósitos elevados de gran capacidad. La razón principal por la cual la inyección directa puede sustituir a estos depósitos es, o bien que el coste económico de los mismos resulta prohibitivo, o bien que la construcción de un depósito elevado causa un impacto ambiental excesivo en la arquitectura urbana de la ciudad. Así pues, en el caso de ciudades cuya topografía es eminentemente llana, este sistema de abastecimiento resulte frecuente.

La inyección directa a red inconvenientes desde el punto de vista de la seguridad,pues si bien la presencia del depósito en la aspiración permite cumplir las exigencias en cuanto a volumen de reserva almacenado,no quedaria en cambio asegurado su transporte hasta la red.

La solución óptima al problema de la regulación,y la que mejores rendimientos proporcionan,consiste en regular la velocidad de giro de las bombas.Variando la velocidad de giro es posible hacer pasar en cada momento la curva motriz por el punto de la curva de consigna correspondiente al caudal solicitado.El número de revoluciones vendrá fijado por un circuito de control convenientemente diseñado.

### 1.4.3. Bombas de velocidad fija conectadas en paralelo.[12]

La regulación se consigue arrancando y parando las bombas que, asociadas en paralelo, equipan la estación de bombeo. Las señales de arranque y parada de las bombas se establecen en base a unos niveles de presión mínima y máxima.

La presión mínima es aquella que garantiza el servicio en el punto y en las condiciones más desfavorables, o sea, para cuando se impulsa el caudal máximo de la instalación.

La presión máxima es tal que la instalación se podrían producir problemas de roturas. Generalmente se establece como un margen sobre el valor de presión mínima.

### 1.4.4. Bombas de velocidad variable conectadas en paralelo.

Las leyes de la semejanza en turbomáquinas establecen las curvas de comportamiento de una bomba cuando gira de diferente velocidad de la nominal. La expresión de la altura de la bomba en función del caudal es:

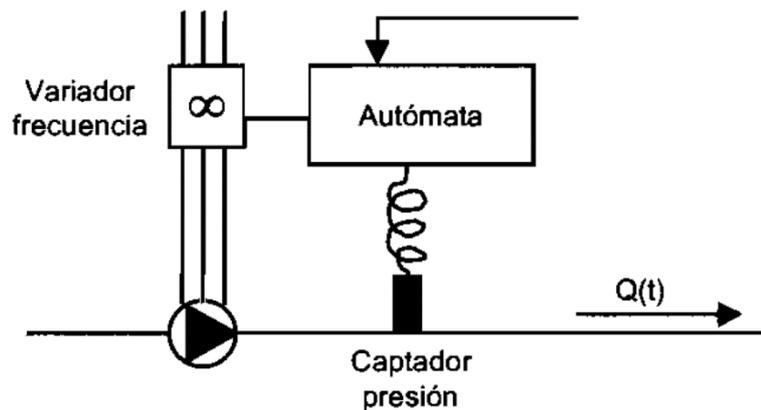
$$H = A \alpha^2 - B_0 \alpha Q - C_0 Q^2$$

Donde  $\alpha$  es la relación entre la velocidad de giro  $N$  y la velocidad nominal  $N_0$ . La expresión indica que la velocidad es menor que la nominal la curva de la bomba está por debajo de la curva nominal.

Aunque no es el único modo de variación de velocidad de giro que ha sido utilizado en estaciones de bombeo, la tendencia actual es a utilizar los variadores de la frecuencia de corriente alterna que se suministra al motor como el elemento que produce la variación de la velocidad.

El sistema de control está formado por un transductor de presión, un medidor de caudal, o ambos, ubicados en la impulsión de la bomba. La señal de presión o de caudal es enviada a un autómata programable que la compara con la consigna que le ha sido programada. En función de la discrepancia que observe, permitiendo un margen de seguridad, manda una señal a un variador de frecuencia que modifica la frecuencia de la red y le hace llegar al motor, corriente alterna a una nueva frecuencia.

**Fig. 1.5 Sistema de control de bombas de velocidad variable.**



Cuando el mecanismo de modificación de la velocidad de giro es un variador de frecuencia, la velocidad de giro del motor es función de la frecuencia de la corriente alterna que alimenta el motor eléctrico, y que evidentemente es conocida por el variador. Por tanto, no se efectúa con control sobre la velocidad de giro como tal sino sobre la frecuencia de la corriente de alimentación.

La velocidad de sincronismo del motor y la frecuencia de la corriente están relacionadas, para motores asíncronos, por el número de pares de polos del motor, según la expresión:

$$N = \frac{60f}{np}$$

Donde  $N$  es la velocidad de sincronismo del motor (que salvo el valor del deslizamiento, coincide con la velocidad de giro del motor),  $f$  es la frecuencia de la corriente en Hz, y  $np$  es el número de pares de polos.

La velocidad de giro se puede reducir hasta un punto en que la bomba no impulsa caudal. Conviene que el sistema de control detecte tal situación para que, si permanece en el tiempo, parar definitivamente la bomba y evitar que pueda estar girando a caudal nulo.

El caudal nulo se producirá cuando la altura de aspiración más la altura a válvula cerrada de la bomba a una determinada velocidad de giro sea igual a la altura de la consigna.

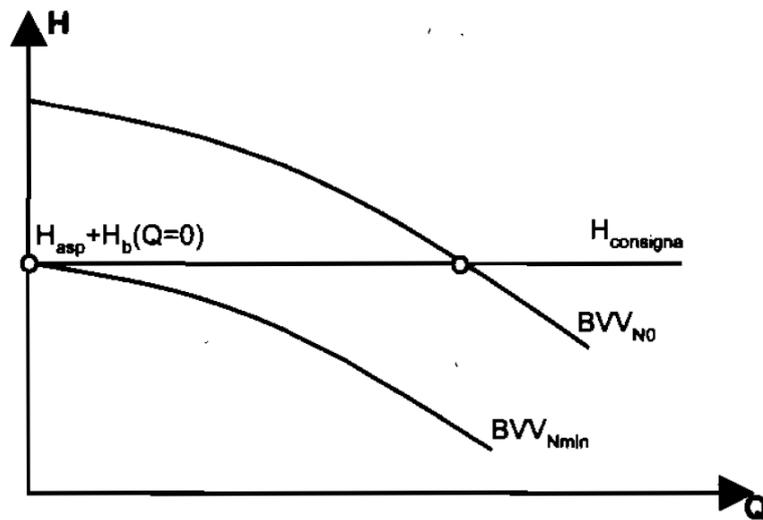
Esta velocidad de giro, que se puede considerar como mínima, se determina despejando la condición anterior:

$$H_b(Q=0) = A \alpha_{min}^2 = H_{consigna} - H_{asp}$$

$$\alpha_{min} = \frac{N_{min}}{N_0} = \sqrt{\frac{H_{consigna} - H_{asp}}{A}}$$

$$N_{min} = N_0 \sqrt{\frac{H_{consigna} - H_{asp}}{A}}$$

Fig. 1.6 Rango de regulación de la velocidad de giro.



#### 1.4.5. Regulación compartida entre bombas de velocidad fija y velocidad variable.[12]

La estación de bombeo de regulación compartida está compuesta por una única bomba de velocidad variable (BVV) asociada en paralelo con tantas bombas de velocidad fija (BVF) como sea necesario para la instalación.



BVV por debajo del valor mínimo. El autómata entonces para la BVF y pone la BVV a su velocidad nominal.

Para poder parar la BVF, estando la BVV en marcha, se debe asegurar que el caudal que impulsa la BVV a su velocidad nominal debe ser igual que el que impulsaba la asociación en paralelo de la BVF y la BVV a  $N_{\min}$ . La altura de impulsión, tanto para la BVF como para la BVV, es la misma, la altura de consigna.

### **1.5. Diseño óptimo de una red de abastecimiento de agua.[14] Pág. 62**

El diseño de cualquier sistema implica su completa definición en cuanto a elementos constituyentes, disposición y dimensiones de los mismos. En el caso de las redes de distribución, dichos elementos son principalmente las tuberías, depósito, estaciones de bombeo, válvulas, etc.

Presentamos a continuación de forma resumida el conjunto de datos previos que resultan necesarios para acometer el diseño de una red de distribución, entre los que destacan: [14]

- Necesidades de caudal: distribución espacial y temporal.
- Necesidades de presión.
- Posibles trazados de las conducciones (layout). Características de los elementos de inyección y almacenamiento.
- Topografía del terreno.
- Diámetro de las conducciones.
- Materiales.
- Velocidades de circulación permitida y aconsejable.

Si los requisitos para el diseño son compatibles entre sí, existirá una infinidad de configuraciones posibles que verifiquen tales premisas. Aparece así el concepto de red más económica: podemos definir la solución óptima desde el punto de vista económico como aquella que representa el menor coste conjunto de inversión más explotación entre todas aquellas que verifican las condiciones de consumo y presiones de operación requeridas.

El diseño de las redes urbanas de abasto de agua se realiza sobre la base de satisfacer la demanda de la población que sirve. Esta demanda aún para una población constante es variable según la temporada del año, los días de la semana y las horas del día. Para analizar esta variabilidad sería necesario mantener un sistema regular de mediciones que permitiera conformar un registro histórico, es decir, una serie observada de las demandas.[17]

En la práctica no siempre se cuenta con estas observaciones y, por lo tanto, se han establecido normas de diseño basadas en estudios y experiencias anteriores en cuanto a la observación de la demanda, que suplen esta ausencia. Las normas

estipulan que la red debe satisfacer la demanda en la situación más crítica, es decir, satisfacer la máxima demanda.

### **1.6. Modelación matemática de redes hidráulicas de distribución.**

El modelo matemático es la base que se utiliza en el cálculo hidráulico para simular diferentes estados que se producen en la red de distribución, sin tener que llegar a experimentarlos físicamente. Del resultado de dichas simulaciones se extraen luego consecuencias que serán utilizadas en la planificación y gestión de la red. [12]

El proceso de elaborar un modelo matemático supone recopilar toda la información existente de la red y tratarla para que pueda ser asimilada por los programas de análisis y simulación. En el caso de una red de nueva ejecución el problema está prácticamente resuelto, pues la información existente proviene de los parámetros de diseño.

La dificultad se presenta en las redes en servicio, donde los parámetros con los que se proyectó la red se han modificado por el propio funcionamiento de ésta. El conocimiento de qué parámetros, y las circunstancias que hacen que varíen, son fundamentales a la hora de estimarlos. Algunas de las circunstancias que producen tal variación son:

- Modificación del diámetro y rugosidad original de las conducciones por depósito de sales, cal y óxidos, aumentando las pérdidas de carga.
- Desconocimiento de las pérdidas menores producidas en juntas, codos, térs, reducciones, etc., imposibles de cuantificar. Generalmente se tienen en cuenta como longitudes equivalentes de tuberías.
- Pérdida de carga en las válvulas de cierre que, por condiciones de funcionamiento, no quedan perfectamente cerradas o abiertas durante alguna maniobra, y cuyo estado es difícil de saber.
- Distribución de consumos en la red en un instante determinado, debido a la aleatoriedad en la demanda. Los valores medios se pueden saber en base a facturaciones, pero su modulación a lo largo del día es difícil de predecir.
- Desconocimiento del valor de las fugas, de su localización, y de los errores de los contadores, que añaden incertidumbre a la asignación de cargas a la red.
- Las mediciones, necesarias para la fase de ajuste del modelo, están afectadas de errores en los aparatos de medida, en la lectura y en las fluctuaciones de la variable que se mide.
- Errores en la determinación de la cota de los nudos de presión desconocida. En el análisis hidráulico del sistema se calculan alturas piezométricas, posteriormente se obtiene la presión restando el valor de la cota. El error en la determinación de la cota es directamente, error en el valor de presión en el nudo.

Todas estas indeterminaciones van a condicionar el proceso de elaboración del modelo matemático de la red en servicio para que se garantice su calibración.

La calibración puede definirse como el proceso de ajuste de las características del modelo (parámetros) para reflejar mejor el funcionamiento real del sistema.

### **1.7. Programas para el diseño de los sistemas de abastecimiento de agua.**

Para la confección de los modelos que se expondrán en este trabajo se necesita un programa de cómputo que permita simular los diferentes elementos de la red y un algoritmo de cálculo rápido y confiable a fin de que puedan generar y ajustar los balances hídricos en el menor tiempo posible y con la mayor confiabilidad. Existen en los mercados diversos software que cumplen estas características entre los que están el Urbanet, Hidrojet, PICCOLO de la Safege (Francia), EPANET de la US-EPA (EUA), KYPIPE de la Universidad de Kentucky (EUA), el STONER de Stoner Workstation Services (EUA), WaterCAD y WaterGEMS de Haestad Methods (EUA), SARA (Software de Análisis de Redes de Agua): desarrollado en la Universidad Politécnica de Valencia. H2ONET: desarrollado por la empresa MW SoftInc (Montgomery Watson, 1996). En Cuba se ha utilizado para el diseño óptimo de redes urbanas, el programa ROKO del (ISPJAE), y para la simulación se emplea fundamentalmente el software EPANET.

En el presente trabajo se emplean 2 de los programas mencionados anteriormente con el objetivo de realizar el diseño y la modelación hidráulica en periodo extendido del sistema de abastecimiento de agua en cuestión. El software ROKO se utiliza con el objetivo de obtener un diseño óptimo, es decir las dimensiones de los diámetros que impliquen un costo mínimo total. El software EPANET se emplea para realizar simulaciones en periodo extendido al sistema a partir del diseño obtenido con el programa ROKO, dando una visión del comportamiento del mismo en las diferentes condiciones de operación que se imponen a lo largo del tiempo.

#### **1.7.1. ROKO: Programa para el cálculo y diseño óptimo de redes hidráulicas urbanas. [18]**

ROKO es un sistema integrado de programas para el cálculo y diseño óptimo de redes hidráulicas urbanas. El sistema ROKO está formado por tres módulos: DATOS, ROCT y KOLEC. El módulo DATOS permite la creación, revisión y modificación en pantalla de los ficheros de datos necesarios para calcular las redes. El módulo ROCT calcula redes de abastecimiento de agua formadas por tuberías circulares con flujo a presión. El proceso de cálculo está concebido para redes que forman circuitos (redes en malla), aunque es posible calcular redes abiertas y mixtas.

El módulo KOLEC calcula redes de alcantarillado sanitario y de drenaje pluvial formadas por tuberías circulares o rectangulares con flujo por gravedad (llenado parcial). El proceso de cálculo está concebido para resolver redes con cualquier configuración, la única limitación es que sean siempre redes abiertas, o sea, no es posible la formación de circuitos. El sistema ROKO es capaz de realizar las siguientes tareas para cualquiera de las redes:

- Revisar una red ya dimensionada formada por tuberías nuevas y existentes en cualquier combinación.
- Obtener el diseño de costo mínimo total de una red completamente nueva.
- Obtener el diseño de costo mínimo total de una red parcialmente nueva (caso de ampliación o rehabilitación).

Si se desea profundizar en el algoritmo de cálculo de algunos de los módulos mencionados se sugiere consultar el Manual de Usuario de ROKO.

### **1.7.2. EPANET 2.0 Software para el Análisis y Simulación de Sistemas de Abastecimiento de Agua.[20]**

EPANET 2.0 es una aplicación que realiza simulaciones en período extendido (o casi estático) del comportamiento hidráulico y de la calidad del agua en redes y tuberías a presión; permitiendo seguir la evolución del flujo del agua en las tuberías, la presión en los nudos de demanda, el nivel del agua en los depósitos y la concentración de cualquier sustancia a través del sistema de distribución durante un período prolongado de simulación.

De hecho puede emplearse para multitud de aplicaciones en el análisis de sistemas de distribución. Diseño de programas de muestreo, calibración de modelos hidráulicos, análisis de cloro residual y valoración del riesgo a que se encuentran sometidos los consumidores son algunas de las aplicaciones que pueden llevarse a cabo.

Entre sus principales ventajas está un módulo de cálculo confiable y facilidades para simular elementos de la red como son válvulas, bombas, tanques, etc. permitiendo que estos elementos trabajen siguiendo normas fijadas por el usuario y vinculadas al comportamiento de la red en cada momento, como puede ser el empleo de bombas que arrancan y paran de acuerdo al nivel en un tanque, o válvulas que operan a horas predeterminadas.

Por otra parte, permite trabajar con el sistema de unidades internacionales o inglesas, además, está diseñado para utilizar cualquiera de las tres principales ecuaciones de cálculo (Hazen-Williams, Darcy-Weisbach y Chezy-Manning para tubería llena).

También posibilita el intercambio de ficheros con aplicaciones GIS (Sistemas de Información Geográfica), estas aplicaciones vinculan información gráfica con bases de datos de los componentes de la red y los usuarios, así como otros parámetros importantes, que son utilizados para realizar análisis hidráulicos. (EPANET 2.0 Manual de usuarios).

## CAPÍTULO 2

## Capítulo 2.

### 2. Diseño y Simulación de Alternativas Aplicadas a un Sistema de Acueducto Urbano.

En este capítulo se han asumido valores de cotas y longitudes de tuberías ficticios para conformar una red de distribución hipotética. Se asume que la fuente sea un pozo para todas las variantes y que una de ellas se analice considerando la regulación con un depósito en cabecera cuya capacidad se calculará en función de los datos asumidos. En las figuras 2.1 (a) y 2.1 (b) se muestran los esquemas topológicos de los sistemas propuestos para el análisis.

El diseño de la red de distribución se realizó utilizando el programa para el diseño óptimo de redes hidráulicas urbanas (ROKO), las tuberías se consideraron de PEAD, la calidad del material será PE-100 con SDR 26, y la presión nominal de las mismas será PN-6 (0,6 mPa).

#### 2.1 Datos asumidos para el diseño óptimo de la red de abastecimiento de agua.

Los datos que serán empleados para dar solución al diseño hidráulico de la red urbana de abastecimiento de agua, se presentan a continuación:

Para dar cumplimiento a los objetivos del trabajo se ha seleccionado una población futura de 90 000 habitantes.

Conforme a la Norma NR-AC-1 concebida para la Determinación de la Demanda de Agua en Poblaciones, vigente a partir de septiembre de 2005, a una población de diseño entre 25 000 y 100 000 habitantes, corresponde una dotación per cápita de 285 Lppd, correspondiéndoles los coeficientes de irregularidad diaria y horaria ( $k_1 = 1,4$  y  $k_2 = 1,5$ ) respectivamente. Por lo tanto para la obtención de los caudales de diseño pueden emplearse las ecuaciones siguientes:

$$Q_m = \text{Dot.} \cdot \text{Pob} / 86400$$

$$Q_m = 285 \cdot 90\,000 / 86400$$

$$Q_m = 296,88 \text{ L/s (Caudal Promedio Diario)}$$

$$Q_{md} = Q_m \cdot k_1$$

$$Q_{md} = 296,88 \cdot 1,4$$

$$Q_{md} = 415,63 \text{ L/s (Caudal Máximo Diario)}$$

$$Q_{mh} = Q_{md} \cdot k_2$$

$$Q_{mh} = 415,63 \cdot 1,5$$

$$Q_{mh} = 623,44 \text{ L/s (Caudal Máximo Horario)}$$

## 2.2. Red de distribución.

La red de distribución de la ciudad a abastecer será una red mallada, considerando la garantía que ofrecen las mismas para lograr un servicio de acueducto con las menores afectaciones ante posibles roturas.

En la figura 2.1 (a) y 2.1 (b) se presentan las características de la red de abastecimiento de agua, pudiéndose observar que cuenta con 12 circuitos para las tuberías principales, 38 tuberías, 26 nodos de consumo y el nodo 27 que representa la entrada de agua a la red, cuyo gasto de diseño es de 623,44 L/s.

La presión mínima general considerada para el diseño de la red se estableció de 14m.c.a.

Figura 2.1(a) Red hipotética de abastecimiento de agua.

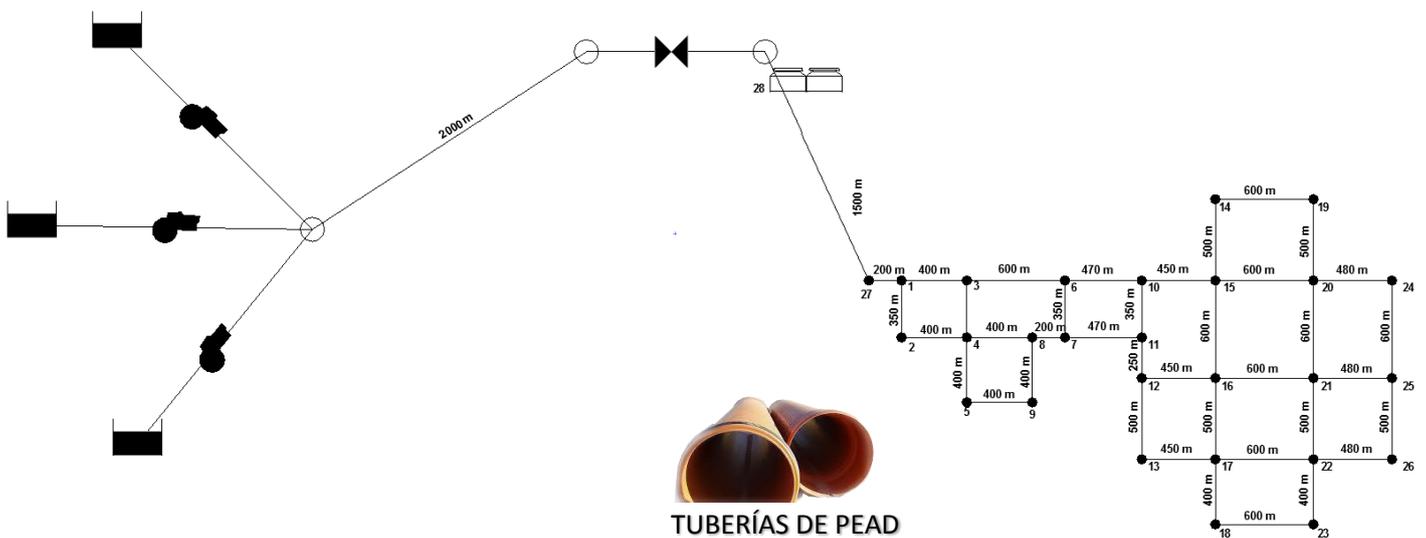
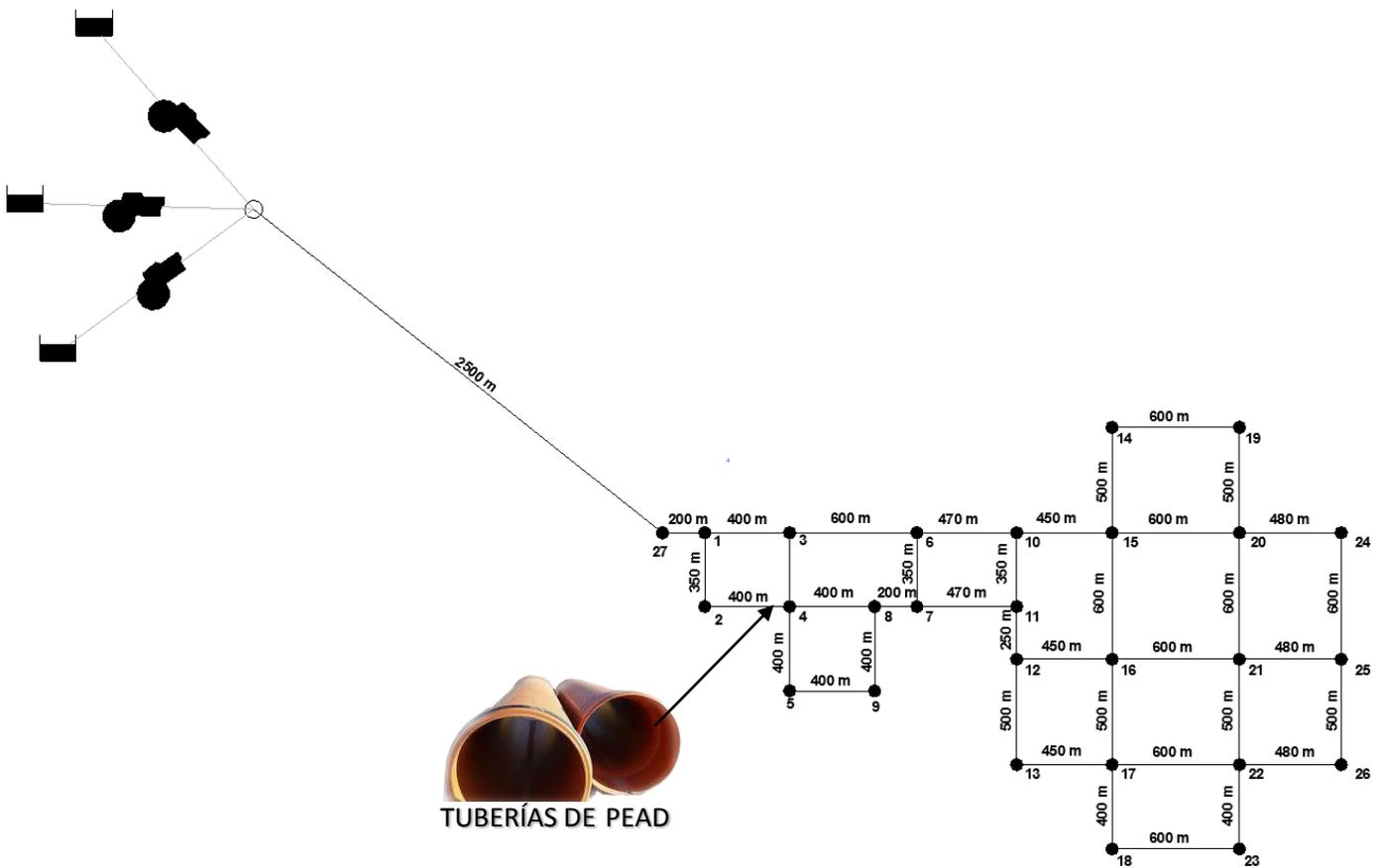


Figura 2.1 (b) Red hipotética de abastecimiento de agua.



**Diámetros candidatos en el proceso de optimización.**

En el programa se suministraron los datos de tuberías comerciales de PEAD, de producción nacional en toda su gama de diámetros, en la tabla 2.1. Se muestran las tuberías comerciales con el coeficiente de rugosidad de Williams-Hazen y con su costo unitario.

**Tabla 2.1. Datos hidráulicos y costos unitarios de las tuberías comerciales de PEAD a presión.**

Diámetro Nominal (mm)	Coficiente de Rugosidad	Costo Unitario (\$/ml)	PN (mPa)
110	145	4,75	0,6
160	145	9,37	0,6
200	145	14,74	0,6
250	145	22,97	0,6
315	145	36,15	0,6
355	145	50,00	0,6
400	145	61,90	0,6
450	145	78,33	0,6
500	145	96,74	0,6
630	145	120,10	0,6

800	145	153,30	0,6
900	145	170,70	0,6
1000	145	232,28	0,6
1200	145	351,95	0,6

### 2.3. Aplicación del programa ROKO - ROCT.

La aplicación del programa ROKO al caso de estudio, persigue el objetivo de optimizar la red mallada (costo mínimo total) obteniendo los diámetros necesarios como resultado.

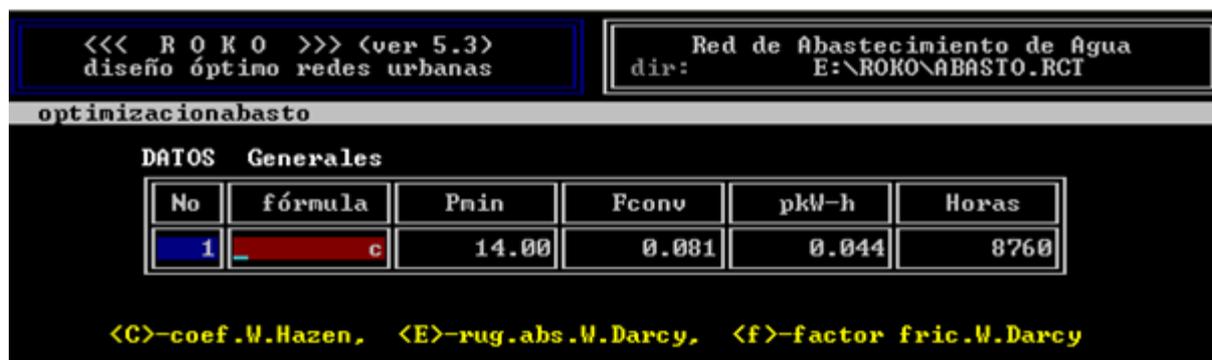
Resulta importante señalar que el sistema permite resolver redes de hasta 1000 tuberías o 255 circuitos que formen parte de una red de abastecimiento de agua.

El módulo ROCT tiene incorporado una optimización en 2 pasos:

- Cálculo del gasto en los tramos con el criterio de la máxima uniformidad, lo cual justifica el empleo de una red mallada.
- Determinación de la red de costo mínimo que cumple los gastos anteriores y satisface los demás requisitos del usuario.

De esta manera, para redes con circuitos, ROCT no ofrece una red de costo mínimo matemático (que no sería mallada), ni una red con una distribución arbitraria o casual de los gastos, sino que ofrece la red con la mejor distribución posible de los gastos (para funcionar como red mallada) y que, además, es de costo mínimo.

**Figura 2.2 Datos Generales introducidos en ROKO.**



A continuación se presentan las características de los nodos de la red para que sean introducidas en el programa, ver Tabla 2.2:

**Tabla 2.2 Valores de cotas y caudales asignados a los nodos.**

Nodo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Cota (m)	20	19,5	19,2	18,5	17	17,5	16,8	17	16,3	16,9	16,0	15,8	15,5
Q (L/s)	10	12,2	20	15,1	22	18	14	9,3	20,4	19	17,1	13,3	16
Nodo	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Cota (m)	16,3	16	15,5	15	14	15,1	14,6	14,3	13,7	13,2	12	11,3	10,4

<b>Q (L/s)</b>	21	25,9	40	35	30	25	31,2	42	31	26,3	42,74	43	23,9
----------------	----	------	----	----	----	----	------	----	----	------	-------	----	------

### 2.3.1. Resultados del diseño obtenido por ROKO-ROCT.

Luego de corrido el programa ROKO se obtuvieron resultados satisfactorios, el programa converge a la solución óptima. El diámetro medio ponderado mínimo obtenido fue de **313,05 mm** y el costo de inversión anualizado fue de **\$ 65 537,65**.

A continuación se exponen los resultados más significativos mostrados por el programa ROKO, para la red de distribución óptima. (Ver tablas 2.3 y 2.4.)

**Tabla 2.3 Diámetros nominales obtenidos para cada tubería.**

Tubería	Nodo 1	Nodo 2	D (mm)	Tubería	Nodo 1	Nodo 2	D (mm)
1	27	1	800	20	17	13	355
2	1	2	500	21	15	16	250
3	2	4	500	22	16	17	315
4	1	3	630	23	15	14	315
5	3	4	355	24	17	18	315
6	3	6	500	25	14	19	250
7	4	8	450	26	15	20	600
8	4	5	400	27	16	21	600
9	5	9	355	28	17	22	600
10	8	9	315	29	18	23	600
11	8	7	630	30	20	19	500
12	6	7	160	31	20	21	600
13	6	10	500	32	21	22	500
14	7	11	630	33	22	23	400
15	10	11	160	34	20	24	400
16	10	15	500	35	21	25	400
17	11	12	630	36	22	26	400
18	16	12	400	37	24	25	600
19	12	13	400	38	25	26	500

**Tabla 2.4 Presiones obtenidas en nodos.**

Nodo	Presión (m.c.a)	Nodo	Presión (m.c.a)	Nodo	Presión (m.c.a)
1	15,24	10	15,24	19	14,55
2	15	11	15,85	20	14,79
3	15,37	12	15,86	21	14,86
4	15,23	13	15,50	22	14,96
5	16,19	14	14,43	23	15,27
6	15,57	15	15,43	24	15,48
7	15,43	16	15,18	25	15,14
8	15,39	17	15,23	26	15,39
9	16,54	18	15,76	27 (tanque)	14

A continuación se simulan alternativas empleando el software EPANET 2.0, para evaluar el comportamiento hidráulico de la regulación de sistemas de abastecimiento de agua, considerando en la modelación el consumo de agua durante las 24 horas

del día y durante los 365 días del año. En cada variante se supone que la demanda máxima diaria es del 100 % de la DMD durante el 40 % del año, del 75 % de la DMD durante el 40 % del año y del 60% de la DMD durante el 20 % del año.

El objetivo fundamental de este análisis consiste básicamente, en realizar un estudio de factibilidad que responderá en cierta medida al diseño y operación de un acueducto concebido para abastecer de agua potable a una población urbana determinada, basándose fundamentalmente en 5 variantes:

La primera responde a que exista un Depósito Regulador entre la Fuente y la Red de Distribución, en lo adelante **(Variante 1)**.

La segunda responde a que no exista el Depósito Regulador entre la Fuente y la Red de Distribución, considerando entonces un bombeo con inyección directa a la red empleando bombas de velocidad fija (BVF), con un sistema automatizado que permita el arranque o parada de las bombas según la presión necesaria para abastecer totalmente la red, en lo adelante **(Variante 2)**.

La tercera responde a un bombeo con inyección directa a la red empleando bombas con velocidad variable (BVV), instaladas todas las de trabajo con un variador de frecuencia incorporado, permitiendo entregar la demanda con la presión requerida y variando la velocidad de giro siempre por debajo de la velocidad nominal, en lo adelante **(Variante 3)**.

La cuarta responde a un bombeo con inyección directa a la red empleando bombas con velocidad variable (BVV), instaladas todas las de trabajo con un variador de frecuencia incorporado, permitiendo entregar la demanda con la presión requerida y variando la velocidad de giro hasta un 10% por encima de la velocidad nominal, en lo adelante **(Variante 4)**.

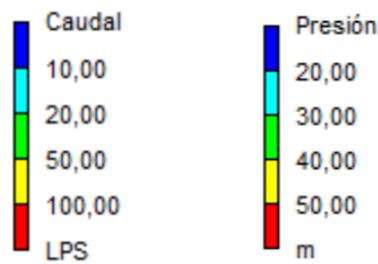
La quinta y última variante responde a un bombeo con inyección directa a la red empleando BVF y BVV, instalando solamente una con un variador de frecuencia incorporado, y con un sistema automatizado que permita el arranque o parada de las BVF, permitiendo entregar la demanda con la presión requerida, en lo adelante **(Variante 5)**.

**Nota:** Los equipos de bombeo necesarios para cada una de las variantes, se seleccionaron para una frecuencia de 50 Hz (1450 rpm), por lo que resultará necesario modificar las curvas características según las leyes de semejanza correspondientes, en el caso de que la frecuencia de trabajo de la infraestructura del sistema electro-energético disponible sea de 60 Hz. En todas las variantes analizadas se consideran 5 electro-bombas instaladas (3 de trabajo y 2 de reserva).

## **2.4 Simulaciones hidráulicas en EPANET 2.0**

Los resultados de las modelaciones que a continuación se presentan se pueden representar mediante la escala de colores mostrada en la figura 2.5. La escala de colores está asociada a la distribución de presiones y caudales en la red de distribución.

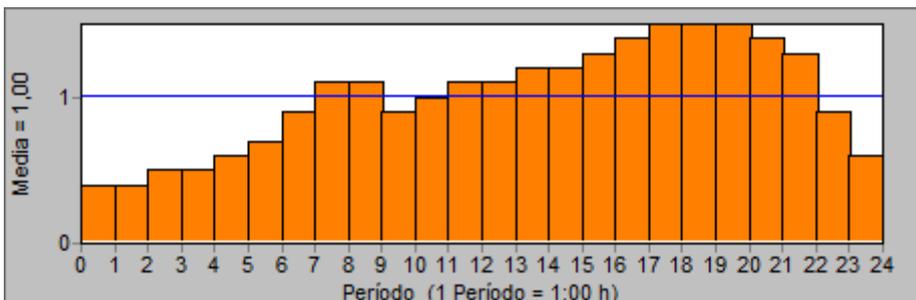
**Figura 2.5 Escala establecida para presiones y caudales.**



### **Modulación de la demanda.**

Para modular la demanda de agua de una red de distribución en periodo extendido, se elabora la curva de modulación que caracterizará el consumo horario de la población de estudio, que representa la distribución horaria de la demanda durante un día. La curva escogida para el estudio que se plantea, ha sido utilizada por las Empresas de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos del país, para modelar las variaciones horarias en redes de distribución de agua. A continuación se presenta un gráfico que permite evaluar el comportamiento de la misma durante las 24 horas del día.

**Figura 2.6 Curva de modulación horaria aplicada a la demanda.**

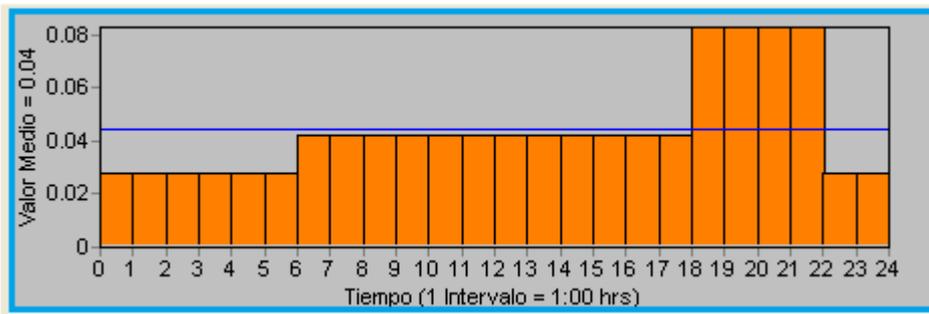


### **Modulación de la tarifa eléctrica.**

La tarifa aplicable responde a los diferentes horarios según el sistema tarifario eléctrico vigente, exponiéndose la misma a continuación:

- 6 AM – 6 PM (12 h): \$ 0,042 / kW h
- 6 PM – 10 PM (4 h): \$ 0,083 / kW h
- 10 PM – 6 AM (8 h): \$ 0,028 / kW h

**Figura 2.7 Curva de modulación horaria aplicada a la tarifa eléctrica.**



**2.5 Análisis de un Sistema – Bomba – Tanque – Red (Variante 1).**

Los objetos de obra implicados en el sistema de regulación que no se han dimensionado aún y que son específicos de caso en particular, se diseñan preliminarmente en las variantes de análisis que se presentan a continuación:

**Cálculo del volumen del tanque de compensación.**

El volumen del tanque debe ser calculado en base a los datos de consumo de la población y su distribución horaria, su cálculo se presenta en la tabla siguiente:

**Tabla 2.5 Cálculo del volumen del Tanque de compensación.**

Hora	Multiplicador	Demanda (L/s)	DMD (L/s)	Déficit		Exceso	
				hora	volumen	hora	Volumen
				(L/s)	(m3)	(L/s)	(m3)
1	0,4	166,25	415,63	0	0	249,38	897,76
2	0,4	166,25	415,63	0	0	249,38	897,76
3	0,5	207,82	415,63	0	0	207,82	748,13
4	0,6	249,38	415,63	0	0	166,25	598,50
5	0,6	249,38	415,63	0	0	166,25	598,50
6	0,7	290,94	415,63	0	0	124,69	448,88
7	0,8	332,50	415,63	0	0	83,13	299,25
8	1,1	457,19	415,63	41,56	149,63	0	0
9	1,1	457,19	415,63	41,56	149,63	0	0
10	0,9	374,07	415,63	0	0	41,56	149,63
11	0,9	374,07	415,63	0	0	41,56	149,63
12	1	415,63	415,63	0	0	0	0
13	1,1	457,19	415,63	41,56	149,63	0	0
14	1,2	498,76	415,63	83,13	299,25	0	0
15	1,2	498,76	415,63	83,13	299,25	0	0
16	1,3	540,32	415,63	124,69	448,88	0	0
17	1,4	581,88	415,63	166,25	598,51	0	0
18	1,5	623,44	415,63	207,82	748,13	0	0
19	1,6	665,01	415,63	249,38	897,76	0	0
20	1,6	665,01	415,63	249,378	897,76	0	0

21	1,6	665,01	415,63	249,38	897,76	0	0
22	1,6	665,01	415,63	249,38	897,76	0	0
23	0,4	166,25	415,63	0	0	249,38	897,76
24	0,5	207,82	415,63	0	0	207,82	748,13
	<b>1</b>	<b>Volumen total del Tanque (m3)</b>			<b>6433,95</b>		<b>6433,95</b>

A continuación se obtendrán las dimensiones necesarias para el tanque de compensación:

La capacidad determinada anteriormente, es la necesaria para cubrir la irregularidad de la demanda durante un día, sin embargo la capacidad total del depósito debe contemplar un volumen de reserva, a utilizarse en caso de incendios. Según la NC 53-121, se define que un sistema dominará el fuego si es capaz de brindar 16 L/s durante 2 horas, este tiempo exige un volumen de 115 m<sup>3</sup> aproximadamente, en la tabla siguiente se muestra la capacidad total que deberá tener el depósito de compensación:

**Tabla 2.6 Capacidad total del tanque de compensación.**

<b>Volúmenes (m<sup>3</sup>)</b>	
Regulación	6 434
Incendios	115
<b>Total aproximado</b>	<b>7 000</b>

**Tabla 2.7 Dimensiones del depósito de compensación (2 módulos).**

<b>DEPÓSITO DE COMPENSACIÓN</b>	<b>Capacidad (m<sup>3</sup>)</b>	<b>DIMENSIONES</b>		
		<b>Altura (m)</b>	<b>Ancho (m)</b>	<b>Largo (m)</b>
	3 500	5	20,0	35,0

El tanque de compensación será apoyado sobre el terreno y tendrá 7 000 m<sup>3</sup> de capacidad, el cual estará conformado por 2 módulos de 3500 m<sup>3</sup> cada uno, y su cota de solera para garantizar las presiones necesarias en la red de distribución será de (37,50 m), quedando el mismo ubicado en un punto alto de la ciudad, para de esta forma permitir abastecer la red de distribución con un tramo de conductora de 1500 m de longitud que conducirá por acción de la gravedad el caudal máximo horario necesario.

### **Conductora(s).**

Todas las conductoras serán de Polietileno de Alta Densidad (PEAD - PE 100) y la presión nominal de las mismas será de 0,6 mPa. Los diámetros nominales empleados en las conductoras son de 630 mm y 800 mm, ambas diseñadas según el criterio de velocidad económica (0,9 m/s – 1.5 m/s), para abastecer el sistema Bomba – Tanque – Red (Variante 1).

**Tabla 2.8 Características de las conductoras.**

CONDUCTORAS	UM	LONGITUD (m)	DIÁMETRO NOMINAL (mm)	MATERIAL	PN (mPa)
Conductora de Impulsión	M	2000	630	PEAD	0,6
Conductora de Gravedad	M	1500	800	PEAD	0,6

### **Selección de Bombas.**

Para la selección de las electrobombas, es importante obtener su potencia nominal, considerando los factores siguientes en función de las potencias de las bombas a instalar, estos se presentan a continuación:

**Tabla 2.9 Factor de seguridad de motores para bombas.**

KW	1 a 0	1 a 2	2 a 5	5 a 10	10 a 50	50 a 100	100 a 500
Factor	2,5 ~ 2	2 ~ 1,5	1,5 ~ 1,2	1,3 ~ 1,15	1,1	1,1 ~ 1,05	1,05

Las bombas serán seleccionadas a partir de catálogos del fabricante de bombas marca KSB modelos CPK/HPK, adquiridos de firmas suministradoras en formato digital.

En el caso de la **Variante 1**, se efectuó la selección a partir de los datos siguientes:

$Q_b = 426,31\text{L/s}$  (caudal de bombeo)

$H_b = 46,5\text{ m.c.a.}$  (carga de bombeo)

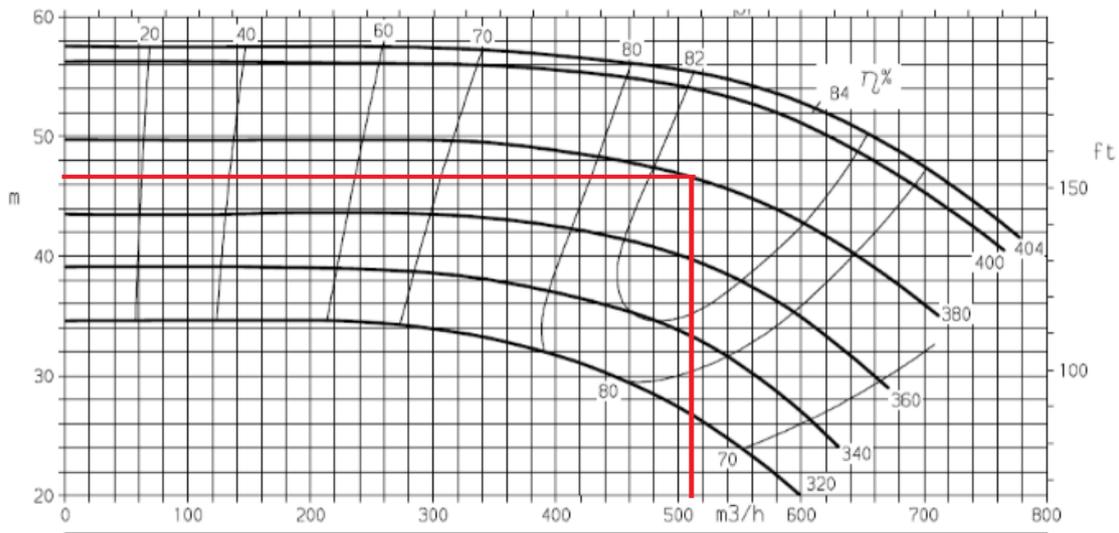
$E_b = 83\%$

$P_b = 78,53\text{KW}$

$P_n = 90\text{kW}$

Con estos datos y el catálogo se seleccionó la bomba **CPK/HPK 200-400-380** (Ver figura 2.8).

**Figura 2.8 Curva característica de bomba seleccionada (CPK/HPK 200-400-380).**



**2.6. Simulación hidráulica (variante 1).**

**Variante 1 (Tanque de succión - Conectora de impulsión - Depósito de Compensación - Conectora de gravedad – Red de Distribución).**

En esta variante, las bombas deben vencer una carga estática de aproximadamente 43 m desde el tanque de succión hasta el depósito de compensación de 7 000 m<sup>3</sup>, en este depósito, la entrada se realizará por arriba, lo que implica que la bomba debe suministrar el agua en la cota 37,5 m, bombeando a razón del caudal máximo diario, en este caso 426,31 L/s.

En esta variante el equipo de bombeo seleccionado suministrará el gasto máximo diario al depósito de compensación a través de la (conectora #1), y desde el tanque hasta la red de distribución se garantizará el gasto máximo horario por gravedad a través de la (conectora #2).

(Los datos correspondientes a estas curvas características (Capacidad y Rendimiento), fueron introducidos en el software EPANET 2.0 para poder simular su comportamiento en la instalación bajo determinadas condiciones de funcionamiento).

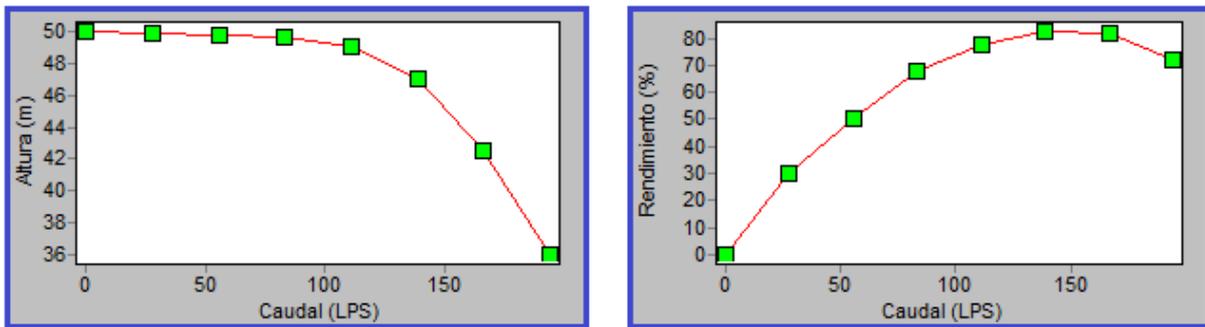
**Tabla 2.6 Curva característica de carga vs caudal.**

<b>H (m)</b>	50	49,9	49,8	49,6	49	47	42,5	36
<b>Q (L/s)</b>	0	27,8	55,6	83,33	111,1	138,9	166,7	194,4

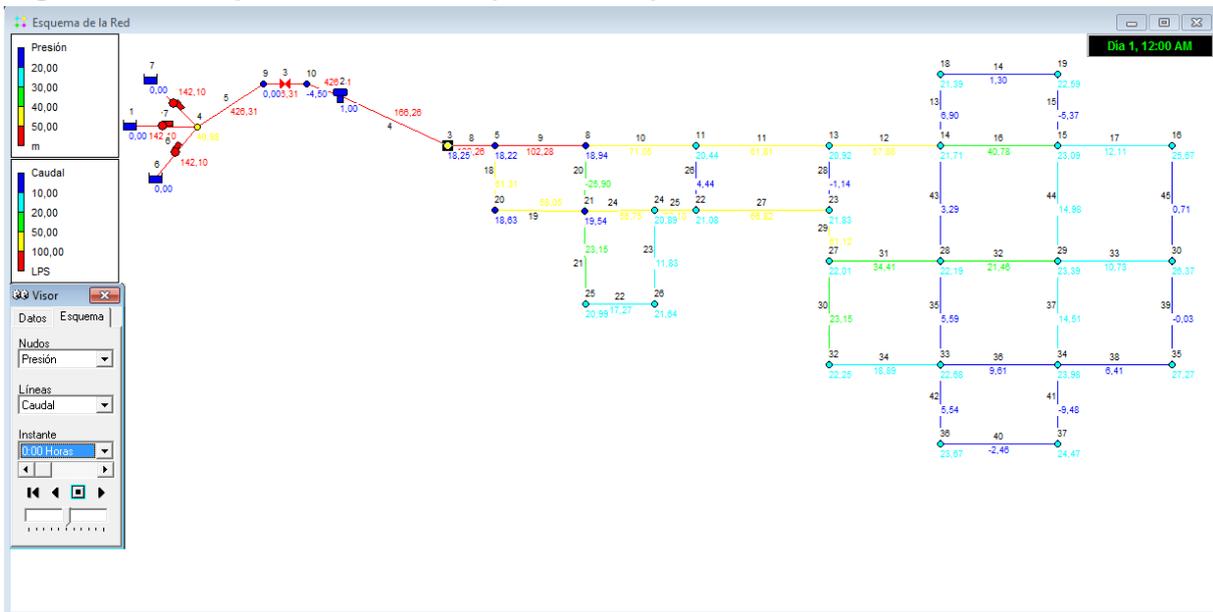
**Tabla2.7 Curva característica de rendimiento vs caudal.**

<b>η (%)</b>	0	30	50	68	77,5	82,5	82	72
<b>Q (L/s)</b>	0	27,8	55,6	83,3	111,1	138,9	166,7	194,4

**Fig. 2.9 Curvas de comportamiento introducidas en EPANET (variante 1).**



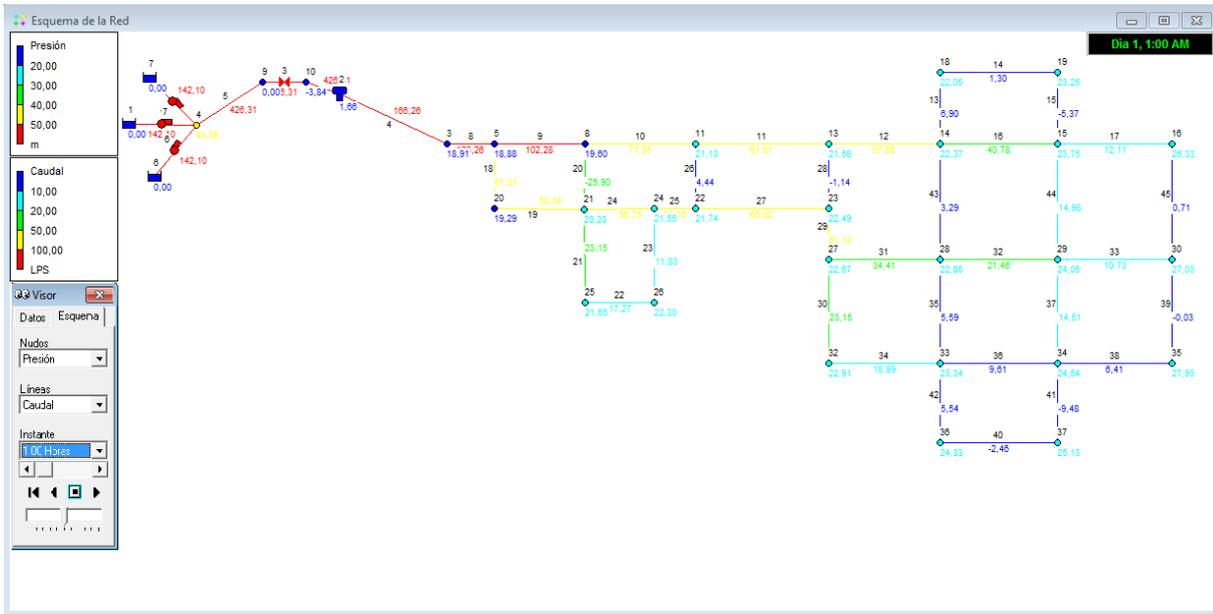
**Figura 2.10 Esquema de la Red (Variante 1)**



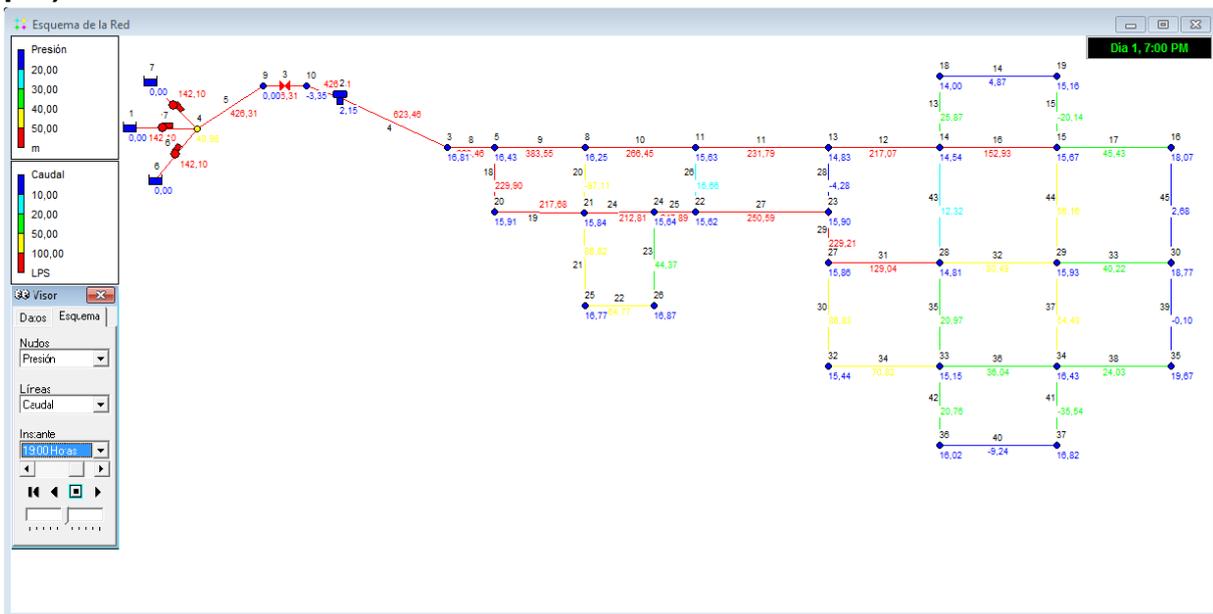
### 2.6.1. Resultados de la simulación en período extendido para la (DMD).

El comportamiento de la presiones en los horarios de mínimo y máximo consumo, reflejó que las mismas no exceden los 30 m.c.a., este valor es representado en los nodos según la escala de colores de las figuras 2.11 y 2.12 con color azul claro. Con este resultado se evidencia que las presiones nominales de las conductoras no deben ser en ningún caso superior 0,6 mPa.

**Figura 2.11 Comportamiento del sistema en hora de mínimo consumo (1:00 am).**



**Figura 2.12 Comportamiento del sistema en hora de máximo consumo (7:00 pm).**



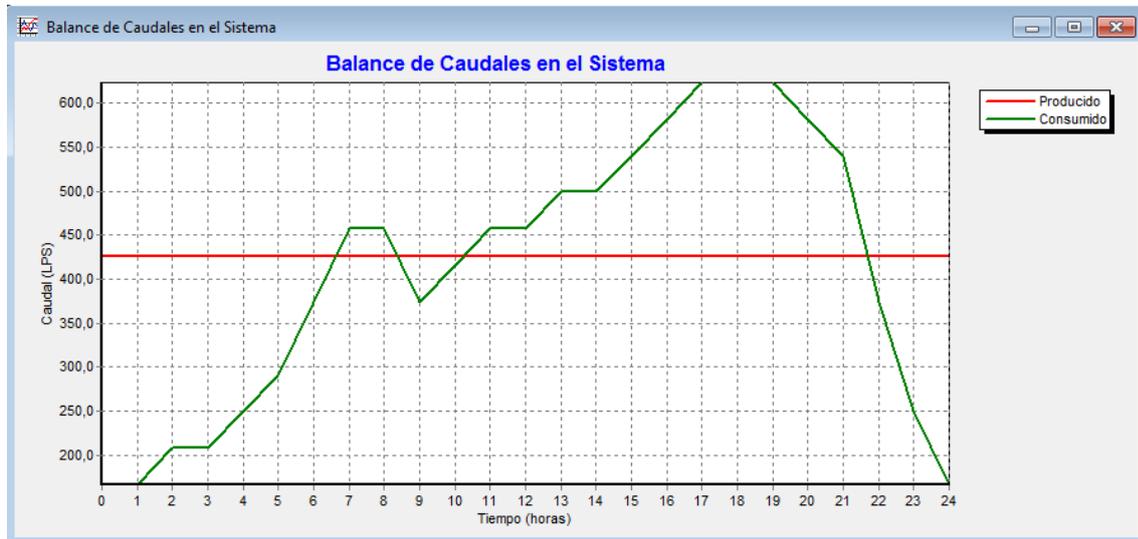
### Balance de caudales del sistema.

El balance de caudales del sistema puede ser representado por el comportamiento del tanque de compensación (7 000 m<sup>3</sup>), en esta variante, toda el agua debe circular por el mencionado depósito. En la siguiente figura se puede comprobar el correcto funcionamiento del depósito. La línea roja representa el caudal máximo diario, mientras que la línea verde representa la distribución de la demanda real del día. Nótese que el llenado del tanque ocurre durante aproximadamente 10 horas, las horas valle comienzan a partir de las 22 horas (10 de la noche) y dura hasta

aproximadamente las 6 horas (6 de la mañana), también desde las 9 horas hasta las 11 horas se produce un pico lógico en el consumo de agua.

El horario de consumo pico de agua ocurre entre las 11 horas y las 22 horas, en este horario es cuando más agua es consumida.

**Figura 2.13 Balance de caudales en el sistema.**



## 2.7. Análisis de un Sistema de Bombeo con Inyección Directa a la Red empleando (BVF) (Variante 2).

### Selección de Bombas.

En el caso de la **Variante 2**, se efectuó la selección de las bombas a partir de los datos siguientes:

$Q_b = 623,46 \text{ L/s}$  (caudal de bombeo)

$H_b = 41,5 \text{ m.c.a.}$  (carga de bombeo)

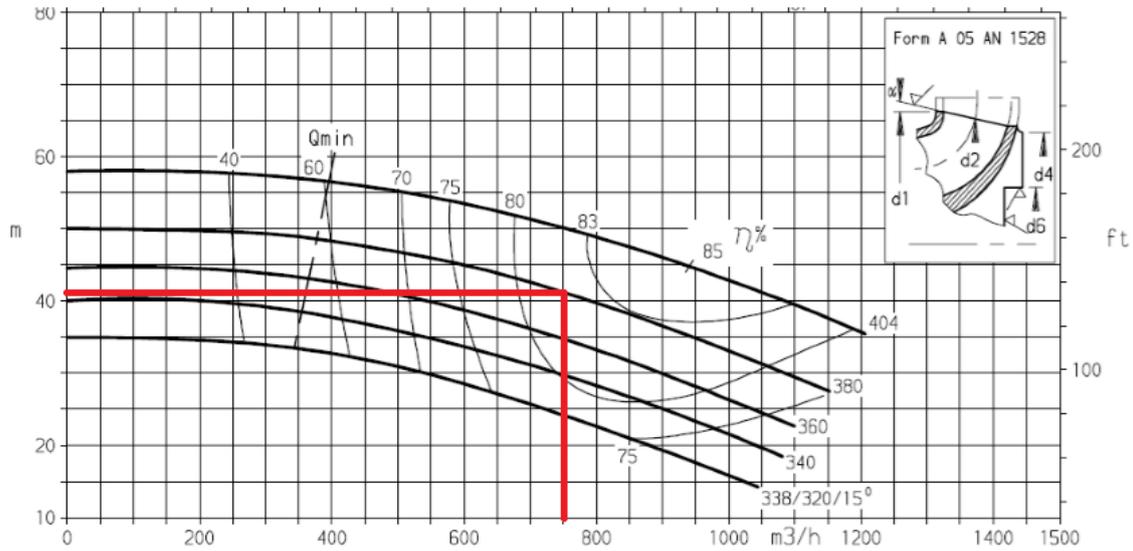
$E_b = 81\%$

$P_b = 91,50 \text{ Kw}$

$P_n = 110 \text{ Kw}$

Con estos datos y el catálogo se seleccionó la bomba **CPK/HPK 250-400-380**. Ver figura 2.14.

**Figura 2.14 Curvas características de bomba seleccionada (CPK/HPK 250-400-380).**



En esta variante, las bombas deben vencer una carga estática de aproximadamente 41,5 m desde el tanque de succión hasta el punto más alto del trazado de la conductora, lo que implica que las bombas deben suministrar el agua en la cota 43 m, bombeando a razón del caudal máximo horario, en este caso 623,44m L/s. También en el caso de las bombas 6 y 7 se le agrego un sistema automático lo cual permite en el caso de la bomba 7 se apague cuando en el nodo de consumo número 5 la presión sobrepase los 23 m.c.a. y arranque cuando esté por debajo de los 15 m.c.a., la bomba número 6 se apagará cuando la presión este por encima de los 30 m.c.a. y arranque cuando esté por debajo de los 15 m.c.a. (Ver figura 2.16).

Los datos correspondientes a estas curvas características (Capacidad y Rendimiento), fueron introducidos en el software EPANET 2.0 para poder simular el comportamiento de la instalación, bajo condiciones propias de funcionamiento.

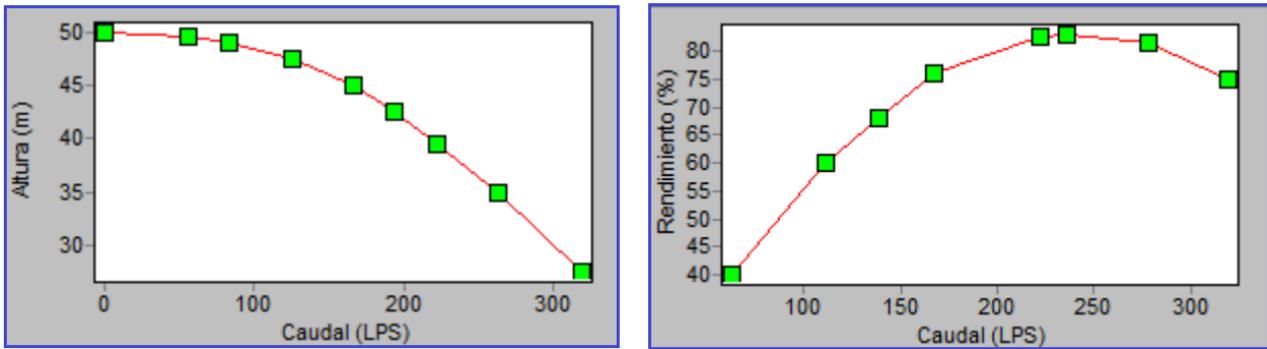
**Tabla 2.8 Curva característica de carga vs caudal.**

<b>H (m)</b>	50	49,7	49	47,5	45	42,5	39,5	35	27,5
<b>Q (L/s)</b>	0	55,6	83,3	125	166,7	194,4	222,2	263,9	319,4

**Tabla 2.9 Curva característica de rendimiento vs caudal.**

<b>η (%)</b>	40	60	68	76	82,5	83	81,5	75
<b>Q (L/s)</b>	62,5	111,1	138,9	166,7	222,2	236,1	277,8	319,4

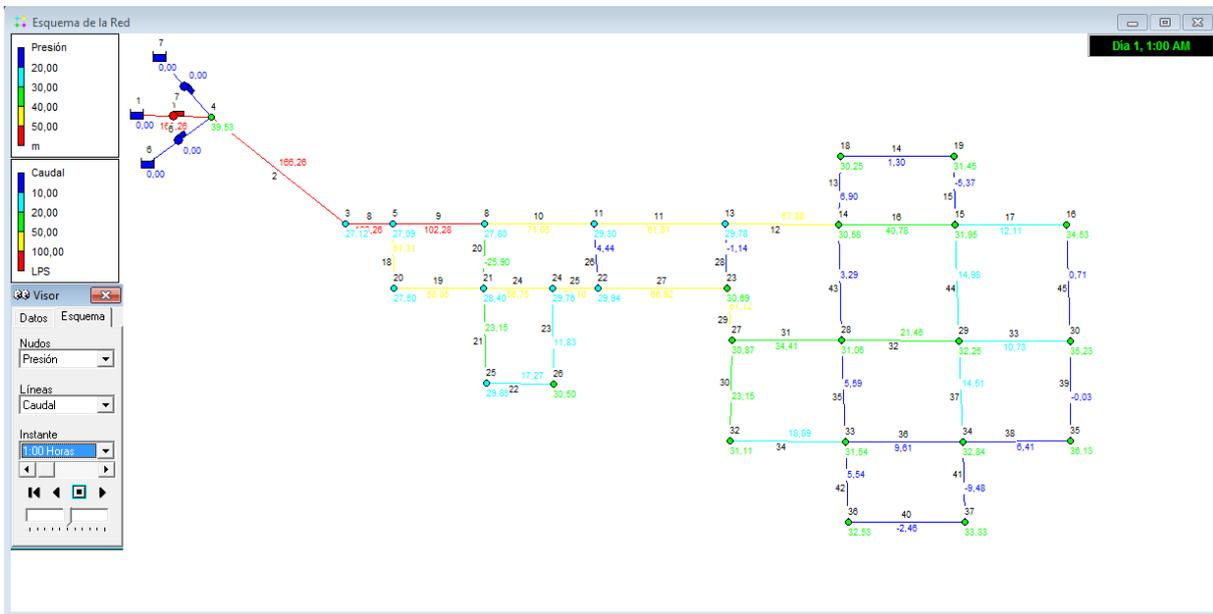
**Fig. 2.15 Curvas de comportamiento introducidas en EPANET (variante 3)**



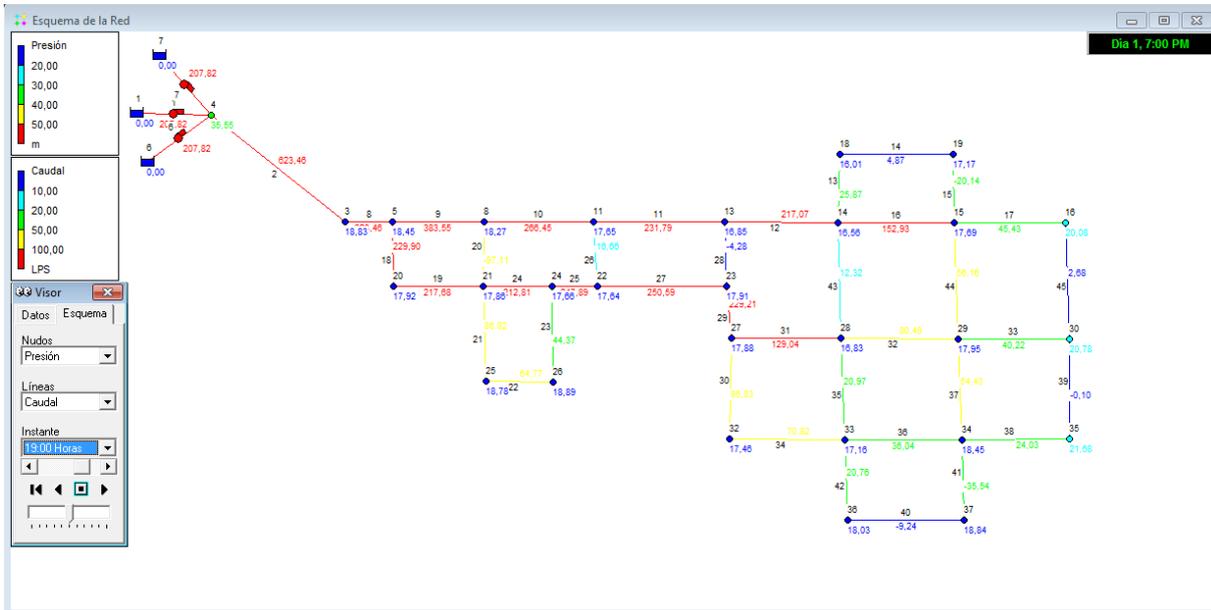
**2.7.1. Resultados de la simulación en periodo extendido para la DMD.**

El comportamiento de las presiones en los horarios de mínimo y máximo consumo tomado de EPANET, reflejó que las presiones en la conductora no exceden los 40 m.c.a., este valor es representado en los nodos según la escala de colores de las figuras 2,16 y 2.17 con color verde.

**Figura 2.16 Comportamiento del sistema en hora de mínimo consumo (1:00 am).**



**Figura 2.17 Comportamiento del sistema en hora de máximo consumo (7:00 pm).**



Se puede observar en el comportamiento del sistema en el horario de mínimo consumo considerando el sistema de automatización instalado en las bombas 6 y 7, que las mismas se mantienen apagadas hasta llegar al horario de máximo consumo, las cual arrancan de manera automática para satisfacer la demanda requerida. Esto representa un ahorro considerable de energía eléctrica.

## 2.8. Análisis de un Sistema de Bombeo con Inyección Directa a la Red con (BVV), variando la velocidad de giro por debajo de la velocidad nominal. (Variante 3)

Esta variante se desarrolló incorporando a cada una de las bombas de trabajo, variadores de velocidad. De esta forma, conforme la demanda vaya cambiando, los variadores modificarán su velocidad de giro de forma que siempre funcionen próximas a su punto óptimo (punto de máximo rendimiento) o, al menos, en zonas de rendimiento aceptable.

### Selección de Bombas.

En el caso de la **Variante 3**, se efectuó la selección de las bombas a partir de los datos siguientes:

$Q_b = 623,46$  L/s (caudal de bombeo)

$H_b = 41,5$  m.c.a. (carga de bombeo)

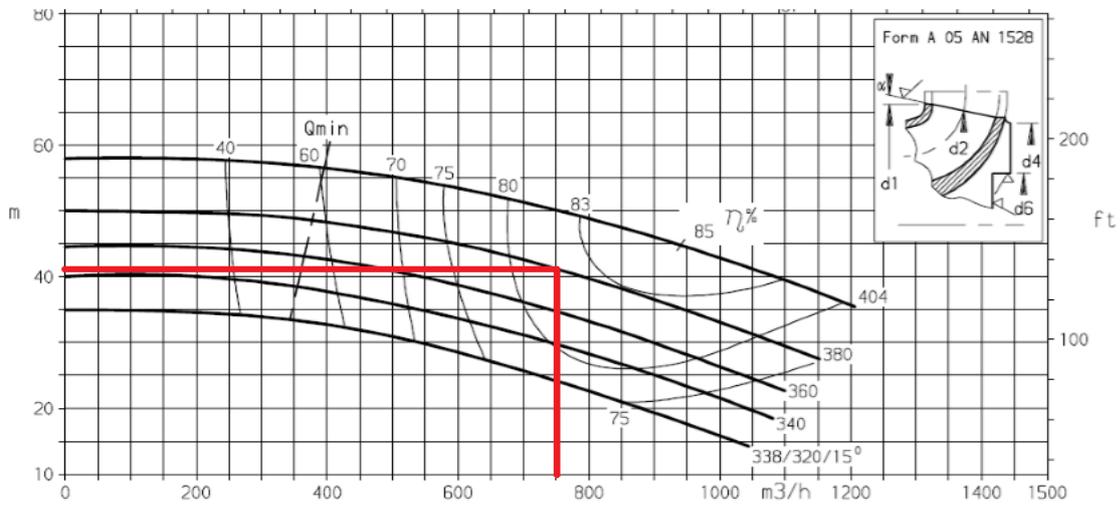
$E_b = 81\%$

$P_b = 91,50$  Kw

$P_n = 110$  Kw

Con estos datos y el catálogo se seleccionó la bomba **CPK/HPK 250-400-380**.

**Figura 2.18 Curvas características de bomba seleccionada (CPK/HPK 250-400-380).**



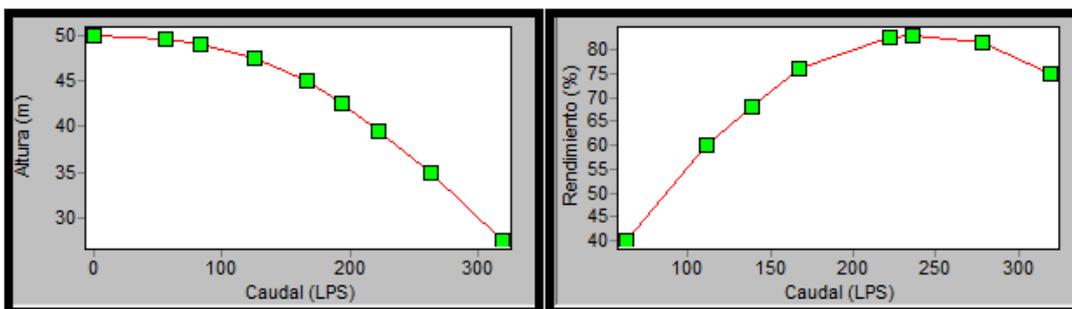
**Tabla 2.10 Curva característica de carga vs caudal.**

<b>H (m)</b>	50	49,7	49	47,5	45	42,5	39,5	35	27,5
<b>Q (L/s)</b>	0	55,6	83,3	125	166,7	194,4	222,2	263,9	319,4

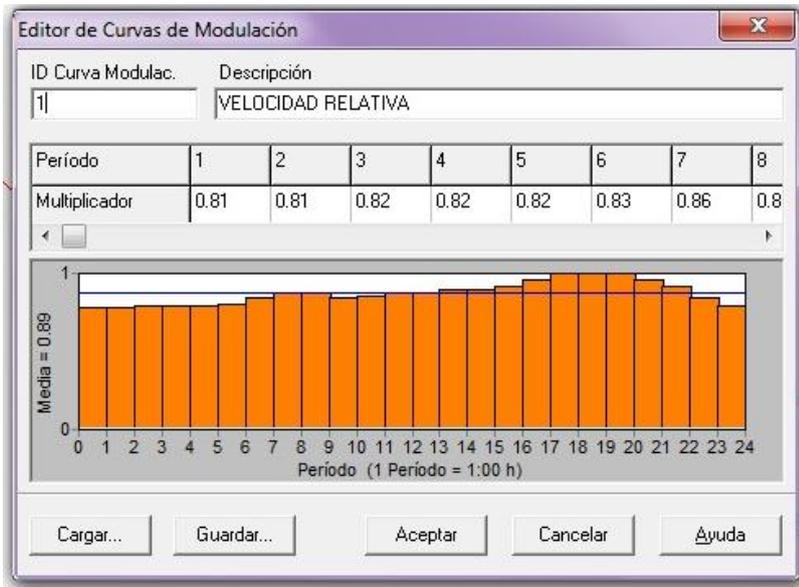
**Tabla 2.11 Curva característica de rendimiento vs caudal.**

<b>η (%)</b>	40	60	68	76	82,5	83	81,5	75
<b>Q (L/s)</b>	62,5	111,1	138,9	166,7	222,2	236,1	277,8	319,4

**Fig. 2.19 Curvas de comportamiento introducidas en EPANET (variante 3).**



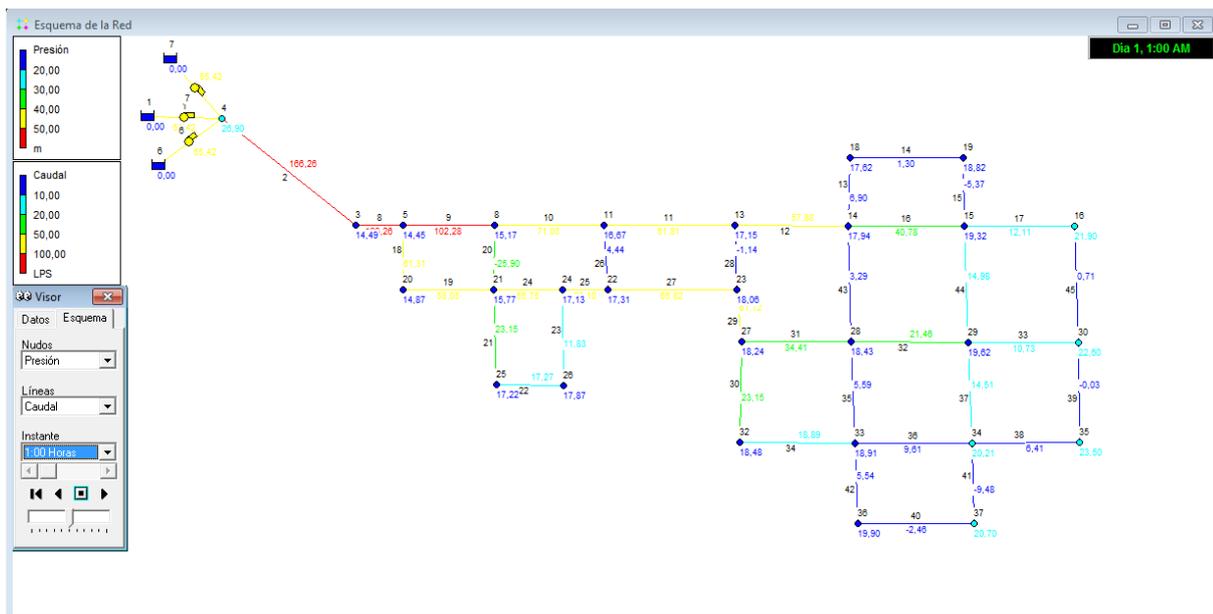
**Figura 2.20 Curva de modulación horaria de la velocidad de giro aplicada a las electro-bombas.**



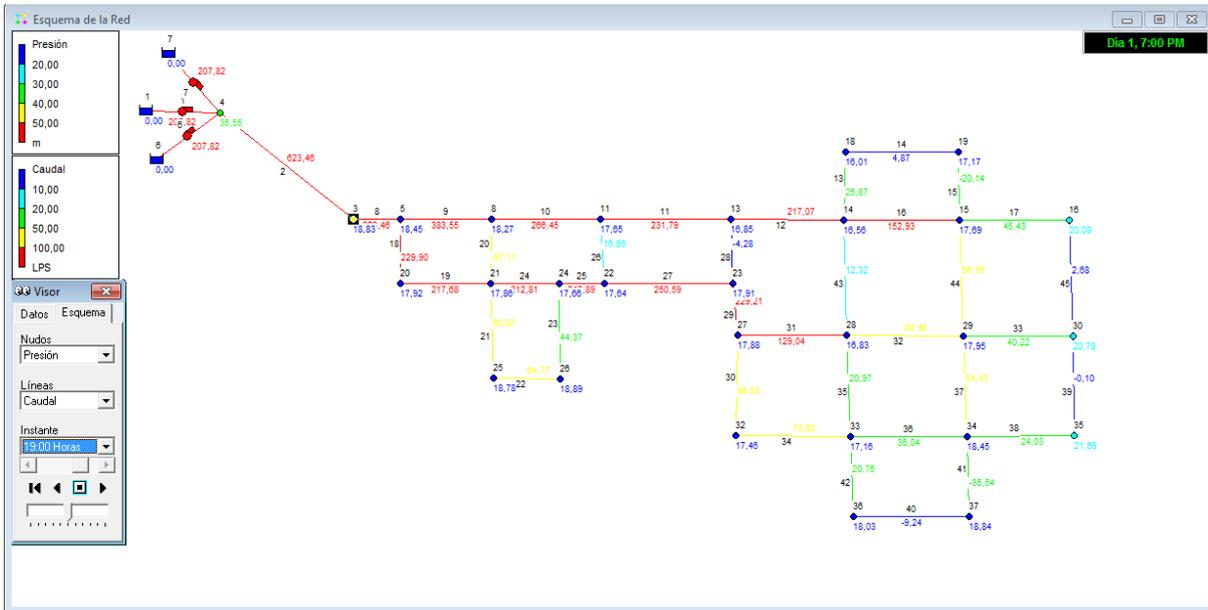
### 2.8.1. Resultados de la simulación en periodo extendido de la DMD.

El comportamiento de la presiones en los horarios de mínimo y máximo consumo tomado de EPANET, reflejó que las presiones en la red de distribución no exceden los 25 m.c.a., este valor es representado en los nodos según la escala de colores de las figuras 2.21 y 2.22 con color verde azul.

**Figura 2.21 Comportamiento del sistema en hora de mínimo consumo (1:00am).**



**Figura 2.22 Comportamiento del sistema en hora de máximo consumo (7:00pm).**



En esta variante se puede observar en los distintos horarios de máximo y mínimo consumo según la demanda que ocurra, como las bombas instaladas disminuyen y aumentan la velocidad de giro debido a los variadores de velocidad instalados. Logrando con este sistema un importante ahorro de energía eléctrica.

## 2.9. Análisis de un Sistema de Bombeo con Inyección Directa a la Red con (BVV), variando la velocidad de giro hasta un 10% por encima de la velocidad nominal. (Variante 4).

Esta variante, al igual que la anterior, se desarrolló incorporando a cada una de las bombas de trabajo, variadores de velocidad. De esta forma, según la demanda vaya cambiando, los variadores modificarán su velocidad de giro hasta un 10% por encima de su velocidad nominal, de manera que siempre funcionen próximas a su punto óptimo (punto de máximo rendimiento) o, al menos, en zonas de rendimiento aceptable.

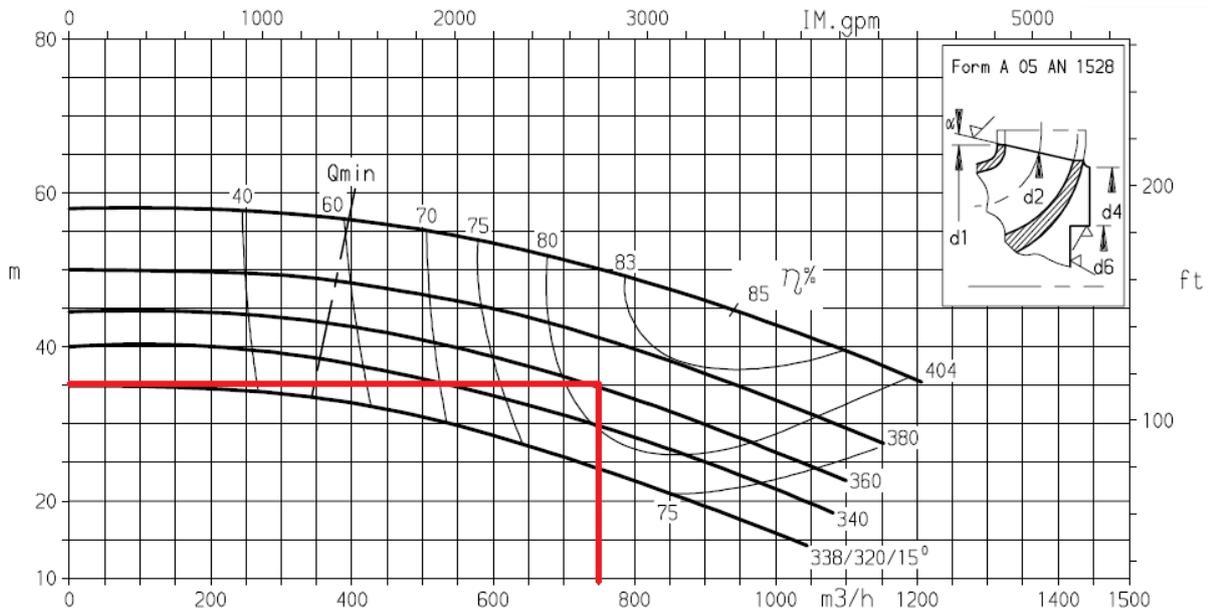
### Selección de bombas.

En el caso de la **Variante 4**, se efectuó la selección de las bombas a partir de los datos siguientes:

- $Q_b = 623,46$  L/s (caudal de bombeo)
- $H_b = 35,05$  m.c.a. (carga de bombeo)
- $E_b = 81,5\%$
- $P_b = 90,33$  kW
- $P_n = 90$  kW

Con estos datos y el catálogo se seleccionó la bomba **CPK/HPK 250-400-360**.

**Figura 2.23 Curvas características de la bomba obtenida (CPK/HPK 250-400-360).**



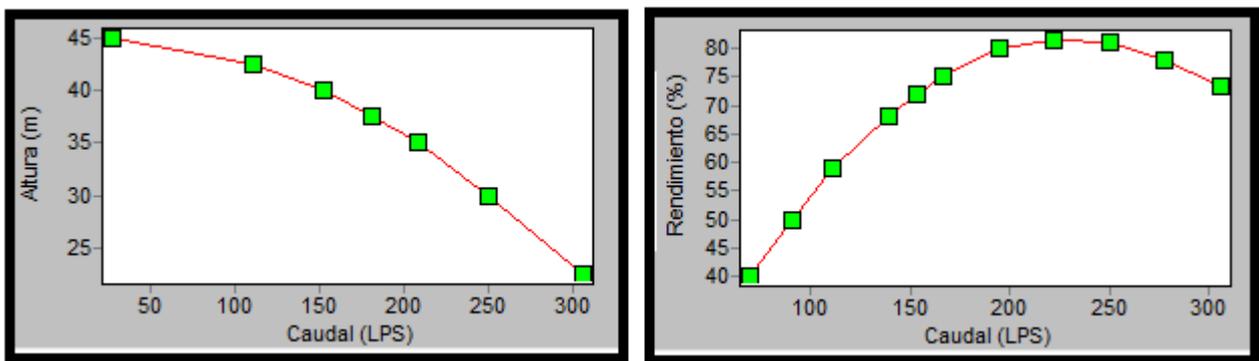
**Tabla 2.12 Curva característica de carga vs caudal.**

<b>H (m)</b>	45	42,5	40	37,5	35	30	22,5
<b>Q (L/s)</b>	27,78	111,11	157,78	180,56	208,33	250	305,56

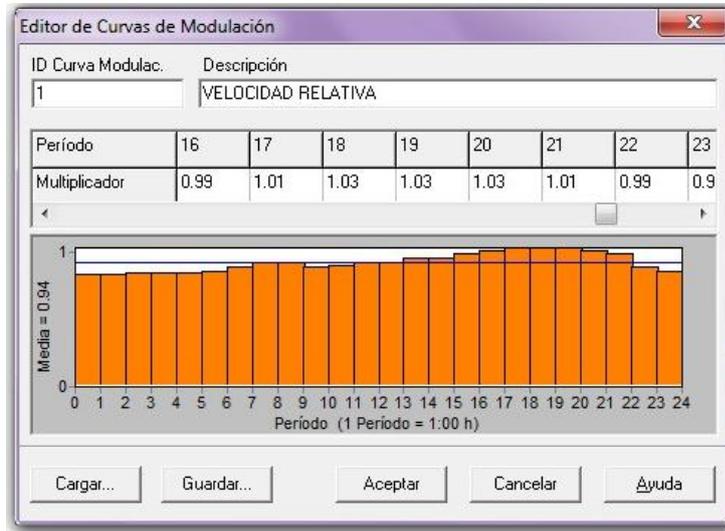
**Tabla 2.13 Curva característica de rendimiento vs caudal.**

<b>η (%)</b>	40	50	59	68	72	75	80	81,5	81	78	73,5
<b>Q (L/s)</b>	69,44	90,28	111,11	139,89	152,78	166,67	194,45	222,22	250	277,78	305,56

**Fig. 2.24 Curvas de comportamiento introducidas en EPANET (variante 4).**



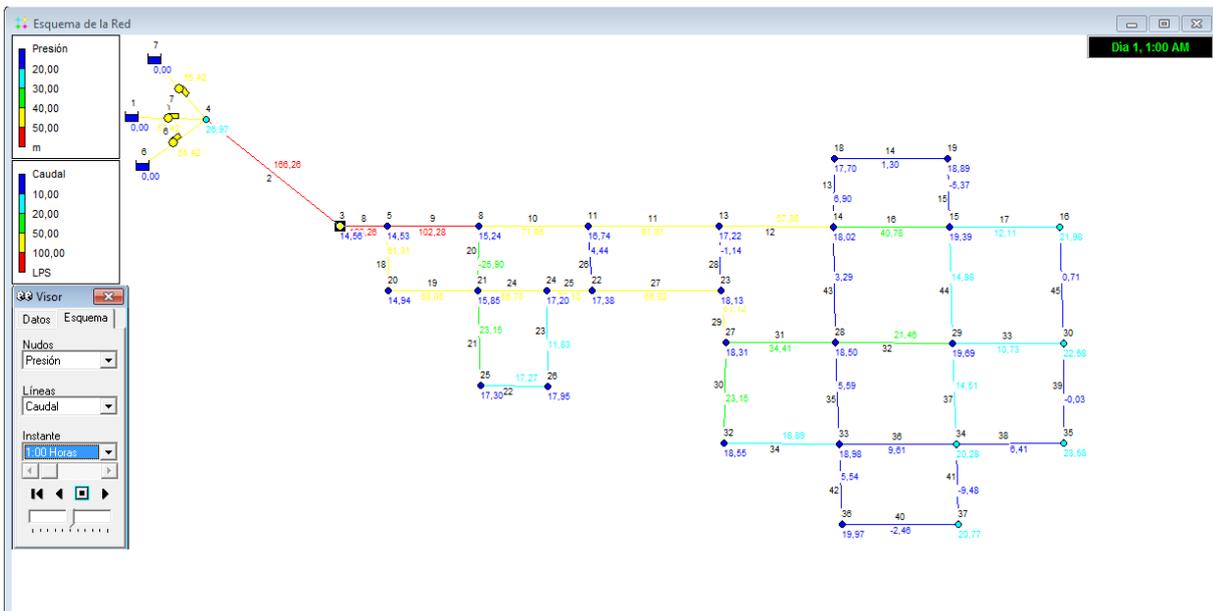
**Figura 2.25** Curva de modulación horaria de la velocidad de giro aplicada a las electro-bombas.



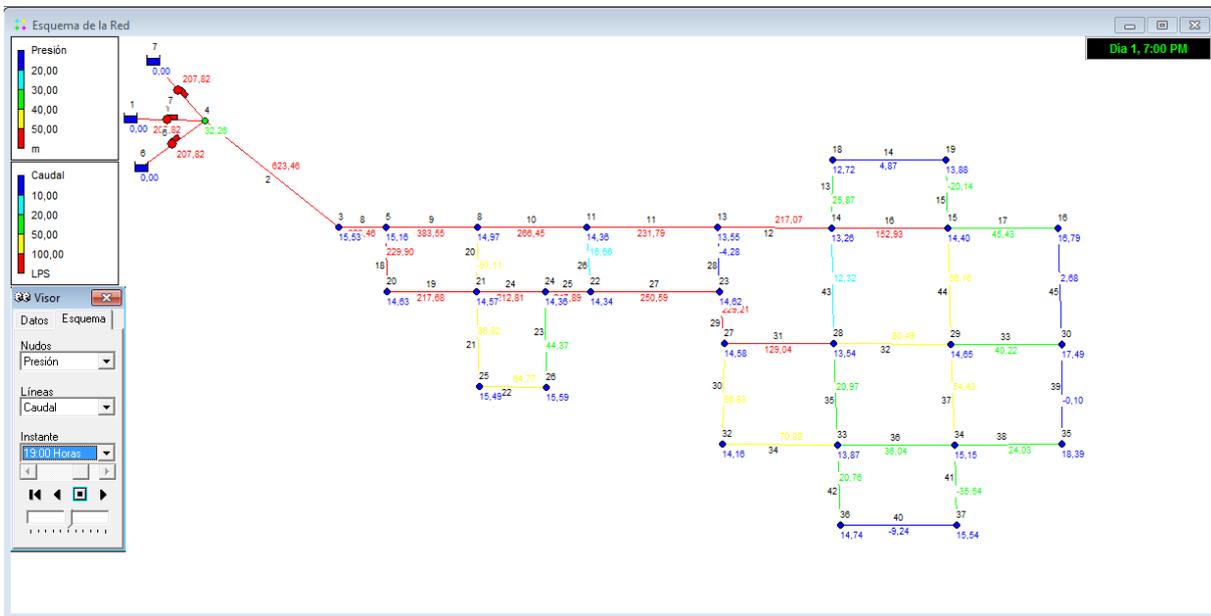
**2.9.1. Resultados de la simulación en periodo extendido para la (DMD).**

El comportamiento de la presiones en los horarios de mínimo y máximo consumo tomado de EPANET, reflejó que las presiones en la conductora no exceden los 25 m.c.a., este valor es representado en los nodos según la escala de colores de las figuras 2.26 y 2.27 con color verde azul.

**Figura 2.26** Comportamiento del sistema en hora de mínimo consumo (1:00 am).



**Figura 2.27 Comportamiento del sistema en hora de mínimo consumo (7:00am).**



En esta variante se eligió una bomba más pequeña como se pudo observar en la figura 2.23. En los distintos horarios de máximo y mínimo consumo según la demanda las bombas instaladas disminuyen y aumentan la velocidad de giro debido a los variadores de velocidad instalados. Logrando con este sistema un ahorro importante de energía eléctrica y costo de inversión.

## 2.10. Análisis de un Sistema de Bombeo con Inyección Directa a la Red con (BVF) y, (BVV) (Variante 5).

Esta variante, se desarrolló incorporando a una de las bombas de trabajo, un variador de velocidad. De esta forma, según la demanda vaya cambiando, los variadores modificarán su velocidad de giro siempre por debajo de su velocidad nominal para garantizar completarla, las demás bombas se instalaron con velocidad fija para que arranquen y paren en función de las presiones de consigna.

### Selección de bombas.

En el caso de la **Variante 5**, se efectuó la selección de las bombas a partir de los datos siguientes:

$Q_b = 623,46$  L/s (caudal de bombeo)

$H_b = 41,5$  m.c.a. (carga de bombeo)

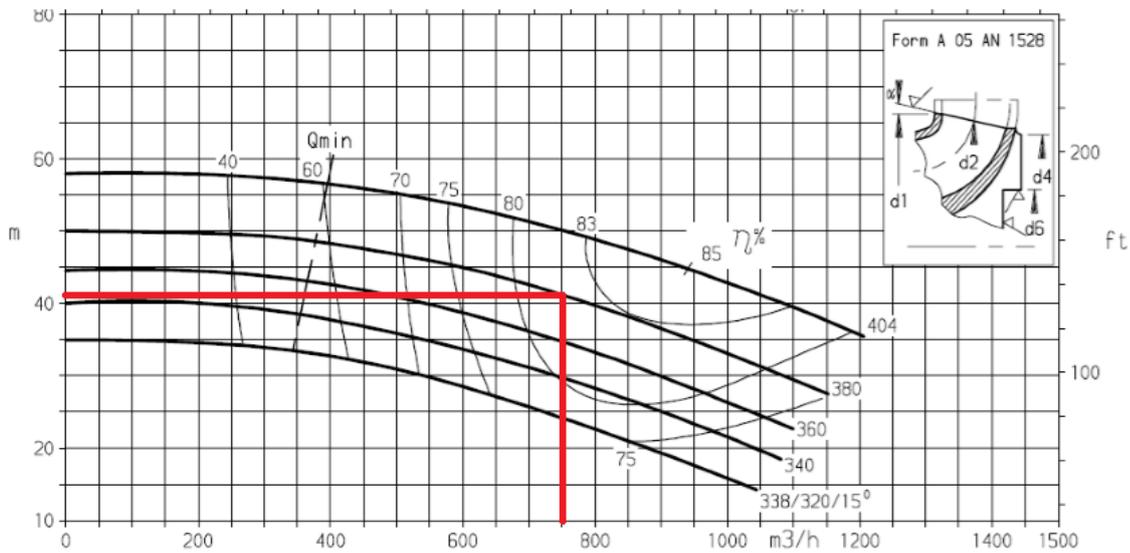
$E_b = 81\%$

$P_b = 91,50$  kW

$P_n = 110$  kW

Con estos datos y el catálogo se seleccionó la bomba **CPK/HPK 250-400-380**.

**Figura 2.28** Curvas características de la bomba obtenida (CPK/HPK 250-400).



Los datos correspondientes a estas curvas características (Capacidad y Rendimiento), fueron introducidos en el software EPANET 2.0 para poder simular su comportamiento en la instalación bajo determinadas condiciones de funcionamiento.

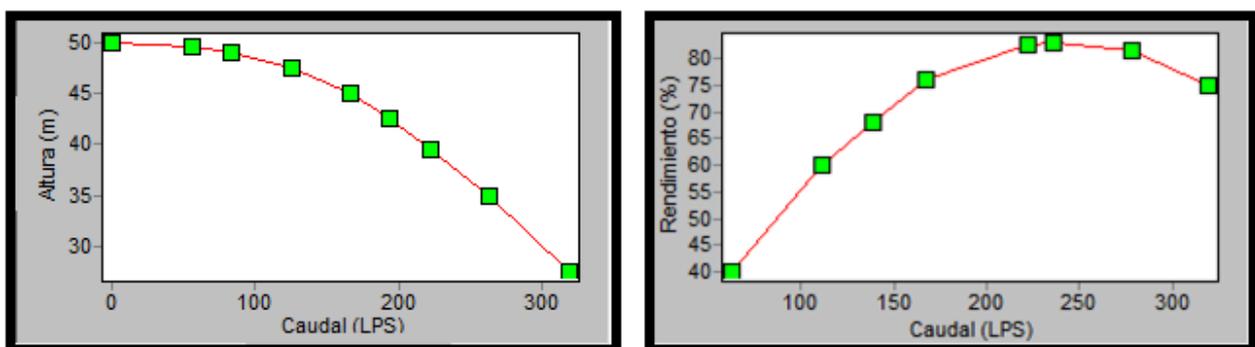
**Tabla 2.14** Curva característica de carga vs caudal.

<b>H (m)</b>	50	49,7	49	47,5	45	42,5	39,5	35	27,5
<b>Q (L/s)</b>	0	55,6	83,3	125	166,7	194,4	222,2	263,9	319,4

**Tabla 2.15** Curva característica de rendimiento vs caudal.

<b>η (%)</b>	40	60	68	76	82,5	83	81,5	75
<b>Q (L/s)</b>	62,5	111,1	138,9	166,7	222,2	236,1	277,8	319,4

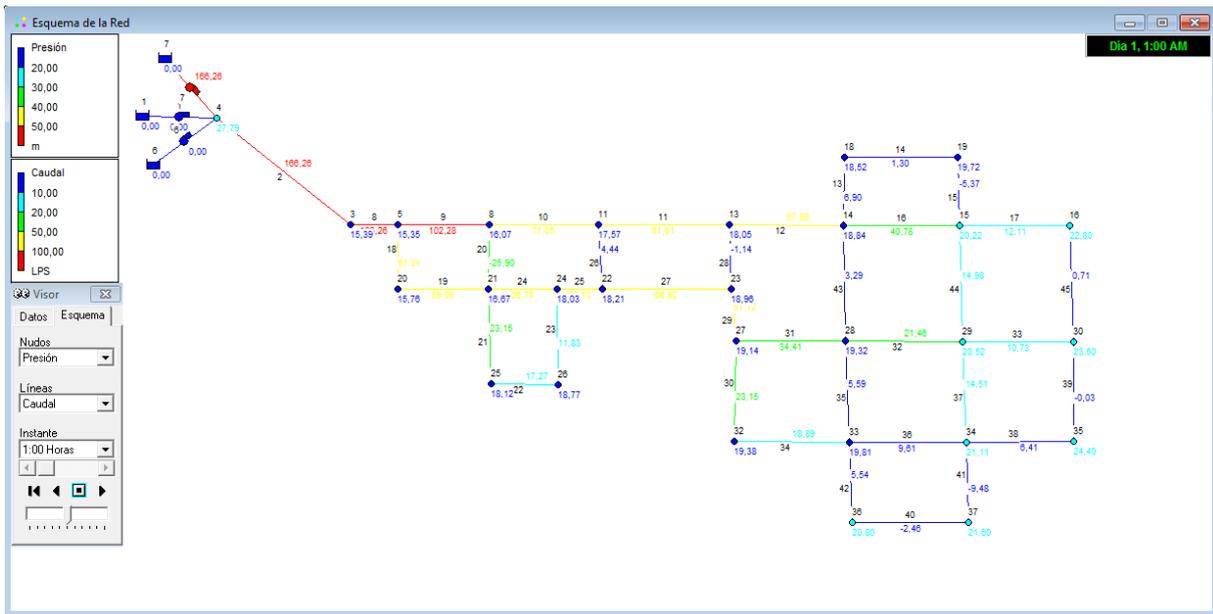
**Fig. 2.29** Curvas de comportamiento introducidas en EPANET (variante 4).



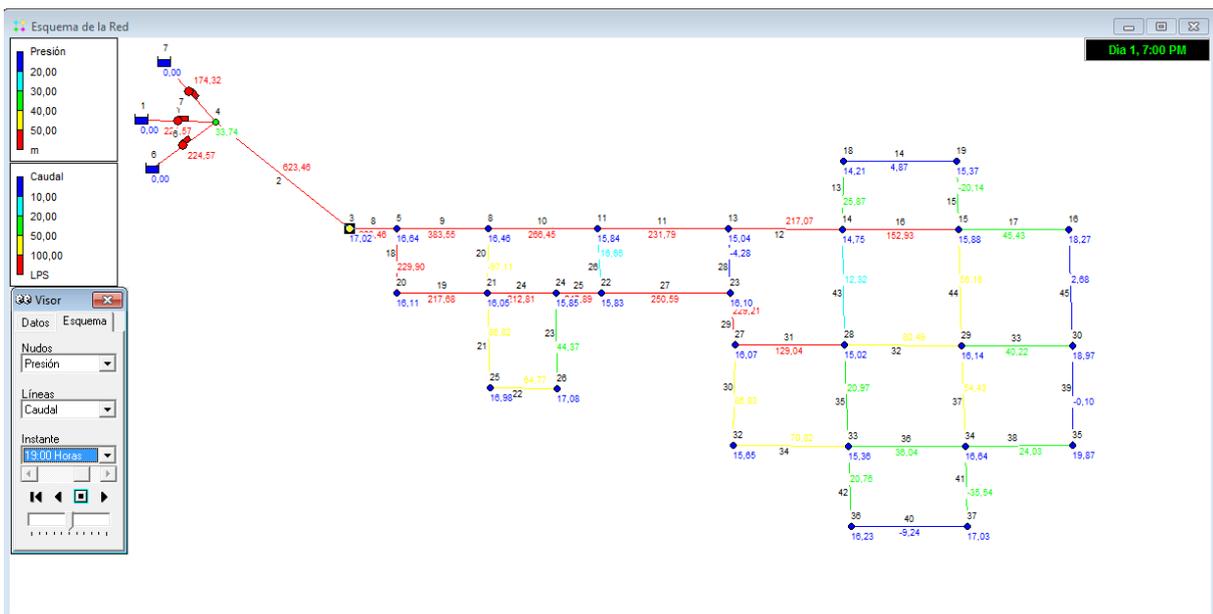
### 2.10.1. Resultados de la simulación en periodo extendido para la demanda máxima diaria (DMD)

El comportamiento de las presiones en los horarios de mínimo y máximo consumo tomado de EPANET, reflejó que las presiones en la red de distribución no exceden los 25 m.c.a., este valor es representado en los nodos según la escala de colores en las figuras 2.30 y 2.31.

**Figura 2.30 Comportamiento del sistema en hora de mínimo consumo (1:00 am).**



**Figura 2.31 Comportamiento del sistema en hora de máximo consumo (7:00 pm).**



En esta variante se puede observar en los distintos horarios de máximo y mínimo consumo según la demanda, como la bomba instalada con velocidad variable, disminuye y aumenta su velocidad de giro durante las 24 horas del día, y como las otras bombas instaladas con velocidad fija arrancan y paran en función de las presiones de consigna. Logrando con este sistema un ahorro considerable de energía eléctrica.

## CAPÍTULO 3

### **Capítulo 3.**

#### **3. Comparación Económica para las Variantes de Regulación Analizadas.**

El problema del dimensionamiento económico puede ser resumido bajo el siguiente planteamiento:

<p>MINIMIZAR <math>\Rightarrow</math> Costes de construcción + Costes de explotación Sujeto a <math>\Rightarrow</math> Restricciones de tipo funcional</p>
--

A continuación se realiza un análisis de los elementos de costo de mayor importancia para un sistema de abastecimiento de agua, como son: conductos, bombas y depósitos, tanto por el gran peso que representan en los costos como por su protagonismo fundamental durante la operación del sistema.

La valoración económica estará fundamentada en la obtención de los costos totales de inversión y del consumo energético para cada una de las variantes de regulación analizadas en el capítulo anterior, considerando en cada una ellas un consumo de agua variable durante las 24 horas del día y durante los 365 días del año. Se emplearon indicadores técnico-económicos (ITE) para las inversiones y el software Epanet 2.0 para la energía.

#### **3.1 Costos de energía consumida y potencia instalada.**

##### **VARIANTE 1.**

Para el caso de la variante 1, se estableció un mecanismo de control, que permite parar el bombeo, una vez que en el tanque de compensación se alcance el nivel máximo. El bombeo se reanudará cuando el nivel en el tanque sea de 3 metros.

##### **3.1.1. Análisis para el 100% de la DMD.**

Como puede observarse en la figura 3.1., en este caso las bombas funcionan durante las 24 horas del día. El informe de energía se presenta en la figura 3.1.

**Figura 3.1 Estado de la estación de bombeo para el 100% de la DMD.**

Instante en horas	Caudal LPS	Estado
0:00	142,10	Marcha
1:00	142,10	Marcha
2:00	142,10	Marcha
3:00	142,10	Marcha
4:00	142,10	Marcha
5:00	142,10	Marcha
6:00	142,10	Marcha
7:00	142,10	Marcha
8:00	142,10	Marcha
9:00	142,10	Marcha
10:00	142,10	Marcha
11:00	142,10	Marcha
12:00	142,10	Marcha
13:00	142,10	Marcha
14:00	142,10	Marcha
15:00	142,10	Marcha
16:00	142,10	Marcha
17:00	142,10	Marcha
18:00	142,10	Marcha
19:00	142,10	Marcha
20:00	142,10	Marcha
21:00	142,10	Marcha

En la figura anterior puede observarse que las bombas están en operación las 24 horas debido a que están trabajando para el 100% de la DMD con un gasto máximo diario de 426,3 L/s.

**Figura 3.2 Informe de energía para el 100% de la DMD.**

Bomba	Porcentaje Utilización	Rendimiento Medio	kWh /m3	Pot. Media kW	Pot. Punta kW	Coste /día
1	100,00	82,44	0,15	78,53	78,53	92,97
6	100,00	82,44	0,15	78,53	78,53	92,97
7	100,00	82,44	0,15	78,53	78,53	92,97
Coste Total						278,90
Término de Potencia						235,60

**3.1.2. Análisis para el 75% de la DMD.**

**Figura 3.3 Estado de la estación de bombeo para el 75% de la DMD.**

Instante en horas	Caudal LPS	Estado
0:00	142,10	Marcha
1:00	142,10	Marcha
2:00	142,10	Marcha
3:00	142,10	Marcha
4:00	142,10	Marcha
5:00	142,10	Marcha
6:00	0,00	Parada
7:00	0,00	Parada
8:00	142,10	Marcha
9:00	142,10	Marcha
10:00	142,10	Marcha
11:00	142,10	Marcha
12:00	142,10	Marcha
13:00	142,10	Marcha
14:00	142,10	Marcha
15:00	0,00	Parada
16:00	0,00	Parada
17:00	142,10	Marcha
18:00	142,10	Marcha
19:00	142,10	Marcha
20:00	142,10	Marcha
21:00	142,10	Marcha

Como puede observarse en la figura anterior, en este caso la operación diaria dura 20 horas y el informe de energía se presentan en la figura 3.4.

**Figura 3.4 Informe de energía para el 75% de la DMD.**

Bomba	Porcentaje Utilización	Rendimiento Medio	kWh /m3	Pot.Medía kW	Pot.Punta kW	Coste /día
1	83,33	81,91	0,15	77,13	78,53	78,53
6	83,33	81,91	0,15	77,13	78,53	78,53
7	83,33	81,91	0,15	77,13	78,53	78,53
Coste Total						235,58
Término de Potencia						235,60

Se observa en la figura anterior, el informe de energía para un gasto máximo horario de 467,6 L/s.

**3.1.3. Análisis para el 60% de la DMD.**

**Figura 3.5 Estado de la estación de bombeo para el 60% de la DMD.**

Instante en horas	Caudal LPS	Estado
0:00	142,10	Marcha
1:00	142,10	Marcha
2:00	142,10	Marcha
3:00	142,10	Marcha
4:00	142,10	Marcha
5:00	142,10	Marcha
6:00	0,00	Parada
7:00	0,00	Parada
8:00	142,10	Marcha
9:00	142,10	Marcha
10:00	142,10	Marcha
11:00	142,10	Marcha
12:00	0,00	Parada
13:00	0,00	Parada
14:00	142,10	Marcha
15:00	142,10	Marcha
16:00	142,10	Marcha
17:00	142,10	Marcha
18:00	142,10	Marcha
19:00	142,10	Marcha
20:00	142,10	Marcha
21:00	142,10	Marcha

Como pudo observarse en la figura 3.5, en este caso la operación diaria duró 18 horas y el informe de energía consumida se presenta en la figura siguiente:

### Figura 3.6 Informe de energía para el 60% de la DMD.

El informe de energía para un gasto máximo de 374,08 L/s, se presenta a continuación:

Bomba	Porcentaje Utilización	Rendimiento Medio	kWh /m3	Pot. Media kW	Pot. Punta kW	Coste /día
1	75,00	81,31	0,15	75,56	78,53	66,68
6	75,00	81,31	0,15	75,56	78,53	66,68
7	75,00	81,31	0,15	75,56	78,53	66,68
Coste Total						200,04
Término de Potencia						235,60

## 3.2. VARIANTE 2

Para el caso de la variante 2, el bombeo se realizó durante las 24 horas, siendo instalado un sistema automatizado el cual permitirá que las bombas arranquen y paren, ya que el punto de operación de la bomba estará en función del comportamiento del sistema ante las variaciones de la presión y de la demanda.

### 3.2.1. Análisis para el 100% de la DMD.

Figura 3.7 Estado de la estación de bombeo para el 100% de la DMD (Bomba 1).

Instante en horas	Caudal LPS	Estado
0:00	166,26	Marcha
1:00	166,26	Marcha
2:00	207,82	Marcha
3:00	207,82	Marcha
4:00	249,38	Marcha
5:00	145,47	Marcha
6:00	187,04	Marcha
7:00	228,60	Marcha
8:00	228,60	Marcha
9:00	187,04	Marcha
10:00	207,82	Marcha
11:00	228,60	Marcha
12:00	228,60	Marcha
13:00	249,38	Marcha
14:00	249,38	Marcha
15:00	180,11	Marcha
16:00	193,97	Marcha
17:00	207,82	Marcha
18:00	207,82	Marcha
19:00	207,82	Marcha
20:00	193,97	Marcha
21:00	180,11	Marcha

Como puede observarse en la figura 3.7, en este caso la operación diaria de la bomba 1 dura las 24 horas ya que esta se mantendrá funcionando siempre con el sistema automatizado.

En el caso de operación de las bombas 6 y 7 las cuales tienen instalados consignas de operación en función de la presión que exista, las mismas no operan las 24 horas del día, ya que solamente lo hacen cuando la demanda lo requiera logrando con esto un ahorro considerable de energía y también se logra un aumento de vida útil del equipo.

La bomba 7 solo entrará en operación 6 horas diarias, en el horario comprendido desde las 2:00 hasta las 8:00 horas, siendo este un horario pico de para el consumo de agua, y debido a la instalación del sistema automático a esta bomba se le permite parar cuando la presión supere los 23 m.c.a. en el nodo 5 y arrancar cuando la presión esté por debajo de los 15 m.c.a. en ese mismo nodo.

La bomba 6 solo entrará en operación diaria durante 19 horas en el horario de 3:00 hasta las 22:00 horas, ya que se programó para que pueda parar cuando la presión supere los 30 m.c.a en el nodo 5 y arrancar cuando la presión caiga por debajo de los 15 m.c.a.

**Figura 3.8 Informe de energía para el 100% de la DMD.**

Bomba	Porcentaje Utilización	Rendimiento Medio	kWh /m3	Pot. Media kW	Pot. Punta kW	Coste /día
1	100,00	79,07	0,14	102,15	108,32	121,07
6	79,17	79,04	0,14	102,25	108,32	105,57
7	29,17	79,43	0,14	102,00	103,48	50,86
Coste Total						277,51
Término de Potencia						310,44

Como pudo observarse en la figura 3.8., se presentó el informe de energía para este caso, en el que la demanda máxima horaria fue de 643,26 L/s.

### 3.2.2. Análisis para el 75% de la DMD.

**Figura 3.9 Estado de la estación de bombeo para el 75% de la DMD (Bomba 1).**

Instante en horas	Caudal LPS	Estado
0:00	124,69	Marcha
1:00	124,69	Marcha
2:00	155,87	Marcha
3:00	155,87	Marcha
4:00	187,04	Marcha
5:00	218,21	Marcha
6:00	140,28	Marcha
7:00	171,45	Marcha
8:00	171,45	Marcha
9:00	140,28	Marcha
10:00	155,87	Marcha
11:00	171,45	Marcha
12:00	171,45	Marcha
13:00	187,04	Marcha
14:00	187,04	Marcha
15:00	202,62	Marcha
16:00	218,21	Marcha
17:00	233,80	Marcha
18:00	233,80	Marcha
19:00	233,80	Marcha
20:00	218,21	Marcha
21:00	202,62	Marcha

Como puede observarse en la figura 3.9, en este caso la operación diaria de la bomba 1 dura las 24 horas ya que esta se mantendrá funcionando siempre con el sistema automatizado.

La bomba 7 para el 75% de la DMD no será necesaria su operación, ya que las otras bombas son capaces de suministrar la demanda requerida.

La bomba 6 solo estará en operación bajo esta condición durante 17 horas diarias, en el horario comprendido desde las 5:00 hasta las 21:00 horas, ya que se programó para que pueda parar cuando la presión supere los 30 m.c.a en el nodo 5 y arrancar cuando la presión caiga por debajo de los 15 m.c.a.

**Figura 3.10 Informe de energía para el 75% de la DMD.**

Bomba	Porcentaje Utilización	Rendimiento Medio	kWh /m3	Pot.Medía kW	Pot.Punta kW	Coste /día
1	100,00	76,11	0,16	99,19	105,72	118,65
6	70,83	77,31	0,15	100,08	105,72	96,42
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Coste Total						215,07
Término de Potencia						211,43

Como puede observarse en la figura 3.10, se presentó el informe de energía correspondiente, en que la demanda máxima horaria es de 467,67 L/s.

### **3.2.3. Análisis para el 60% de la DMD.**

Como puede observarse en la figura 3.11, en este caso la operación diaria de la bomba 1 dura las 24 horas, ya que esta se mantendrá funcionando siempre con el sistema automatizado.

La bomba 7 para el 75% de la DMD no será necesaria su operación, ya que las otras bombas son capaces de suministrar esta demanda.

La bomba 6 solo entrará en operación 16 horas diarias, en el horario comprendido desde las 6:00 horas hasta las 21:00 horas, ya que se programó para que pueda parar cuando la presión supere los 30 m.c.a en el nodo 5 y arrancar cuando la presión caiga por debajo de los 15 m.c.a.

**Figura 3.11 Estado de la estación de bombeo para el 60% de la DMD (Bomba 1)**

Instante en horas	Caudal LPS	Estado
0:00	99,75	Marcha
1:00	99,75	Marcha
2:00	124,69	Marcha
3:00	124,69	Marcha
4:00	149,63	Marcha
5:00	174,57	Marcha
6:00	224,45	Marcha
7:00	137,16	Marcha
8:00	137,16	Marcha
9:00	112,22	Marcha
10:00	124,69	Marcha
11:00	137,16	Marcha
12:00	137,16	Marcha
13:00	149,63	Marcha
14:00	149,63	Marcha
15:00	162,10	Marcha
16:00	174,57	Marcha
17:00	187,04	Marcha
18:00	187,04	Marcha
19:00	187,04	Marcha
20:00	174,57	Marcha
21:00	162,10	Marcha

En la figura siguiente, se presenta el informe de energía para este caso, en que la demanda máxima horaria es de 385,96 L/s.

**Figura 3.12 Informe de energía para el 60% de la DMD.**

Bomba	Porcentaje Utilización	Rendimiento Medio	kWh /m3	Pot. Media kW	Pot. Punta kW	Coste /día
1	100,00	69,80	0,18	94,45	104,59	112,96
6	66,67	70,94	0,18	95,06	100,96	87,20
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Coste Total						200,17
Término de Potencia						201,93

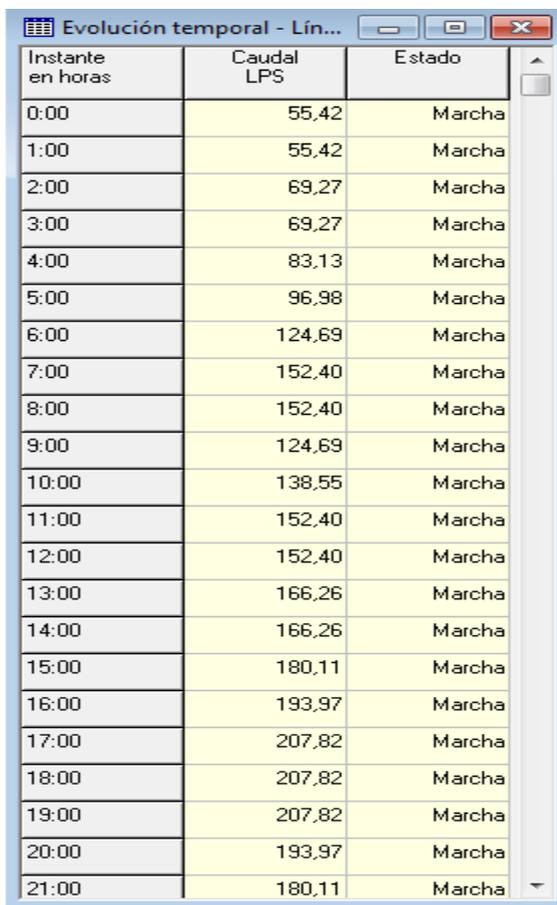
### 3.3. VARIANTE 3

La variante 3 se estableció para un sistema de bombeo con inyección directa a la red durante las 24 horas, instalando un variador de frecuencia para cada bomba. De esta forma, conforme la demanda vaya cambiando, todas las 3 bombas de trabajo modificarán su velocidad de giro) de forma que siempre funcionen próximas a su punto óptimo (punto de máximo rendimiento) o, al menos, en zonas de rendimiento aceptable.

En estos casos la operación diaria de las bombas dura las 24 horas, debido a que se instaló un variador de velocidad para cada bomba, permitiendo modificar su velocidad de giro según fluctúe la demanda, entregando solamente el caudal necesario.

#### 3.3.1. Análisis para el 100% de la DMD.

Figura 3.13 Estado de la estación de bombeo para el 100% de la DMD.



Instante en horas	Caudal LPS	Estado
0:00	55,42	Marcha
1:00	55,42	Marcha
2:00	69,27	Marcha
3:00	69,27	Marcha
4:00	83,13	Marcha
5:00	96,98	Marcha
6:00	124,69	Marcha
7:00	152,40	Marcha
8:00	152,40	Marcha
9:00	124,69	Marcha
10:00	138,55	Marcha
11:00	152,40	Marcha
12:00	152,40	Marcha
13:00	166,26	Marcha
14:00	166,26	Marcha
15:00	180,11	Marcha
16:00	193,97	Marcha
17:00	207,82	Marcha
18:00	207,82	Marcha
19:00	207,82	Marcha
20:00	193,97	Marcha
21:00	180,11	Marcha

**Figura 3.14 Informe de energía para el 100% de la DMD.**

Bomba	Porcentaje Utilización	Rendimiento Medio	kWh /m3	Pot. Media kW	Pot. Punta kW	Coste /día
1	100,00	65,48	0,15	72,00	100,86	91,16
6	100,00	65,48	0,15	72,00	100,86	91,16
7	100,00	65,48	0,15	72,00	100,86	91,16
Coste Total						273,49
Término de Potencia						302,58

Como puede observarse en la figura 3.14, se presentó un informe de energía para este caso, en que la demanda máxima diaria es de 623,46 L/s.

**3.3.2. Análisis para el 75% de la DMD.**

**Figura 3.15 Estado de la estación de bombeo para el 75% de la DMD.**

Instante en horas	Caudal LPS	Estado
0:00	41,56	Marcha
1:00	41,56	Marcha
2:00	51,96	Marcha
3:00	51,96	Marcha
4:00	62,35	Marcha
5:00	72,74	Marcha
6:00	93,52	Marcha
7:00	114,30	Marcha
8:00	114,30	Marcha
9:00	93,52	Marcha
10:00	103,91	Marcha
11:00	114,30	Marcha
12:00	114,30	Marcha
13:00	124,69	Marcha
14:00	124,69	Marcha
15:00	135,08	Marcha
16:00	145,47	Marcha
17:00	155,87	Marcha
18:00	155,86	Marcha
19:00	155,86	Marcha
20:00	145,47	Marcha
21:00	180,11	Marcha

En la figura 3.16 se presenta el informe de energía para este caso, en que la demanda máxima horaria es de 467,58 L/s.

**Figura 3.16 Informe de energía para el 75% de la DMD.**

Bomba	Porcentaje Utilización	Rendimiento Medio	kWh /m3	Pot. Media kW	Pot. Punta kW	Coste /día
1	100,00	57,84	0,17	59,90	83,79	75,36
6	100,00	57,84	0,17	59,90	83,79	75,36
7	100,00	57,84	0,17	59,90	83,79	75,36
Coste Total						226,07
Término de Potencia						251,38

**3.3.3. Análisis para el 60% de la DMD.**

**Figura 3.17 Estado de la estación de bombeo para el 60% de la DMD.**

Instante en horas	Caudal LPS	Estado
0:00	33,25	Marcha
1:00	33,25	Marcha
2:00	41,56	Marcha
3:00	41,56	Marcha
4:00	49,88	Marcha
5:00	58,19	Marcha
6:00	74,82	Marcha
7:00	91,44	Marcha
8:00	91,44	Marcha
9:00	74,82	Marcha
10:00	83,13	Marcha
11:00	91,44	Marcha
12:00	91,44	Marcha
13:00	99,75	Marcha
14:00	99,75	Marcha
15:00	103,91	Marcha
16:00	116,38	Marcha
17:00	124,69	Marcha
18:00	124,69	Marcha
19:00	124,69	Marcha
20:00	116,38	Marcha
21:00	108,07	Marcha

En la figura siguiente se presenta el informe de energía para este caso, en que la demanda máxima diaria es de 374,08 L/s.

**Figura 3.18 Informe de energía para el 60% de la DMD.**

Bomba	Porcentaje Utilización	Rendimiento Medio	kWh /m3	Pot.Media kW	Pot.Punta kW	Coste /día
1	100,00	50,52	0,18	52,33	67,17	65,77
6	100,00	50,52	0,18	52,33	67,17	65,77
7	100,00	50,52	0,18	52,33	67,17	65,77
Coste Total						197,32
Término de Potencia						201,50

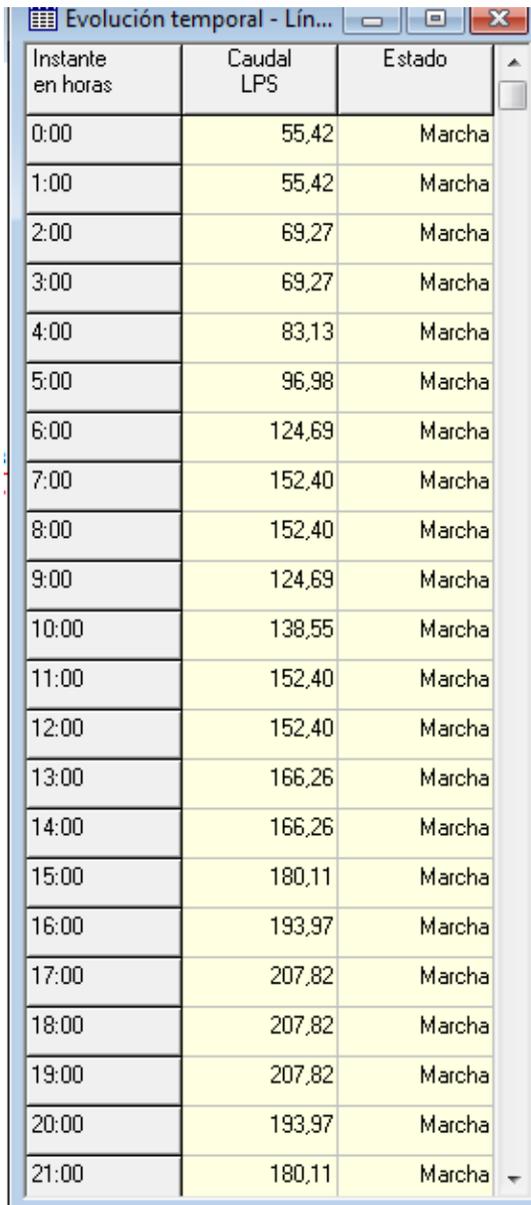
### 3.4. VARIANTE 4

En esta variante al igual que en la variante anterior se trabajó con bombas en paralelo funcionando cada una de ellas con un variador de velocidad incorporado. En este caso las bombas resultaron ser más pequeñas, ya que la velocidad de giro se modifica hasta un 10% por encima de la nominal, posibilitando entregar la demanda necesaria.

En estos casos también la operación diaria de las bombas dura las 24 horas, debido a que se instaló un variador de velocidad para cada bomba, permitiendo modificar su velocidad de giro según fluctúe la demanda, entregando solamente el caudal necesario.

### 3.4.1. Análisis para el 100% de la DMD.

Figura 3.19 Estado de la estación de bombeo para el 100% de la DMD.



Instante en horas	Caudal LPS	Estado
0:00	55,42	Marcha
1:00	55,42	Marcha
2:00	69,27	Marcha
3:00	69,27	Marcha
4:00	83,13	Marcha
5:00	96,98	Marcha
6:00	124,69	Marcha
7:00	152,40	Marcha
8:00	152,40	Marcha
9:00	124,69	Marcha
10:00	138,55	Marcha
11:00	152,40	Marcha
12:00	152,40	Marcha
13:00	166,26	Marcha
14:00	166,26	Marcha
15:00	180,11	Marcha
16:00	193,97	Marcha
17:00	207,82	Marcha
18:00	207,82	Marcha
19:00	207,82	Marcha
20:00	193,97	Marcha
21:00	180,11	Marcha

**Figura 3.20 Informe de energía para el 100% de la DMD.**

Bomba	Porcentaje Utilización	Rendimiento Medio	kWh /m3	Pot. Media kW	Pot. Punta kW	Coste /día
1	100,00	64,93	0,15	72,06	99,99	91,00
6	100,00	64,93	0,15	72,06	99,99	91,00
7	100,00	64,93	0,15	72,06	99,99	91,00
Coste Total						272,99
Término de Potencia						299,96

En la figura anterior se presentó el informe de energía para este caso, en que la demanda máxima horaria es de 623,46 L/s.

**3.4.2. Análisis para el 75% de la DMD.**

**Figura 3.21 Estado de la estación de bombeo para el 75% de la DMD.**

Instante en horas	Caudal LPS	Estado
0:00	41,56	Marcha
1:00	41,56	Marcha
2:00	51,96	Marcha
3:00	51,96	Marcha
4:00	62,35	Marcha
5:00	72,74	Marcha
6:00	93,52	Marcha
7:00	114,30	Marcha
8:00	114,30	Marcha
9:00	93,52	Marcha
10:00	103,91	Marcha
11:00	114,30	Marcha
12:00	114,30	Marcha
13:00	124,69	Marcha
14:00	124,69	Marcha
15:00	135,08	Marcha
16:00	145,47	Marcha
17:00	155,87	Marcha
18:00	155,86	Marcha
19:00	155,86	Marcha
20:00	145,47	Marcha
21:00	135,08	Marcha

**Figura 3.22 Informe de energía para el 75% de la DMD.**

Bomba	Porcentaje Utilización	Rendimiento Medio	kWh /m3	Pot. Media kW	Pot. Punta kW	Coste /día
1	100,00	56,25	0,17	59,17	73,97	73,77
6	100,00	56,25	0,17	59,17	73,97	73,77
7	100,00	56,25	0,17	59,17	73,97	73,77
Coste Total						221,31
Término de Potencia						221,92

En la figura anterior fue presentado el informe de energía para este caso, en que la demanda máxima horaria fue de 467,58 L/s.

**3.4.3. Análisis para el 60% de la DMD.**

**Figura 3.23 Estado de la estación de bombeo para el 60% de la DMD.**

Instante en horas	Caudal LPS	Estado
0:00	33,25	Marcha
1:00	33,25	Marcha
2:00	41,56	Marcha
3:00	41,56	Marcha
4:00	49,88	Marcha
5:00	58,19	Marcha
6:00	74,82	Marcha
7:00	91,44	Marcha
8:00	91,44	Marcha
9:00	74,82	Marcha
10:00	83,13	Marcha
11:00	91,44	Marcha
12:00	91,44	Marcha
13:00	99,75	Marcha
14:00	99,75	Marcha
15:00	108,07	Marcha
16:00	116,38	Marcha
17:00	124,69	Marcha
18:00	124,69	Marcha
19:00	124,69	Marcha
20:00	116,38	Marcha
21:00	108,07	Marcha

El informe de energía para este caso, en que la demanda máxima horaria es de 374,08 L/s, se presenta en la figura siguiente:

**Figura 3.24 Informe de energía para el 60% de la DMD.**

Bomba	Porcentaje Utilización	Rendimiento Medio	kWh /m3	Pot. Media kW	Pot. Punta kW	Coste /día
1	100,00	49,65	0,19	52,98	65,37	66,36
6	100,00	49,65	0,19	52,98	65,37	66,36
7	100,00	49,65	0,19	52,98	65,37	66,36
Coste Total						199,09
Término de Potencia						196,10

### 3.5. VARIANTE 5

En esta variante se consideró el bombeo con inyección directa a la red instalando en la bomba 7 un variador de velocidad para regular su velocidad de giro. Para las bombas de velocidad fija 1 y 6 se les aplicó un mecanismo de control automático para permitir que las mismas arranquen y paren en función de las necesidades de demanda y presión en la red de distribución.

#### 3.5.1. Análisis para el 100% de la DMD.

**Figura 3.25 Estado de la estación de bombeo para el 100% de la DMD (Bomba 7).**

Instante en horas	Caudal LPS	Estado
0:00	166,26	Marcha
1:00	166,26	Marcha
2:00	207,82	Marcha
3:00	207,82	Marcha
4:00	3,67	Marcha
5:00	22,21	Marcha
6:00	110,14	Marcha
7:00	13,54	Marcha
8:00	200,38	Marcha
9:00	110,14	Marcha
10:00	158,67	Marcha
11:00	13,54	Marcha
12:00	13,54	Marcha
13:00	51,20	Marcha
14:00	74,77	Marcha
15:00	90,27	Marcha
16:00	132,58	Marcha
17:00	174,32	Marcha
18:00	174,32	Marcha
19:00	174,32	Marcha
20:00	115,50	Marcha
21:00	57,38	Marcha

En este caso la operación diaria de las bombas se mantuvo durante las 24 horas, aunque en el caso de la bomba 7 el variador de velocidad modifica su velocidad de giro en función de la demanda, solamente entregando el caudal necesario. La bomba 1 para este caso será necesario su operación en solo 11 horas, en el horario comprendido entre las 10:00 horas y las 20:00 horas, y se le aplicó un control automático que permite que pare cuando en el nodo 5 la presión este por encima de 20 m.c.a y arranque cuando la presión en ese nodo registre un valor inferior a los 15 m.c.a. La bomba 6 solo estará en operación durante 19 horas en el horario comprendido entre las 5:00 horas y las 24:00 horas, ya que se le aplicó un control automático para garantizar que pare cuando en el nodo 5 la presión este por encima de 30 m.c.a. y arranque cuando la presión en ese nodo registre un valor inferior a los 15 m.c.a.

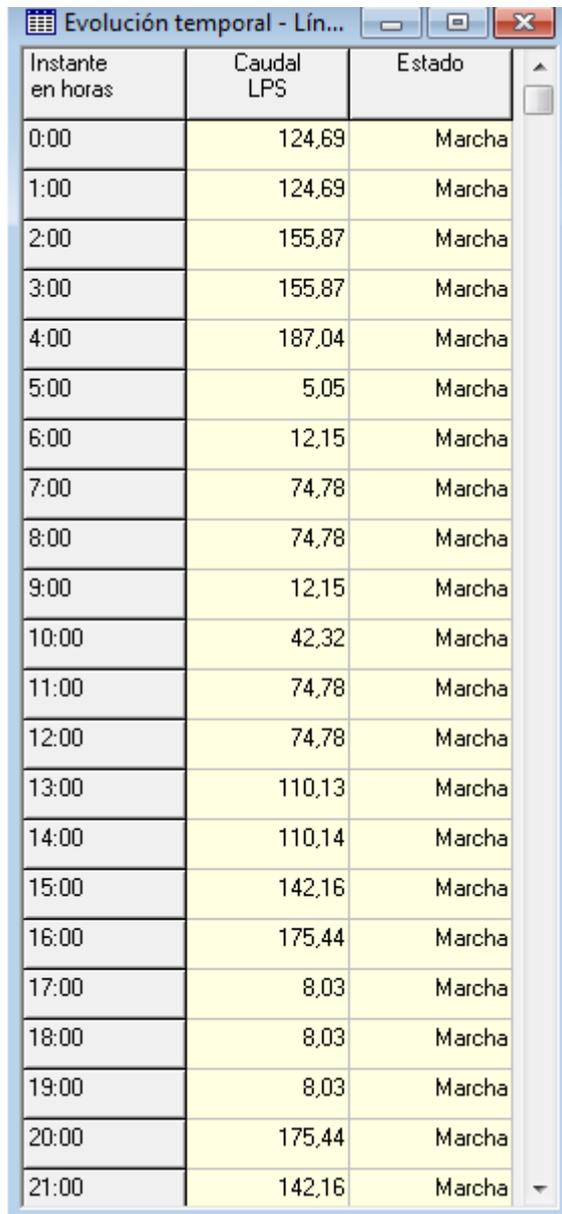
En la figura siguiente se presenta el informe de energía para este caso, en que la demanda máxima horaria es de 623,46 L/s.

**Figura 3.26 Informe de energía para el 100% de la DMD.**

Bomba	Porcentaje Utilización	Rendimiento Medio	kWh /m3	Pot. Media kW	Pot. Punta kW	Coste /día
1	50,00	82,49	0,13	104,73	106,96	76,25
6	83,33	82,38	0,12	106,65	110,57	112,96
7	100,00	59,18	0,19	58,00	87,87	71,55
Coste Total						260,76
Término de Potencia						296,42

### 3.5.2. Análisis para el 75% de la DMD.

Figura 3.27 Estado de la estación de bombeo para el 100% de la DMD (Bomba 7).



Instante en horas	Caudal LPS	Estado
0:00	124,69	Marcha
1:00	124,69	Marcha
2:00	155,87	Marcha
3:00	155,87	Marcha
4:00	187,04	Marcha
5:00	5,05	Marcha
6:00	12,15	Marcha
7:00	74,78	Marcha
8:00	74,78	Marcha
9:00	12,15	Marcha
10:00	42,32	Marcha
11:00	74,78	Marcha
12:00	74,78	Marcha
13:00	110,13	Marcha
14:00	110,14	Marcha
15:00	142,16	Marcha
16:00	175,44	Marcha
17:00	8,03	Marcha
18:00	8,03	Marcha
19:00	8,03	Marcha
20:00	175,44	Marcha
21:00	142,16	Marcha

Para este caso la bomba 1 trabajará solamente durante 3 horas, en el horario comprendido desde las 17:00 horas hasta las 19:00 horas, debido a los requerimientos de caudal y presión en la red de distribución.

La bomba 6 solo estará funcionando durante 18 horas por día, en el horario comprendido desde las 5:00 horas hasta las 22:00 horas, debido a los requerimientos de caudal y presión en la red de distribución, a la misma se le aplicó un control automático para garantizar que pare cuando en el nodo 5 la presión este por encima de 30 m.c.a. y arranque cuando la presión en ese nodo registre un valor inferior a los 15 m.c.a.

**Figura 3.28 Informe de energía para el 60% de la DMD.**

Bomba	Porcentaje Utilización	Rendimiento Medio	kWh /m3	Pot.Media kW	Pot.Punta kW	Coste /día
1	12,50	82,77	0,13	105,26	105,26	23,82
6	75,00	82,04	0,12	109,20	110,59	107,46
7	100,00	55,90	0,19	49,49	98,56	56,31
Coste Total						187,59
Término de Potencia						218,13

En la figura anterior se presentó el informe de energía para este caso, en que la demanda máxima horaria es de 467,58 L/s.

### 3.5.3. Análisis para el 60% de la DMD.

**Figura 3.29 Estado de la estación de bombeo para el 60% de la DMD.**

Instante en horas	Caudal LPS	Estado
0:00	99,75	Marcha
1:00	99,75	Marcha
2:00	124,69	Marcha
3:00	124,69	Marcha
4:00	149,63	Marcha
5:00	174,57	Marcha
6:00	3,08	Marcha
7:00	0,20	Marcha
8:00	0,20	Marcha
9:00	3,08	Marcha
10:00	3,67	Marcha
11:00	0,20	Marcha
12:00	0,20	Marcha
13:00	30,25	Marcha
14:00	30,25	Marcha
15:00	42,32	Marcha
16:00	79,87	Marcha
17:00	110,13	Marcha
18:00	110,14	Marcha
19:00	110,14	Marcha
20:00	79,87	Marcha
21:00	53,52	Marcha

En el caso de la bomba 1 que opera con velocidad de giro fija no es necesario su operación, debido a que el caudal necesario para abastecer la demanda se cubre con las otras dos bombas.

La bomba 6 solo estará en operación 18 horas diarias, en el horario comprendido desde las 6:00 horas hasta las 23:00 horas, debido a los requerimientos de caudal y presión en la red de distribución. A esta bomba se le aplicó un mecanismo de control que permite que pare cuando en el nodo 5 la presión este por encima de 30 m.c.a. y arranque cuando en este nudo la presión se encuentre por debajo de 15 m.c.a.

**Figura 3.30 Informe de energía para el 60% de la DMD.**

Bomba	Porcentaje Utilización	Rendimiento Medio	kWh /m3	Pot. Media kW	Pot. Punta kW	Coste /día
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	75,00	81,33	0,12	108,49	110,66	108,95
7	100,00	49,15	0,21	34,87	74,56	42,52
Coste Total						151,47
Término de Potencia						173,81

En la figura anterior se presentó el informe de energía para este caso, en que la demanda máxima horaria es de 374,08 L/s.

### 3.6. Costos de inversión y totales.

Para estimar los costos de inversión se emplearon algunos índices técnicos - económicos suministrados por la Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de Villa Clara (EIPH-VC), los cuales se presentan a continuación:

#### Estación de Bombeo (incluye obra civil)

Voltaje de la estación de bombeo (460 V)

$$C_{EB} = \$1\ 000 \cdot P$$

Donde:

$C_{EB}$  = Costo de la Estación de Bombeo, en \$.

P = Potencia de Bombeo Nominal Instalada, en KW.

#### Tanque de Almacenamiento

$$C_{TA} = \$76,5 \cdot VT$$

Donde:

$C_{TA}$  = Costo del Tanque de Almacenamiento, en \$.

$V_T$  = Volumen total del tanque, en m<sup>3</sup>.

## Conductoras

$$C_C = C_T + C_{MTC}$$

Donde:

$C_C$  = Costo de la conductora, en \$.

$$C_T = \$0,08 \cdot (D + e)^{1,25} \cdot L$$

Donde:

$C_T$  = Costo de la tubería instalada, en \$.

D = Diámetro exterior de la conductora, en mm.

e = Espesor de la tubería empleada, en mm.

L = Longitud de la conductora, en m.

$$C_{MTC} = \$0,81 \cdot V_{EXC} + \$3,12 \cdot V_{CA} + \$5,39 \cdot V_{RMAN} + \$1,84 \cdot V_{RMEC}$$

Donde:

$C_{MTC}$  = Costo del movimiento de tierra de la conductora, en \$.

$V_{EXC}$  = Volumen de excavación de la conductora, en m<sup>3</sup>.

$V_{CA}$  = Volumen de colchón de arena, en m<sup>3</sup>.

### **Factor de amortización.**

El objetivo del diseño económico como la provisión de una solución factible al mínimo costo, donde por su naturaleza, los costos implicados están referidos a diferentes bases temporales; el costo de inversión constituye un pago único, expresado en unidades monetarias, que es necesario realizar para acometer la construcción y puesta en servicio de la red; mientras, que los costos de operación corresponden a las cantidades devengadas periódicamente para mantener el funcionamiento del sistema en las condiciones de servicio, los períodos de referencia son normalmente de duración anual y en consecuencia, los gastos de operación se expresan en unidades monetarias por año.

Surge por tanto la necesidad de expresar todos los costes implicados en referencia a una única base temporal, y la forma más sencilla de llevarlo a cabo es refiriendo los costos de inversión a un término anual (amortización) para comparar con los costos de operación.

Para calcular el factor de amortización se utilizan dos parámetros fundamentales, a saber, el período de vida T del proyecto y la tasa de interés r de la amortización. Tal como se ha expuesto, la tasa de interés r representa un coste de oportunidad y corresponde al precio del dinero en el mercado, lo cual es cierto cuando la entidad inversora debe endeudarse para acometer el proyecto; sin embargo, cuando se emplean recursos públicos para llevar a cabo el proyecto, la tasa de interés se identifica como el beneficio que podría reportar a la economía nacional una utilización alternativa de la cantidad invertida. Estos factores son importantes en la medida de que las comparaciones entre costes son muy sensibles a la tasa de interés empleada. Sobre esta base, el procedimiento habitual consiste en contabilizar el coste del sistema sobre una base temporal anual, como la suma del coste de amortización de la inversión más el coste de operación del sistema, esto es:

**Costo Anual del Sistema = Inversión · A/P + Costo Anual de Operación**

Este factor de amortización, puede calcularse a partir de la expresión siguiente:

$$\frac{A}{P} = \frac{r \cdot (1+r)^n}{(1+r)^n - 1}$$

Donde:

A – Valor de la anualidad resultante de un capital.

P – Valor presente de la inversión inicial, en este caso, el referido capital.

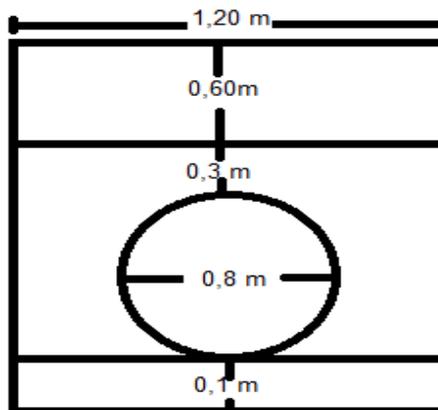
r – Tasa del interés compuesto → (7%).

n – Vida útil de la obra → Se asumió igual que el período de diseño de la obra (30 años).

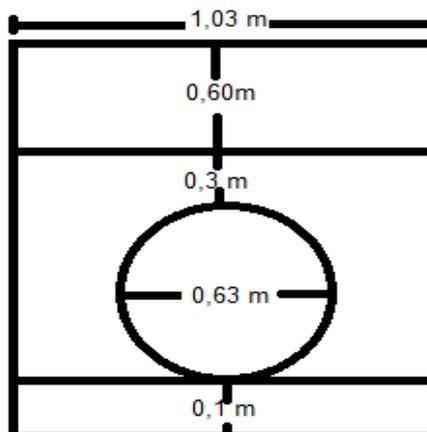
Por lo tanto, en los cálculos se utiliza: A/P = 0,08059

**Nota:** Estos costos de inversión han sido afectados por el factor (0.08059) que permite anualizar los mismos, factor que fue obtenido a partir de considerar una vida útil n = 30 años y una tasa de interés r = 7 %. No se incluyó el costo de la red de distribución porque son iguales para las dos variantes.

**Figura 3.31 Esquema para conductoras de D = 800 mm con L = 1500 m y 2500 m.**



**Figura 3.31 Esquema para conductoras de D = 630 mm con L = 2000 m.**



### 3.6.1. Costos de inversión (Variante 1)

#### Tanque de almacenamiento

$$C_{TA} = \$76,5 \cdot VT$$

$$C_{TA} = \$76,5 \cdot 7\,000 \cdot 0,08059 = \$43\,155,95 / \text{año}$$

#### Estación de Bombeo (incluye obra civil)

$$C_{EB} = \$1\,000 \cdot P$$

$$C_{EB} = \$1\,000 \cdot 450 \cdot 0,08059 = \$36\,265,5 / \text{año}$$

#### Conductoras

$$C_T = 0,08 \cdot (D + e)^{1,25} \cdot L$$

$$C_{MTC} = \$0,81 \cdot V_{EXC} + \$3,12 \cdot V_{CA} + \$5,39 \cdot V_{RMAN} + \$1,84 \cdot V_{RMEC}$$

$$\text{Conductora 1} \rightarrow D = 630 \text{ mm} \quad L = 2\,000 \text{ m}$$

$$V_{rmeC} = 0,618 \text{ m}^2 \cdot 2\,000 \text{ m} = 1\,236 \text{ m}^3$$

$$V_{rman} = 0,646 \text{ m}^2 \cdot 2\,000 \text{ m} = 1\,292 \text{ m}^3$$

$$V_{carena} = 0,103 \text{ m}^2 \cdot 2\,000 \text{ m} = 206 \text{ m}^3$$

$$V_{exc} = 1,68 \cdot 2\,000 \text{ m} = 3\,357,8 \text{ m}^3$$

$$C_T = 0,08 \cdot (D + e)^{1,25} \cdot L$$

$$C_T = 0,08 \cdot (630 + 22,8)^{1,25} \cdot 2\,000$$

$$C_T = \$527\,952,88$$

$$\text{Conductora 2} \rightarrow D = 800 \text{ mm} \quad L = 1\,500 \text{ m}$$

$$V_{rmeC} = 0,72 \text{ m}^2 \cdot 1\,500 \text{ m} = 1\,080 \text{ m}^3$$

$$V_{rman} = 0,817 \text{ m}^2 \cdot 1\,500 \text{ m} = 1\,225,5 \text{ m}^3$$

$$V_{carena} = 0,12 \text{ m}^2 \cdot 1\,500 \text{ m} = 180 \text{ m}^3$$

$$V_{exc} = 2,16 \text{ m}^2 \cdot 1\,500 \text{ m} = 3\,240 \text{ m}^3$$

$$C_T = 0,08 \cdot (D + e)^{1,25} \cdot L$$

$$C_T = 0,08 \cdot (800 + 29)^{1,25} \cdot 1\,500 \text{ m}$$

$$C_T = \$533\,794,89$$

$$C_{MTC} = \$0,81 \cdot V_{EXC} + \$3,12 \cdot V_{CA} + \$5,39 \cdot V_{RMAN} + \$1,84 \cdot V_{RMEC}$$

$$C_{MTC} = \$0,8 \cdot 6\,597,8 \text{ m}^3 + \$3,12 \cdot 386 \text{ m}^3 + \$5,39 \cdot 2\,517,5 \text{ m}^3 + \$1,84 \cdot 2\,316 \text{ m}^3$$

$$C_{MTC} = \$24\,379,3$$

$$C_{CTOTAL} = \$87\,530,99 / \text{año}$$

**Tabla 3.1 Costos Anuales (Variante 1).**

<b>Costos Anuales VARIANTE 1</b>			
<b>Inversión</b>	<b>Tanque</b>	<b>Estación de Bombeo</b>	<b>Conductora(s)</b>
		43 155,95	36 265,5
Subtotal	166 952,44		
<b>Costo Energía (100% DMD)</b>			
<b>Energía (146 días)</b>	<b>Potencia Instalada</b>	<b>Consumo Eléctrico</b>	<b>Sub Total</b>
	57 326,9	40 719,4	98 046,3
<b>Costo Energía (75% DMD)</b>			
<b>Energía (146 días)</b>	<b>Potencia Instalada</b>	<b>Consumo Eléctrico</b>	<b>Sub Total</b>
	57 326,9	34 394,68	91 721,58
<b>Costo (60% DMD)</b>			
<b>Energía (73 días)</b>	<b>Potencia Instalada</b>	<b>Consumo Eléctrico</b>	<b>Sub Total</b>
	28 663,45	14 602,92	43 266,37
<b>COSTO ENERGÍA ANUAL</b>			<b>233 034,25</b>
<b>COSTO TOTAL ANUAL</b>			<b>399 986,69</b>

### 3.6.2. Costos de inversión (Variante 2)

Estación de Bombeo (incluye obra civil)

$$C_{EB} = \$1\,000 \cdot P$$

$$C_{EB} = \$1\,000 \cdot 550 \cdot 0,08059 = \$44\,324,5$$

Conductora → D = 800 mm L = 2500 m

$$C_T = 0,08 \cdot (D + e)^{1,25} \cdot L$$

$$C_T = 0,08 \cdot (800 + 29)^{1,25} \cdot 2500$$

$$C_T = \$889\,658,14$$

$$V_{EXC} = 2,16 \text{ m}^2 \cdot 2\,500 \text{ m} = 5400 \text{ m}^3$$

$$V_{CA} = 0,12 \text{ m}^2 \cdot 2\,500 \text{ m} = 300 \text{ m}^3$$

$$V_{RMAN} = 0,817 \text{ m}^2 \cdot 2\,500 \text{ m} = 2\,042,5 \text{ m}^3$$

$$V_{RMEC} = 0,72 \text{ m}^2 \cdot 2500 \text{ m} = 1\,800 \text{ m}^3$$

$$C_{MTC} = \$0,81 \cdot V_{EXC} + \$3,12 \cdot V_{CA} + \$5,39 \cdot V_{RMAN} + \$1,84 \cdot V_{RMEC}$$

$$C_{MTC} = \$0,81 \cdot 5\,400 \text{ m}^3 + \$3,12 \cdot 300 \text{ m}^3 + \$5,39 \cdot 2\,042,5 \text{ m}^3 + \$1,84 \cdot 1\,800 \text{ m}^3$$

$$C_{MTC} = \$19\,631,08$$

$$C_{CTOTAL} = \$73\,279,62 / \text{año}$$

**Tabla 3.2 Costos Anuales (Variante 2).**

<b>Costos Anuales VARIANTE 2</b>			
<b>Inversión</b>	<b>Estación de Bombeo</b>		<b>Conductora</b>
		44 324,5	
Subtotal	117604,12		
<b>Costos Energía (100% DMD)</b>			
<b>Energía (146 días)</b>	<b>Potencia Instalada</b>	<b>Consumo Eléctrico</b>	<b>Sub Total</b>
	75 540,4	40 516,46	116 056,86
<b>Costos Energía (75% DMD)</b>			
<b>Energía (146 días)</b>	<b>Potencia Instalada</b>	<b>Consumo Eléctrico</b>	<b>Sub Total</b>
	51 447,97	31 400,22	82 848,19
<b>Costos Energía (60% DMD)</b>			
<b>Energía (73 días)</b>	<b>Potencia Instalada</b>	<b>Consumo Eléctrico</b>	<b>Sub Total</b>
	24 568,15	14 612,41	39 180,56
<b>COSTO ENERGÍA ANUAL</b>			<b>238 085,61</b>
<b>COSTO TOTAL ANUAL</b>			<b>355 689,73</b>

### 3.6.3. Costos de inversión (Variante 3)

Estación de Bombeo (incluye obra civil)

$$C_{EB} = \$1\,000 \cdot P$$

$$C_{EB} = \$1\,000 \cdot 550 \cdot 0,08059 = \$44\,324,5 / \text{año}$$

Conductora → D = 800 mm L = 2500 m (Similar a la de la variante 2)

$$C_{CTOTAL} = \$73\,279,62 / \text{año}$$

Variador de velocidad

Potencia = 110 kW

Referencia: ATV61HC16N4

Precio = \$11 463,26 / unidad

Transductor de presión

Salida: 420 mA

Rango: 3,2 – 40 V

Referencia: XMLF040DD2025

Precio = \$467,89 / unidad

Cable que va desde el transductor hasta el variador

Referencia: XZCP1241L5

Precio = \$54,87 / unidad

### Fuente de alimentación filtrada

Referencia: ABL8FEQ24060

Precio = \$122,43 / unidad

### Relai

Referencia: RXN4AB02BD

Precio = \$13,75 / unidad

### Base

Tipo: RX

Referencia: RXZE2N114M

Precio = \$237,00 / unidad

**Tabla 3.3 Costos Anuales (Variante 3).**

<b>Costos Anuales VARIANTE 3</b>			
<b>Inversión</b>	<b>Variadores de Velocidad</b>	<b>Estación de Bombeo</b>	<b>Conductora</b>
	2 988,08	44 324,5	73 279,62
<b>Sub Total</b>	120 592,2		
<b>Costos Energía (100% DMD)</b>			
<b>Energía (146 días)</b>	<b>Potencia Instalada</b>	<b>Consumo Eléctrico</b>	<b>Sub Total</b>
	73 627,8	39 929,54	113 557,34
<b>Costos Energía (75% DMD)</b>			
<b>Energía (146 días)</b>	<b>Potencia Instalada</b>	<b>Consumo Eléctrico</b>	<b>Sub Total</b>
	61 166,7	33 006,22	94 172,92
<b>Costos Energía (60% DMD)</b>			
<b>Energía (73 días)</b>	<b>Potencia Instalada</b>	<b>Consumo Eléctrico</b>	<b>Sub Total</b>
	24 517,05	14 404,36	38 921,41
<b>COSTO ENERGÍA ANUAL</b>			<b>246 651,67</b>
<b>COSTO TOTAL ANUAL</b>			<b>367 243,87</b>

### **3.6.4. Costos de inversión (Variante 4)**

#### Estación de Bombeo (incluye obra civil)

$$C_{EB} = \$1\,000 \cdot P$$

$$C_{EB} = \$1\,000 \cdot 450 \cdot 0,08059 = \$36\,265,5 / \text{año}$$

Conductora → D = 800 mm L = 2500 m (Similar a la de las variante 2 y 3)

$C_{CTOTAL} = \$73\,279,62 / \text{año}$

Variador de velocidad

Potencia = 90 kW

Referencia: ATV61HD90N4

Precio = \$7 683,25 / unidad

Transductor de presión

Salida: 420 mA

Rango: 3,2 – 40 V

Referencia: XMLF040DD2025

Precio = \$467,89 / unidad

Cable que va desde el transductor hasta el variador

Referencia: XZCP1241L5

Precio = \$54,87 / unidad

Fuente de alimentación filtrada

Referencia: ABL8FEQ24060

Precio = \$122,43 / unidad

Relai

Referencia: RXN4AB02BD

Precio = \$13,75 / unidad

Base

Tipo: RX

Referencia: RXZE2N114M

Precio = \$237,00 / unidad

**Tabla 3.4 Costos Anuales (Variante 4).**

<b>Costos Anuales VARIANTE 4</b>			
<b>Inversión</b>	<b>Variadores de Velocidad</b>	<b>Estación de Bombeo</b>	<b>Conductora</b>
	2 047,19	36 265,5	73 279,62
<b>Sub Total</b>	111 592,31		
<b>Costos Energía (100% DMD)</b>			
<b>Energía (146 días)</b>	<b>Potencia Instalada</b>	<b>Consumo Eléctrico</b>	<b>Sub Total</b>
	72 992,7	39 856,54	112 849,24
<b>Costos Energía (75% DMD)</b>			
<b>Energía (146 días)</b>	<b>Potencia Instalada</b>	<b>Consumo Eléctrico</b>	<b>Sub Total</b>
	53 998,1	32 311,26	86 309,36
<b>Costos Energía (60% DMD)</b>			
<b>Energía (73 días)</b>	<b>Potencia Instalada</b>	<b>Consumo Eléctrico</b>	<b>Sub Total</b>
	23 860,05	14 533,57	38 393,62
<b>COSTO ENERGÍA ANUAL</b>			<b>237 552,22</b>
<b>COSTO TOTAL ANUAL</b>			<b>349 144,53</b>

### 3.6.5. Costos de inversión (Variante 5)

Estación de Bombeo (incluye obra civil)

$$C_{EB} = \$1\,000 \cdot P$$

$$C_{EB} = \$1\,000 \cdot 550 \cdot 0,08059 = \$44\,324,5$$

Conductora → D = 800 mm L = 2500 m (Similar a la de las variante 2, 3 y 4)

$$C_{CTOTAL} = \$73\,279,62 / \text{año}$$

Variador de velocidad

Potencia = 110 kW

Referencia: ATV61HC16N4

Precio = \$11 463,26 / unidad

Transductor de presión

Salida: 420 mA

Rango: 3,2 – 40 V

Referencia: XMLF040DD2025

Precio = \$467,89 / unidad

**Tabla 3.5 Costos Anuales (Variante 5).**

<b>Costos Anuales VARIANTE 5</b>			
<b>Inversión</b>	<b>Variador de Velocidad</b>	<b>Estación de Bombeo</b>	<b>Conductora</b>
	996,03	44 324,5	73 279,62
<b>Sub Total</b>	118 600,15		
<b>Costos Energía (100% DMD)</b>			
<b>Energía (146 días)</b>	<b>Potencia Instalada</b>	<b>Consumo Eléctrico</b>	<b>Sub Total</b>
	70 822,17	37 860,72	108 682,89
<b>Costos Energía (75% DMD)</b>			
<b>Energía (146 días)</b>	<b>Potencia Instalada</b>	<b>Consumo Eléctrico</b>	<b>Sub Total</b>
	53 078,3	27 388,14	80 466,44
<b>Costos Energía (60% DMD)</b>			
<b>Energía (73 días)</b>	<b>Potencia Instalada</b>	<b>Consumo Eléctrico</b>	<b>Sub Total</b>
	21 146,88	11 057,31	32 204,19
<b>COSTO ENERGÍA ANUAL</b>			<b>221 353,52</b>
<b>COSTO TOTAL ANUAL</b>			<b>339 953,67</b>

Como puede apreciarse, esta variante fue la que resultó ser la más económica, y nos permite tener una idea mucho más clara sobre la factibilidad de seleccionar una u otra variante. No obstante al presentarse un caso real, influirán mucho los costos implicados en la ubicación de los objetos de obra de las variantes que se incluyan en el estudio, así como también un costo asociado a una posible inestabilidad del servicio energético disponible.

# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

# C CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. En el trabajo se muestra un procedimiento que permite estimar el costo capital de un sistema de abastecimiento de agua urbano.
2. Las alternativas o variantes analizadas nos permite tener una idea mucho más clara sobre la factibilidad de seleccionar una u otra a la hora de enfrentarse a un caso real.
3. Debe tenerse en cuenta, que en el estudio influirán mucho los costos implicados en la ubicación de los objetos de obra de cada variante, así como también un costo asociado a una posible inestabilidad del servicio energético disponible en la zona de emplazamiento.
4. Explotar más las potencialidades de los programas ROKO y EPANET, en las empresas de proyecto del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH).
5. Aplicar el procedimiento de selección de variantes, en las empresas de proyecto del INRH que son las encargadas en el país de la proyección de los sistemas de abastecimiento de agua.
6. La solución más económica resultó ser la de inyección directa a la red combinando BVF con BVV, debiéndose valorar la factibilidad de instalar variadores de frecuencia a más de un equipo de bombeo en la instalación.
7. Se recomienda que para los sistemas en los que se empleen BVV, en ningún caso la velocidad de giro sobrepase más del 10% de la nominal.
8. Este trabajo constituye un acercamiento al tema de la modelación para el empleo de BVV en nuestro país.

# REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

# REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CPK/HPK Curvas características 50 Hz,.
2. NC53-121 1983.
3. NR-AC- 01DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA POTABLE EN POBLACIONES. 1983.
4. Variadores de velocidad Altivar Process. 2014.
5. (ISPJAE)., J.B.M., Maestría en Manejo Integral del Agua. Notas de Clase. mayo 2013.
6. A., M.E.G., Hidraulica Basica.
7. Arias, D.L., DISEÑO HIDRÁULICO DE LOS SISTEMAS FUENTE B-T-R (BOMBA – TANQUE DE COMPENSACIÓN – RED DE DISTRIBUCIÓN). 2015.
8. Cabrera, E., Espert, V.,Garcia-Serra, J.,Martinez , F, INGENERIA HIDRAULICA Aplicada a los sistemas de distribución de agua Volumen 1. 1996.
9. Cabrera, E., Espert, V.,Garcia-Serra, J.,Martinez , F, INGENERIA HIDRAULICA Aplicada a los sistemas de distribución de agua Volumen 2. 1996.
10. Fernández, L.G., "Modelación hidráulica del Sistema Noroeste para Abasto de Agua a la Ciudad de Santiago de Cuba utilizando el modelo SWMM". 2015.
11. FRANCOS, E.B.M.S.V.S.J.F., SISTEMAS DE BOMBEO. 1994.
12. Fuentes, V.S., Garcías-Serra,J., Iglesias, P.L., López, G., Martínez, F.J. y Pérez,R, Modelación y Diseño de redes de abastecimiento de agua. 2002.
13. Fuentes., P.B., "Modelación hidráulica de un sistema fuente de abastecimiento de agua: acueducto El Gato". 2012.
14. Garcia, V.S.F.M.j.I.S.P.A.L.R.P., Técnicas de diseño de redes de distribución de agua 2004.
15. Herrera., A.L., Análisis de variantes para el diseño de la conductora de Santa Cruz del Norte". 2012.
16. J.B.Martínez, El concepto de garantía en las redes de suministro de agua potable. 2003.
17. Rodríguez, J.B.M., El concepto de garantía en las redes de suministro de agua potable. 2003.
18. Rojas, C.C. and J.B.M. Rodríguez, Manual del Usuario del Sistema ROKO. 1995 - 2000.
19. Rosa, D.B.d.l., Optimización del sistema fuente de abasto Paso Seco. 2012.
20. Rossman, L.A., EPANET 2 MANUAL DE USUARIO.
21. Torres., A.Q., "Modelación hidráulica del sistema de abastecimiento de agua en la Cujae. 2012.

# ANEXOS

# ANEXO I. Tipos de redes de abastecimiento de agua según su tipología.

FIGURA 1.1. Redes malladas.

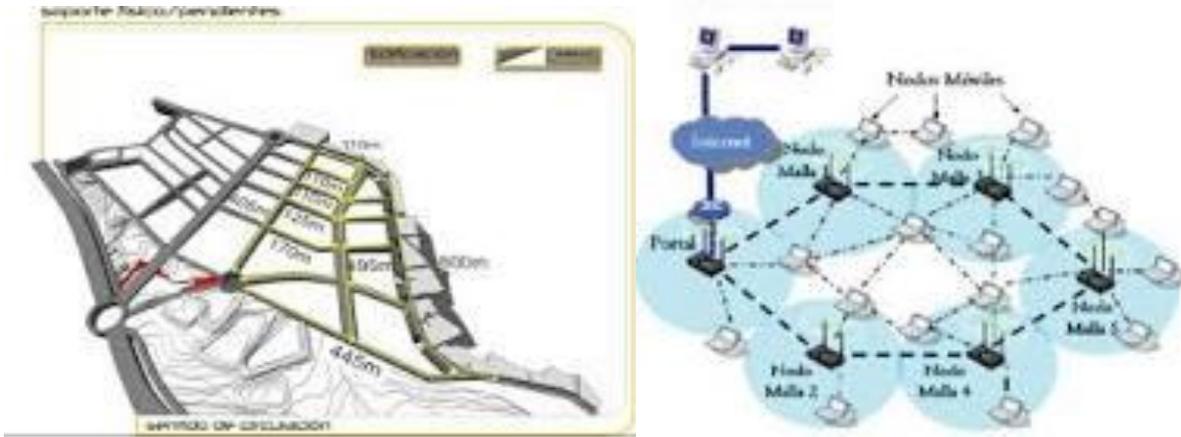
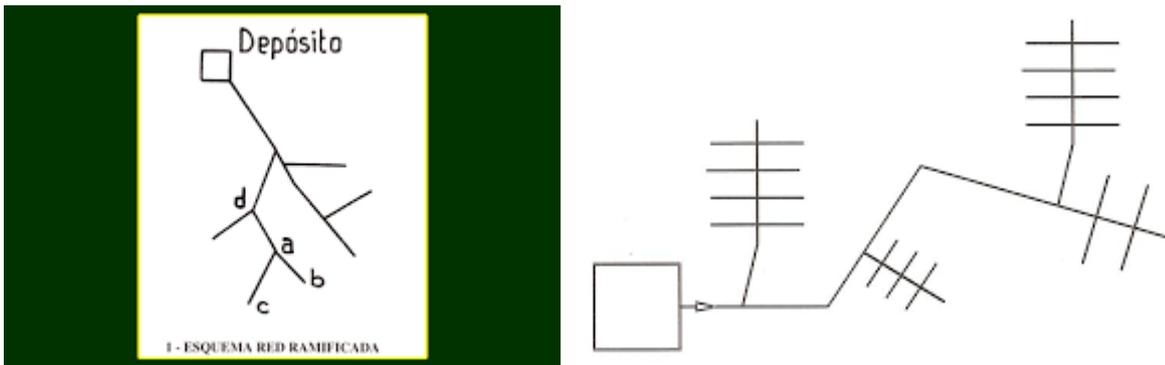


FIGURA 1.2. Redes ramificadas.

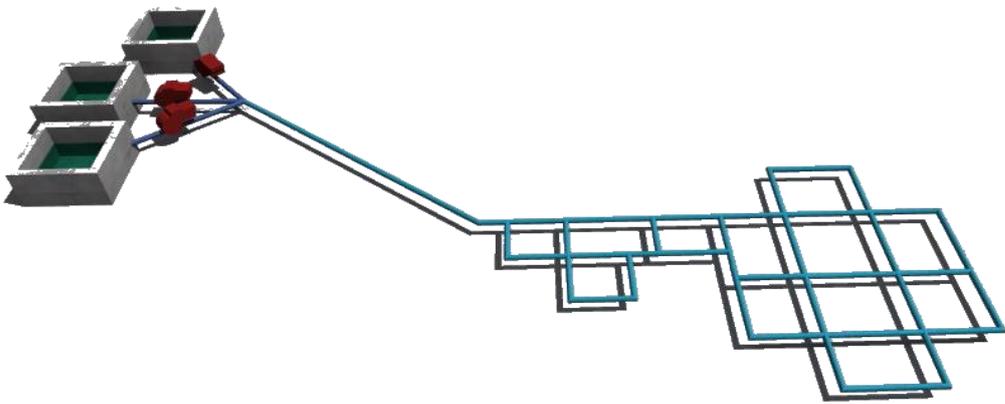


**ANEXO II. Esquema de la red diseñada en la propuesta.**

**FIGURA 2.1. Red mallada. (Variante 1).**



**FIGURA 2.2. Red mallada. (Variante 2-5).**



### ANEXO III. Datos de tuberías de PEAD

Tabla 3.1. Datos de tuberías de PEAD.

D NOMINAL (mm)	PN (kg/cm <sup>2</sup> )	Espesor (mm)	D INTERIOR (mm)	Precio Unitario (\$/ml)
110	6	4	102,00	4,75
160	6	5,8	148,40	9,37
200	6	7,3	185,40	14,74
250	6	9,1	231,80	22,97
315	6	11,4	292,20	36,15
355	6	12,9	329,20	50
400	6	14,5	371,00	61,9
450	6	16,3	417,40	78,33
500	6	18,1	463,80	96,74
630	6	22,8	584,40	121,1
800	6	29	742,00	153,3
900	6	32,6	834,80	170,7
1000	6	36,2	927,60	232,28
1200	6	43,5	1113,00	351,95

Figura 3.1. Tuberías de PEAD.



**ANEXO IV. Depósitos de compensación más utilizados.**

**Figura 4.1. Tanques de almacenamiento.**

