



REPÚBLICA DE CUBA

MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO

Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ

FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECÁNICA

TRABAJO DE DIPLOMA

EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

TÍTULO: Análisis de la red hidráulica (Área Docente) del Instituto Superior
Minero Metalúrgico de Moa.

DIPLOMANTE: *Edgar Eliecer Añel Torres*

TUTOR: Ms.C. Rodney Martínez Rojas

MOA - 2012

“Aniversario 54 de la Revolución”



DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo: Edgar E. Añel Torres autor de este trabajo de Diploma y el tutor; Máster en Ciencias Técnicas: Rodney Martínez Rojas declaramos la propiedad intelectual de este trabajo al servicio del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa para que dispongan de su uso cuando estimen conveniente.

Edgar E. Añel Torres

Ms.C Rodney Martínez Rojas



Pensamientos

Por el poder de erguirse, se mide a los hombres.

José Martí Pérez

.... Y hay muchas cosas de las que el hombre puede sentirse orgulloso y no es precisamente de lo que ha recibido sino de lo que sea capaz de realizar con sus propios esfuerzos.

Fidel Castro Ruz



DEDICATORIA

Agradezco enormemente a mi tutor Ms. c. Rodney Martínez Rojas por apoyarme en el transcurso de la realización de este trabajo así como a los profesores Geovannys, Marbelis, Yodelquis y demás profesores del Departamento de Mecánica por los conocimientos impartidos a lo largo de la carrera.

Agradecer con mucho sentimiento a mis padres, a mi hermano, a mis abuelos, a mis tíos, a mis primos, a mis compañeros, a mis amistades y demás personas que se mantuvieron a mi lado en general, ya que constituyen el motivo para poder culminar mis metas.

A mi madre por su esfuerzo encomiable y exigencia para lograr mis objetivos.

A Cuba por haberme dado la posibilidad de poder fraguarme como un profesional.

El Autor



Resumen

El presente trabajo de diploma nace a partir de los problemas surgidos en el Instituto Minero-Metalúrgico (área docente) con el desconocimiento de los parámetros de trabajo de la red hidráulica que abastece esta área. Se realiza una indagación bibliográfica en correspondencia con el tema en cuestión, obteniendo trabajos limitados tanto en argumento como en cantidad.

Se confeccionó una breve descripción de la red hidráulica del área objeto de estudio antes mencionado, además se sugieren algunas de las propiedades de los fluidos. Se utilizó el Software WaterCad V.7 para la evaluación de los parámetros de trabajo de la red de abastecimiento de agua. De inmediato se realizó el análisis de los resultados y consecutivamente se efectuó la valoración económica donde la mayor pérdida que se tiene es por el sistema de bombeo al no trabajar 100% eficiente.



ABSTRACT

The present diploma work's is born starting from the problems arisen in the Institute Miner-metallurgist (educational area) with the ignorance of the parameters of work of the hydraulic net that supplies this area. It's carried out a bibliographical inquiry in correspondence with the topic in question; obtaining limited works as much in argument as in quantity.

A brief description of the hydraulic net of the area study object was made before mentioned, some of the properties of the fluids are also suggested. The Software WaterCad V.7 was used for the evaluation of the parameters of work of the net of supply of water. Immediately it was carried out the analysis of the results and consecutively you makes the economic valuation where the biggest loss that one has is for the system of pumping when not working 100 efficient%.

**ÍNDICE**

| | |
|---|-----------|
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO | 5 |
| 1.1 Introducción al capítulo | 5 |
| 1.2 Estudios precedentes | 5 |
| 1.3 Fundamentos de la mecánica de los fluidos | 9 |
| 1.3.1 Definición de fluido | 10 |
| 1.3.2 Propiedades de los fluidos. | 10 |
| 1.4 Consideraciones generales de las redes de distribución de agua | 14 |
| 1.5 Filosofía del WaterCAD | 19 |
| 1.6 Sistema de abastecimiento de agua para el ISMM | 23 |
| 1.7 Conclusiones del capítulo | 24 |
| CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS | 25 |
| 2.1 Introducción | 25 |
| 2.2 Características técnicas del sistema de bombeo del ISMM | 25 |
| 2.3 Descripción de la red hidráulica del área docente del ISMM | 25 |
| 2.4 Uso del software WaterCAD | 26 |
| 2.5 Consideraciones para el cálculo de la red hidráulica usadas por el software WaterCAD. | 26 |
| 2.5.1 El Modelo de Simulación Hidráulica | 30 |
| 2.6 Algoritmos de cálculo usado por el software WaterCAD | 31 |
| 2.7 Método para el análisis de los gastos energéticos | 41 |
| 2.8 Conclusiones parciales | 42 |
| CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS | 43 |
| 3.1 Introducción del capítulo | 43 |
| 3.2 Trazado de la red del área docente del ISMM | 43 |
| 3.3 Resultados obtenidos a partir del WaterCAD | 44 |
| 3.3.1 Resultados de las bombas | 44 |
| 3.3.2 Resultados de la simulación de las válvulas | 46 |
| 3.3.3 Resultados de la simulación en las tuberías | 46 |
| 3.5 Datos de presión y demanda en las áreas | 49 |
| 3.5.1 Recomendaciones previas a la medición | 49 |



| | |
|-------------------------------|----|
| 3.6 Valoración económica | 50 |
| 3.8 Conclusiones del capítulo | 51 |
| CONCLUSIONES GENERALES | 52 |
| RECOMENDACIONES | 53 |
| BIBLIOGRAFÍA | 54 |
| ANEXOS | 55 |

INTRODUCCIÓN

El agua es uno de los recursos finitos y vulnerables con que cuenta nuestra preciada tierra, su esencia se basa en sostener la vida, el ambiente y su desarrollo.

Históricamente se puede hablar de las instalaciones hidráulicas y sanitarias desde la edad antigua con la cultura romana y la civilización minoica hasta la edad moderna aproximadamente en 1870 con el desarrollo del moderno inodoro.

Los antiguos romanos, que difundieron en todo el Mediterráneo la vida urbana, basaron el bienestar y el buen vivir especialmente en la disponibilidad de abundante cantidad de agua. Se considera que los acueductos suministraban más de un millón de m³ de agua al día a la Roma Imperial, la mayor parte distribuida a viviendas privadas por medio de tubos de plomo. Llegaban a Roma por lo menos una docena de acueductos unidos a una vasta red subterránea.

Durante la edad contemporánea en la segunda mitad del siglo XIX se tuvo mayor interés en los aspectos hidráulicos y sanitarios. Actualmente el suministro de agua con la calidad adecuada y el diseño de las instalaciones hidráulicas es labor de ingenieros y arquitectos al momento de proyectar edificios (García, 2001).

El agua debe ser considerada como un bien social y económico; debe manejarse en un marco integrado, amplio, tratando de tener en cuenta e interrelacionando las consideraciones de los distintos sectores involucrados.

En el manejo de los recursos hídricos se caracterizan por elevados costos económicos y ambientales. En la mayoría de los países el agua es tratada como si hubiera estado disponible en cantidades ilimitadas y suministradas en costos muy bajos a clientes que no tienen conciencia de su valor económico y social. (Enrique, 2011).

El ciclo hidrológico puede ser visto, en una escala planetaria, como un gigantesco sistema de destilación, extendido por todo el planeta. El calentamiento de las regiones tropicales debido a la radiación solar provoca la evaporación continua del agua de los océanos, la cual es transportada bajo forma de vapor de agua por la circulación general de la atmósfera, a otras regiones. Durante la transferencia, parte

del vapor de agua se condensa debido al enfriamiento y forma nubes que originan la precipitación. El regreso a las regiones de origen resulta de la acción combinada del escurrimiento proveniente de los ríos y de las corrientes marinas. (Gils 2007)

Una de las utilidades más importantes que el hombre le ha dado al agua es el uso industrial, y una de las formas y vías con la que ha logrado llevar el agua de un punto a otro es a través de las redes de distribución, que por supuesto conectadas a distintos tipos de suministradores, como puede ser un tanque elevado cuando se hace uso de la aceleración de la gravedad o un equipo de bombeo cuando se hace necesario adicionarle energía al agua para su posterior traslado al punto indicado.

Un uso significativo de este recurso es su utilización para el desarrollo de cualquier edificio, deben conjugarse varios aspectos como son los servicios necesarios y fundamentales, que, además de ser vitales, proporcionan comodidades y un buen nivel de vida. De gran importancia es su empleo para el consumo humano, así como su disposición después del uso. El agua puede determinar el nivel de vida de cualquier país.

Desde los años sesenta del siglo pasado se inició en Cuba el desarrollo de las estrategias para la gestión del agua, con la creación del Instituto de Recursos Hidráulicos, el fortalecimiento de la infraestructura hidráulica, la formación de recursos humanos capacitados y la creación de las bases legales y normativas para la administración de las aguas terrestres, con la participación de otros organismos del estado cubano.

Los Recursos Hídricos Potenciales en Cuba alcanzan los 38 100 hm³, de los cuales 31 700 hm³ corresponden a las aguas superficiales, para un 83 % y 6 400 hm³ (17 %) a las aguas subterráneas, de este potencial total se ha evaluado al nivel de esquema como Recursos Hídricos Aprovechable 24 000 hm³, 18 000 hm³ superficiales y 6 000 hm³ subterráneas.

El municipio Moa por disfrutar de amplias zonas residenciales e industriales posee una compleja red hidráulica para abastecerse y poder transportar el recurso hídrico a todos los clientes que lo necesiten. Como parte de esta red se encuentra el ISMM el cual posee una red hidráulica que data desde su fundación hace 35 años, con los

desgastes y beneficios por los que ha transcurridos en este tiempo. Con el pasar de estos años han ido aflorando deficiencias tanto en la red hidráulica como en el sistema de bombeo, con paradas para su mantenimiento así como cambios casi integrales de sus partes componentes. Muchas reparaciones ha sufrido la red de nuestro instituto por lo que nos lleva a conformar la **situación problemática** sobre el elevado consumo energético que incide negativamente en el aporte de racionalización de la energía en el sistema de bombeo del Instituto Superior Minero-Metalúrgico del municipio Moa (ISMM). Reducir las pérdidas por salideros en la red para elevar los niveles de consumo con un mínimo de inversión en recursos.

La inexistencia del conocimiento de los parámetros de trabajo de las bombas tiende a limitar el correcto mantenimiento del equipamiento y como consecuencia no se logra disminuir los gastos en reparaciones. Existe un insuficiente conocimiento sobre el trazado de la red hidráulica que abastece el área docente del ISMM.

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Insuficiente conocimiento de los parámetros de gastos y consumos energéticos de la red hidráulica del área docente del ISMM.

OBJETO DE ESTUDIO

El sistema de red hidráulica del área docente del ISMM.

HIPÓTESIS

Al lograr conocer las condiciones en que trabaja la red hidráulica del área docente del ISMM, se permitirá obtener parámetros adecuados de trabajo del sistema y la disminución de portadores energéticos en el bombeo de agua en el área objeto de estudio.

OBJETIVO GENERAL

Analizar los parámetros de diseño de la red hidráulica del área docente mediante el uso del software WaterCAD v.7

TAREAS

1. Búsqueda bibliográfica sobre la temática objeto de estudio.
2. Análisis de la filosofía de trabajo del software WaterCAD v.7.
3. Establecer las características del sistema de abastecimiento de agua del área de docente del ISMM.
4. Determinar la configuración del trazado de la red del área objeto de estudio y la edición de los componentes que la configuran
5. Establecer el procedimiento para el cálculo de los parámetros de trabajo de la red mediante el uso del software WaterCAD v.7.
6. Análisis de los resultados.

CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO

1.1 Introducción al capítulo

Con el propósito de disponer de los elementos básicos invariantes y de las tendencias actuales que resulten esenciales en aras de enfrentar, de modo sistémico, el problema en toda su complejidad para el correcto desarrollo del trabajo en general. Se abordarán las leyes que permiten el estudio de las redes de distribución de agua, las particularidades de su diseño, el estado actual de su desarrollo a partir de las recientes investigaciones realizadas y la necesidad de emplear técnicas computacionales para la evaluación y diseño de redes

El **objetivo** del capítulo es: Establecer el estado del arte, a partir de la revisión bibliográfica relacionada al tema de las redes de distribución de agua.

1.2 Estudios precedentes

En nuestro país no comienza un desarrollo de los estudios hidráulicos sino hasta después de la revolución en que dichos estudios constituyen una de las bases principales del progreso científico técnico de nuestro país. Sin embargo, en la época colonial, se debe recordar al ingeniero Francisco de Albear, proyectista y constructor del acueducto que surte de agua a nuestra capital y a los hidráulicos anónimos que durante dos siglos desarrollaron el sistema de regadío conocidos como la comunidad de regante de Güines.

Tiene como antecedentes la Ley de Aguas de España (1879), la que en su articulado prevé la creación de las “Comunidades de Regantes”, que tienen como objetivo establecer un régimen y administración de las obras y de las aguas. Las normas aprobadas en la Metrópoli eran de aplicación en las colonias de América, de este modo las leyes de aguas influyeron en Cuba, y aún con el nacimiento de la República, al no emitirse nuevas legislaciones, continuaban en vigor. El cuerpo legal de la Comunidad de Regantes de Güines fue un primer empeño en materia de regular el aprovechamiento, administración y protección de las aguas, el cual, independientemente de su fin económico, englobaba de forma ordenada el tratamiento de los recursos hídricos en Cuba. Las Ordenanzas de la Comunidad de Regantes de Güines se hacen firmes el 15 de julio de 1924.

En los grandes núcleos poblacionales el agua proveniente de las fuentes de abasto pasa por un sistema de tratamiento y filtración que permite mejorar la calidad del agua resultando los sistemas más usados los de cloración, floración, intercambio iónico y por último su bombeo hasta los consumidores.

Planteando los problemas con respecto a los controles de los consumos de agua en la mayoría de los casos llegan a ser deficientes estando entre las causas principales la existencia de poco medidores para contabilizar el agua por área, la no existencia o incorrecta aplicación de indicadores que relacionan este consumo con parámetros productivos, los bajos costos de agua en algunas instituciones y la no existencia de chequeos periódicos, ni gestión integrada de su uso. (Pérez 2006).

Para modelar una red se requiere el tratamiento de una gran cantidad de información. Con los avances tanto de la computación como de las técnicas de análisis de redes, el problema de incluir todas las líneas que en realidad se presentan en la red, se elimina. Sin embargo persiste la necesidad de la precisión de los datos de entrada para que la fiabilidad del modelo sea asegurada. Incluir toda la red en el modelo supone modelar hasta las acometidas de los edificios, cuya información es tan difícil de modelar como imprecisa.

Así, si la opción es desarrollar un modelo estratégico de la red, el grado de detalle deberá relegarse a un número de líneas y nudos cuyo comportamiento sea equivalente al de todo el sistema, (Martínez, 2002).

En base a los planteamientos de Zepeda (2001) y García (2001), se plantea un análisis hidráulico y un formato de cálculo para las redes hidráulicas abiertas en edificaciones, sin embargo, el desarrollo manual de las ecuaciones dificultaba el diseño de redes con demasiados nodos, por lo que fue necesario implementar un software para facilitar el diseño. En nuestro país existen programas de cálculo aplicados a redes de agua potable y específicamente un programa para instalaciones denominado EPANET que en nuestro medio no tiene la propaganda necesaria para su uso.

El diseño hidráulico de la red tiene por objeto conseguir que la línea de energía esté siempre por encima de los puntos de control (tomas y nodos intermedios en donde

se exige una carga de presión mínima disponible), pero lo más cercano posible a ellos (Montiel, 2002). Estos son aspectos importantes a conocer en el momento de diseño de una red de distribución de agua.

La relación de la oferta y la demanda de agua permite dimensionar la cantidad de agua disponible, los requerimientos hídricos de los usos existentes y las zonas de conflicto por déficit del recurso (CVC, 2006).

El ingeniero civil (Sosa, 2006) especifica su trabajo en el diseño de las instalaciones de edificios, y plantea lo importante de prever los lugares y las dimensiones de los ductos o canalizaciones verticales y horizontales, así como los espacios o cuartos destinados a la maquinaria, con base en el criterio de los proyectistas de cada una de las instalaciones necesarias.

En cada una de las instalaciones de redes hidráulicas deben revisarse sus especificaciones particulares, a fin de definir los tipos y calidades de los materiales a utilizar, así como las pruebas a las que se someterán las mismas.

Los trabajos realizados por Nekrasov (1986), son de considerables aportes, los mismos abordan la temática relacionada con la teoría general de la hidráulica, en esta publicación existe una amplia conceptualización de las leyes y principios físicos relacionados con el transporte hidráulico y constituyen un pilar fundamental para la comprensión de la misma en sus más diversas formas, en este trabajo se exponen diferentes situaciones prácticas donde se vinculan los fenómenos de movimientos hidráulicos con los equipos e instalaciones existentes en las industrias metalúrgicas, así como, en otras empresas donde se aplica este método de transporte.

Welty, J. (1976) y Bandala, M. (2001), efectuaron una evaluación en una tubería recta en la que el flujo es del tipo laminar o viscoso, según estos autores la resistencia se origina por el esfuerzo tangencial o cortante de la viscosidad entre las láminas o capas adyacentes y las partículas que se mueven en recorridos paralelos con diferentes velocidades. Además plantean que en la pared de la tubería las partículas se adhieren a ella y no tienen movimiento; deducen que tanto las láminas como las partículas en movimiento en la tubería están sujetas a un esfuerzo cortante viscoso que la disminuye y la aproximan al centro de la tubería, por lo que la

variación de la velocidad a través de la tubería, está totalmente determinado por el esfuerzo viscoso entre las capas.

Resulta muy importante el trabajo realizado por Karelin, B. (1975), el cual plantea que en las bombas centrífugas se puede dividir el fenómeno de la cavitación en 2 regímenes críticos. El primer régimen corresponde con el momento de inicio de la cavitación; en las curvas de cavitación este régimen se caracteriza por el inicio de la disminución de la carga y la eficiencia. El segundo régimen crítico corresponde con el momento de caída abrupta de los parámetros de trabajo de la bomba; en las curvas de cavitación este segundo régimen está caracterizado por la caída precipitada de los parámetros de la bomba. Las curvas características para analizar los 2 regímenes de cavitación es una dependencia de los parámetros: carga, eficiencia y potencia en función de la reserva cavitacional, curvas no divulgadas en los pasaportes de la máquina. Este autor plantea además que el trabajo de las bombas en regímenes de cavitación no debe permitirse, porque afecta los parámetros de trabajo, daña el equipo y termina por destruirla, disminuye el rendimiento e incrementa el consumo energético y que en la succión de una bomba debe garantizarse una cantidad de energía crítica (carga efectiva Δh_s , por encima de la tensión de vapor), para vencer las resistencias hidráulicas en el tramo hasta los álabes del rodete; garantizando la velocidad y aceleración suficientes a la entrada del impulsor.

Pérez, R. (2000), analiza procedimientos que permiten valorar y consecuentemente elegir las bombas centrífugas a partir de los datos técnicos aportados por el fabricante. La cavitación es un fenómeno frecuente en el trabajo de estas máquinas, influye considerablemente en los indicadores técnicos - económicos y depende no sólo del sistema, sino también de la calidad del diseño y construcción del equipo. No menos importancia tienen los materiales con los que se construyen estos equipos. Además, en el año 2004 define que la reserva requerida de cavitación $NPSH_R$, es un parámetro que depende de las peculiaridades constructivas de la bomba y es mayor para bombas con el rodete en voladizo, que para las que tienen el rodete entre apoyos.

El coeficiente o factor de fricción es un parámetro de diseño importante al considerar las pérdidas de energía mecánica en el transporte de fluidos a través de tuberías, ya sea para evaluar la potencia necesaria, o para estimar el diámetro del conducto, entre otros aspectos (Ibarz et al., 2001), (Vélez, 2003). Este coeficiente de fricción puede obtenerse con la pérdida de presión que se da en un segmento de tubo y/o accesorio, o bien puede evaluarse por medio de modelos, o gráficas propuestas para tal propósito (Charm, 1971); (Foust et al., 1980); (Macedo, 2001). La información que existe ha sido desarrollada principalmente para fluidos de tipo newtoniano.

Quishpe (2005), realiza un análisis integral de todo el sistema de abastecimiento de agua del hospital Isidro Ayora, este análisis incluyó la determinación de las causas por las que se produce la presencia del choque Hidráulico en la instalación, elevado consumo energético del sistema hidráulico. Además de realizar un análisis para verificar si el sistema de tuberías es el adecuado y su distribución es la correcta.

1.3 Fundamentos de la mecánica de los fluidos

La ciencia de la ingeniería de la mecánica de los fluidos se ha desarrollado gracias al entendimiento de las propiedades de los fluidos, a la aplicación de las leyes básicas de la mecánica y la termodinámica y a una experimentación ordenada. Sin importar su naturaleza, todas las situaciones de flujo pueden expresarse en forma analítica a partir de las relaciones siguientes (Marks, 1982; Ravinovich, 1986; Necrasov, 1990; Gerhart and Gross, 1992; Streeter et al., 2000; Martinez et al., 2007)

- ✓ Las leyes de movimiento de newton.
- ✓ La relación de continuidad (leyes de conservación de la masa)
- ✓ La conservación de la masa aplicada a mezclas de componentes dentro del fluido.
- ✓ La primera y segunda leyes de la termodinámica.
- ✓ Las condiciones de frontera.

También pueden tenerse en consideraciones otras relaciones y ecuaciones como una ecuación de estado o la ley de viscosidad de newton

1.3.1 Definición de fluido

Un fluido es una sustancia que puede fluir. Una definición más formal es: “un fluido es una sustancia que se deforma continuamente cuando se le somete a un esfuerzo cortante, sin importar lo pequeño que sea dicho esfuerzo”. Así, un fluido es incapaz de resistir fuerzas o esfuerzos de cizalla sin desplazarse, mientras que un sólido sí puede hacerlo.

El término fluido incluye a gases y líquidos. Hay fluidos que fluyen tan lentamente que se pueden considerar sólidos (vidrio de las ventanas o el asfalto). Un líquido está sometido a fuerzas intermoleculares que lo mantienen unido de tal forma que su volumen es definido pero su forma no. Un gas, por otra parte, consta de partículas en movimiento que chocan unas con otras y tratan de dispersarse de tal modo que un gas no tiene forma ni volumen definidos y llenará completamente cualquier recipiente en el cual se coloque.

1.3.2 Propiedades de los fluidos

Los fluidos son sustancias que se adaptan a la forma de los recipientes que los contienen. Cuando están en equilibrio no pueden soportar fuerzas tangenciales o cortantes. Todos los fluidos son compresibles en cierto grado y ofrecen poca resistencia a los cambios de forma.

Los fluidos pueden dividirse en líquidos y gases.

- ✓ Líquidos: son prácticamente incompresibles, ocupan un volumen definido y tienen superficies libres.
- ✓ Gases: son compresibles, se expansionan hasta ocupar todas las partes del recipiente que los contenga.

Densidad de un fluido:

La densidad de una sustancia se define como su masa por unidad de volumen.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.1)$$

La unidad de medida en el S.I. de Unidades es kg/m³, también se utiliza frecuentemente la unidad g/cm³.

Peso específico:

Peso específico se define como su peso por unidad de volumen, se encuentra relacionado con la densidad por:

$$Y = \rho \cdot g \quad (1.2)$$

En los líquidos puede considerarse constante para las variaciones ordinarias de presión. Se pueden calcular a través de la ecuación de estado de los gases

$$PV = nRT \text{ como } P = \rho \cdot R \cdot T$$

$$Y = \frac{P \cdot g}{R \cdot T} \quad (1.3)$$

Volumen específico

Es el volumen por unidad de masa y es por lo tanto el recíproco de la densidad.

$$V = \frac{1}{\rho} \quad (1.4)$$

Gravedad específica

Se suele designar como SG y se define como la relación de la densidad del fluido entre la densidad del agua a una temperatura dada. Normalmente esa temperatura es 4°C, y a esta temperatura la densidad del agua es 1000kg/m³.

$$SG = \frac{\rho}{\rho_{H_2O}} \quad (1.5)$$

Viscosidad de un fluido

Es aquella propiedad que determina la cantidad de resistencia opuesta a las fuerzas cortantes. La viscosidad se debe primordialmente a las interacciones entre las moléculas del fluido.

Otro coeficiente de viscosidad, llamado viscosidad cinemática, viene definido por

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\mu}{\gamma/g} = \frac{\mu \cdot g}{\gamma} \quad (1.6)$$

Presión de vapor

Cuando tiene lugar el fenómeno de la evaporación dentro de un espacio cerrado, la presión parcial a que dan lugar las moléculas de vapor se llama presión de vapor. Depende de la temperatura, aumentando con ella.

Tensión superficial

La tensión superficial (σ) de un líquido es el trabajo que debe realizarse para llevar moléculas en número suficiente desde el interior del líquido hasta la superficie para crear una nueva unidad de superficie (J/m^2). Este trabajo es numéricamente igual a la fuerza tangencial de contracción que actuase sobre una línea hipotética de longitud unitaria situada en la superficie, y

$$\sigma = \frac{\Delta F}{\Delta L} (N/m) \quad (1.7)$$

Las unidades son en m^2/s . En los líquidos la viscosidad disminuye al aumentar la temperatura, pero no se ve afectada apreciablemente por las variaciones de presión. En los gases la viscosidad absoluta aumenta al aumentar la temperatura, pero casi no varía con la presión. Como el peso específico de los gases varía con la presión (a temperatura constante), la viscosidad cinemática es inversamente proporcional a la presión.

Capilaridad

Es la elevación o descenso de un líquido en un tubo capilar vienen producidos por la tensión superficial dependiendo de las magnitudes relativas de la cohesión y de la adhesión del líquido a las paredes del tubo. Los líquidos ascienden por tubos que mojan (cohesión < adhesión) y descienden por tubos que no mojan (cohesión > adhesión). La capilaridad tiene importancia en tubos estrechos <10mm, para valores mayores de 12mm es despreciable. Propiedades de los fluidos.

$$h = \frac{2\sigma}{r \cdot g \cdot \rho} \cos \theta \quad (1.8)$$

Compresibilidad de un fluido

Se expresa a través del módulo volumétrico de elasticidad (E) que es la relación de la variación de presión a la variación de volumen por unidad de volumen.

$$E = \frac{dp}{-dv/v} (Pa) \quad (1.9)$$

El aumento de la presión da lugar a una disminución de volumen.

Tres principios fundamentales se aplican al flujo de fluidos:

- ✓ El principio de conservación de la masa, a partir del cual se establece la ecuación de continuidad.
- ✓ El principio de la energía cinética, a partir del cual se deducen ciertas ecuaciones aplicables al flujo.
- ✓ El principio de la cantidad de movimiento, a partir del cual se deducen las ecuaciones para calcular las fuerzas dinámicas ejercidas por los fluidos en movimiento. El flujo de los fluidos puede ser permanente o no permanente; uniforme o no uniforme; laminar o turbulento; unidimensional, bidimensional o tridimensional.

De acuerdo a su comportamiento reológico:

- ✓ **Newtonianos:** estos cumplen con la ley de Newton y la viscosidad es una constante de proporcionalidad que relaciona el gradiente de velocidad con el esfuerzo cortante de la fricción.
- ✓ **No newtonianos:** cuando no cumple con la ley de Newton y la viscosidad es una función del gradiente de velocidad.

El agua además de ser una sustancia muy abundante en la naturaleza presenta excelentes propiedades, que permite su uso en casi todos los procesos de nuestra vida. En estado puro no tiene olor, no es tóxica, disuelve a todas las sales cristalinas y compuestos polares y debido a los valores elevados del calor específico y latente de vaporización constituye verdaderos volantes térmicos. La utilización del agua en la industria como fluido portador del calor se debe a estas razones (Tabla 1.1).

Tabla 1.1. Principales propiedades del agua pura.

| Propiedad | U/M | Valor |
|----------------------------------|----------------------|------------------------|
| Densidad | g/cm ³ | 0,9997 |
| Temperatura de ebullición | °C | 100 |
| Temperatura de solidificación | °C | 0 |
| Calor específico(14,5 a 15,5 °C) | J/kg | 4180 |
| Calor de fusión del hielo | Kcal/kg | 80 |
| Calor de vaporización | Kcal/kg | 539 |
| Energía de formación molecular | cal/mol | 58000 |
| Viscosidad del agua | Poise | 1,007*10 ⁻² |
| Tensión superficial (18 °C) | dyna/cm ³ | 73 |
| Conductividad eléctrica | mho/m | 4,2*10 ⁻⁶ |

Tabla 1.2. Relación de la viscosidad y densidad del agua.

| Presión atmosférica estándar (1 atm = 1013.25 mbar) AGUA temperatura (°C) | viscosidad absoluta (Pa·s) | viscosidad cinemática (m²/s) | Densidad (kg/m³) |
|--|---|--|--|
| 20 | 1,002*10 ⁻³ | 1,004*10 ⁻⁶ | 999,6 |
| 30 | 0,797*10 ⁻³ | 0,801*10 ⁻⁶ | 996,5 |
| 40 | 0,653*10 ⁻³ | 0,658*10 ⁻⁶ | 987,9 |

1.4 Consideraciones generales de las redes de distribución de agua

Uno de los usos más importantes del agua es el que se le da para consumo humano en ciudades y centros urbanos. En este sentido, el modelo se convierte en el elemento fundamental a la hora de gestionar la red de distribución de agua, de la que dependen aspectos tan importantes como la calidad del servicio, la eficiencia en el suministro o la calidad de la propia agua para el consumo humano.

Por otra parte, la red de distribución es un ente complejo en sus aspectos de gestión, y que conlleva muchas implicaciones sociales (especialmente relacionadas con la

calidad de suministro y estado del bienestar) a la vez que medioambientales por lo que supone de consumo de recursos y energía. Incluso para redes sencillas, se hace necesario disponer de un modelo de simulación bien ajustado a la realidad como herramienta de trabajo.

Un sistema de distribución de agua es un conjunto de elementos encargados de transportar el fluido desde los puntos de suministro hasta los puntos de consumo. Está constituido por tuberías y otros elementos como son: Válvulas, elementos de unión, elementos de medición, depósitos, embalses, bombas, entre otros, que deben ser dimensionados adecuadamente para suministrar los caudales demandados, para lo cual será necesario mantener en la red presiones adecuadas. El resto de los componentes del sistema de distribución (depósitos, estaciones de bombeo, forma de regulación, entre otros) condicionarán su diseño y cálculo, por lo que en general no se puede tratar la red como un elemento aislado (Ravinovich, 1986; Pérez, 1986; Nekrasov, 1990; Aguirre et al., 1996b).

Dentro de la red podemos distinguir los siguientes componentes:

- ✓ **Elemento:** Componente de la red, como puede ser un tramo de una conducción, una válvula, una bomba, de tal manera que se tenga un comportamiento hidráulico muy bien definido.
- ✓ **Línea:** Conjunto de elementos de una red conectados entre dos puntos, a los cuales se les puede asociar una ecuación constitutiva que permita caracterizar el comportamiento global de los elementos que constituyen la línea. Es decir, una relación entre el caudal circulante y la diferencia de alturas piezométricas existente entre ambos extremos de la línea.
- ✓ **Nudo:** Cada uno de los extremos de una línea. O bien, punto de la red en la que se conectan dos o más líneas.

Los nudos los podemos clasificar como:

- ✓ **Nudos Fuente:** Punto de la red que recibe un aporte externo de caudal.
- ✓ **Nudos de Consumo:** Punto de la red en el que se realiza una extracción de caudal.

- ✓ **Nudo de Conexión:** Punto en el que no existe ninguna aportación o extracción de caudal, o lo que es lo mismo, sólo existe una transferencia de caudal entre dos o más líneas.

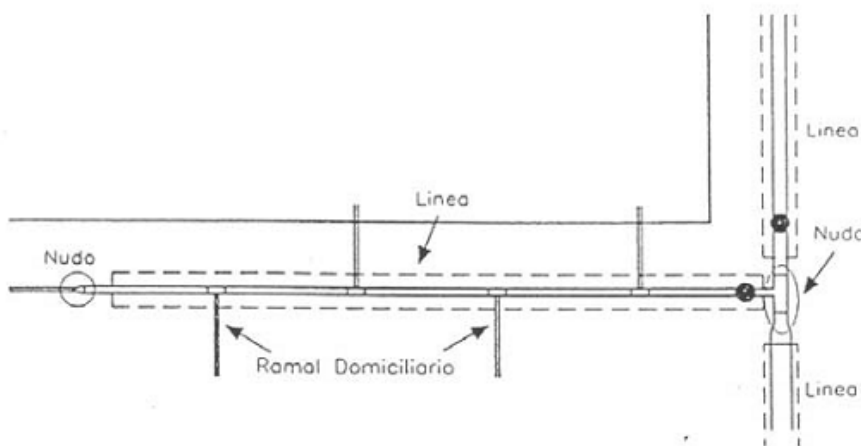


Figura 1.1. Ejemplos de elementos hidráulicos de una red.

Las redes de distribución de agua se pueden clasificar de acuerdo a varios criterios, entre los que se destacan:

Ramificadas: redes que para una situación definida de consumos en los nodos, pueden calcularse los caudales circulantes por las tuberías al aplicar la ecuación de la continuidad.

Malladas: redes en las cuales los caudales circulantes por las conducciones no quedan definidos al utilizar la ecuación de continuidad, sino que es necesario aplicar las ecuaciones de equilibrio de malla.

Mixtas: Redes en las que se puede calcular de forma inmediata los caudales circundantes en las arterias ramificadas, pero en la malla.

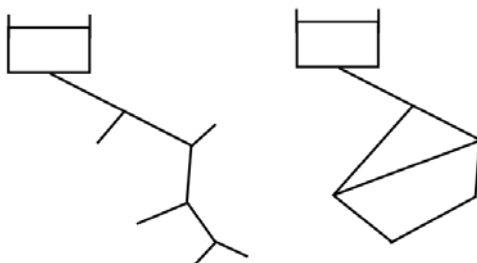


Figura 1.2. Tipos de redes de distribución de agua

Teniendo en cuenta el sistema de inyección y regulación:

- ✓ Depósitos a presión atmosférica, elevados o semienterrados.
- ✓ Inyección directa a la red mediante grupos de bombeo de velocidad fija y/o variable

Un análisis de redes consiste en dadas las características físicas de las conducciones, diámetros, rugosidades, longitudes, así como de los restantes elementos de la red como válvulas, depósitos, etc. y sus características funcionales, como tarado de las válvulas y presionadores, grado de apertura de las válvulas, etc..., y conocida al menos una altura piezométrica en uno de los nudos del sistema, determinar el caudal trasegado por cada una de las conducciones así como la altura piezométrica en todos los nudos restantes.

Los caudales circulantes no pueden ser definidos ni tan siquiera en su sentido por el uso exclusivo de la ecuación de continuidad, sino que habrá que añadir otras ecuaciones de la malla. El agua puede seguir distintos caminos para alimentar un mismo nudo τ .

En un sistema compuesto por L líneas, N nudos y M mallas se cumple siempre que $M = L - N + 1$. En M y L están incluidas las mallas y líneas ficticias necesarias para resolver el problema. En el caso de las redes ramificadas $L = N - 1$, y para las redes malladas: $L > N - 1$

En el momento de decidir el diseño de una red nos encontramos con dos problemas:

- ✓ **Distribución en planta:** Decidir el trazado de la misma, así como que elementos colocaremos, como válvulas, depósitos, conexiones, materiales, etc...
- ✓ **Dimensionado:** Determinar las dimensiones de los elementos, sobre todo el diámetro interior. Obviamente, ambas fases están entrelazadas, y se retroalimentan en el proceso de diseño.

Es evidente que cuando diseñamos una red lo hacemos para algo, por lo que debemos conocer una serie de datos de antemano, como:

- ✓ Necesidades de caudal
- ✓ Necesidades de presión
- ✓ Posibles trazados
- ✓ Situación y caracterización de los elementos de inyección y almacenamiento de fluido a la red
- ✓ Topología
- ✓ Velocidades de circulación permitida o aconsejable
- ✓ Diámetros comerciales de los que se dispone
- ✓ Material a emplear

Cuando queremos diseñar una línea hidráulica, por ejemplo una tubería, tenemos que resolver cuatro variables hidráulicas: velocidad del fluido, diámetro, caudal y pérdidas hidráulicas.

Solo existen dos ecuaciones que unen las variables que son la ecuación de continuidad y la de pérdidas hidráulicas.

Resulta evidente que necesitamos dos nuevas ecuaciones o restricciones para poder determinar completamente el problema. Lo usual será en muchas redes que el caudal esté impuesto, por lo que nos quedará sólo una indeterminación, es decir una ecuación que imponer, para poder resolver el problema.

El cometido de la red de distribución de agua no consiste solamente en suministrarle fluido al usuario, sino que además, el suministro debe satisfacer una determinadas condiciones de servicio tanto cualitativas como cuantitativas. La situación ideal de toda red de distribución sería mantener los requisitos de cada uno de los consumidores cualesquiera que fuesen las condiciones de funcionamiento y operatividad; ciertamente este objetivo resulta prácticamente imposible de conseguir, al menos a un coste razonable, dada la interdependencia que existe entre todas las variables implicadas. La red de distribución está constituida por una gran variedad de elementos, pero sin duda ninguna, las tuberías son el componente principal: desde el punto de vista funcional, la tubería es el elemento de la red que permite el transporte

del agua, y los componentes restantes actúan únicamente como auxiliares de esta función (regulación, control, medida, etc.).

En la práctica se utilizan diferentes tipos de modelos de una red de distribución, que conforman una visión simplificativa del sistema dependiendo del cometido para el que se pretenda utilizar. En una primera clasificación podemos distinguir entre modelos de análisis y modelos de diseño, aun cuando la frontera que los separa no está, en ocasiones, completamente definida. (García 1993).

1.5 Filosofía del WaterCAD

WaterCAD es un programa destinado a analizar el comportamiento hidráulico y de la calidad del agua en redes de distribución de agua a presión.

WaterCAD es un programa de ordenador para Windows 95/98/NT/2000 que realiza simulaciones en periodos prolongados del comportamiento hidráulico y de la calidad del agua en redes de suministro a presión. Una red puede estar constituida por tuberías, nudos (uniones de tuberías), bombas, válvulas y depósitos de almacenamiento o embalses. WaterCAD efectúa un seguimiento de la evolución de los caudales en las tuberías, las presiones en los nudos, los niveles en los depósitos, y la concentración de las especies químicas presentes en el agua, a lo largo del periodo de simulación discretizado en múltiples intervalos de tiempo. Además de la concentración de las distintas especies, puede también simular el envejecimiento del agua en la red (o tiempo de permanencia) y su procedencia desde las diversas fuentes de suministro.

La versión Windows de WaterCAD proporciona un entorno integrado para editar los datos de entrada de la red, simular el comportamiento hidráulico y de la calidad del agua, y analizar los resultados en una amplia variedad de formatos, entre los que se incluye el esquema de la red codificado por colores, tablas numéricas, curvas de evolución y mapas de isolíneas.

WaterCAD ha sido desarrollado por el Laboratorio Nacional de Investigación para la Prevención de Riesgos (NRMRL) de la Agencia para la Protección del Medio Ambiente de EEUU (USEPA). Como tal, es un software de dominio público que puede copiarse y distribuirse libremente.

PRESTACIONES

WaterCAD es un producto muy completo para la realización de análisis hidráulicos en periodo prolongado, que ofrece las siguientes prestaciones:

- no existe límite en cuanto al tamaño de la red a procesar
- las pérdidas de carga pueden calcularse mediante las fórmulas de Hazen-Williams, de Darcy-Weisbach o de Chezy-Manning
- contempla pérdidas menores en codos, accesorios, etc.
- admite bombas de velocidad fija o variable
- determina el consumo energético y sus costes
- permite modelizar varios tipos de válvulas, tales como válvulas de corte, de retención, y reguladoras de presión o caudal.
- admite depósitos de geometría variable (esto es, cuyo diámetro varía con el nivel)
- permite considerar diferentes tipos de demanda en los nudos, cada uno con su propia curva de modulación en el tiempo
- puede modelizar salidas de agua cuyo caudal dependa de la presión (p.ej. rociadores)
- admite leyes de control simples, basadas en el valor del nivel en los depósitos o en la hora prefijada por un temporizador, y leyes de control más complejas basadas en reglas lógicas.

Además, como herramienta para el análisis de la calidad el agua, WaterCAD ofrece las siguientes prestaciones adicionales:

- modeliza el desplazamiento de trazadores no reactivos por toda la red, a lo largo del tiempo
- modeliza el avance y destino final de las sustancias reactivas cuya concentración o bien crece en el tiempo (p.ej. los subproductos derivados de la desinfección) o bien decrece (p.ej. el cloro residual)

- modeliza el tiempo de permanencia (o envejecimiento) del agua mientras discurre por la red
- permite seguir la evolución en el tiempo de la fracción de caudal que llega a cada nudo de la red procedente de un nudo determinado (análisis de procedencias)
- modeliza las reacciones que tienen lugar tanto en el seno del agua como en las paredes de las tuberías
- admite reacciones de crecimiento o decrecimiento de la concentración de una sustancia hasta llegar a un valor límite
- permite definir coeficientes de reacción globales para toda la red, y modificar éstos posteriormente para determinadas tuberías
- permite considerar la inyección en cualquier punto de la red de un caudal másico o de concentración definida, variable en el tiempo
- la evolución de la calidad del agua en los depósitos puede modelizarse como una mezcla homogénea, mediante un modelo de pistón, o como un reactor de dos compartimentos.

APLICACIONES

WaterCAD se desarrolló específicamente para ayudar a las compañías encargadas de la distribución del agua potable a controlar y mejorar la calidad del agua suministrada a los abonados a través de la red. En estos momentos es uno de los paquetes informáticos más completo que existe en el campo de la simulación de sistemas hidráulicos, hecho que unido a su distribución libre hace que sea el software más extendido. Puede utilizarse para el diseño de programas de muestreo, realizar estudios sobre la pérdida de desinfectante y formación de subproductos derivados, o valorar las dosis de contaminante recibidas por los abonados. Asimismo puede resultar una herramienta útil para valorar estrategias orientadas a mejorar la calidad del agua, como utilizar fuentes de suministro alternativas, modificar las secuencias de bombeo que regulan el llenado y vaciado de los depósitos para reducir el tiempo de permanencia del agua en los mismos, utilizar estaciones de recloración en puntos clave de la red para garantizar los niveles de cloro de

consigna, o planificar programas de rehabilitación y limpieza de tuberías. Sin embargo, como alternativa, puede también calcular solamente la parte hidráulica y almacenar los resultados en un fichero, o utilizar un fichero hidráulico previamente almacenado para llevar a cabo una simulación de la calidad del agua.

WaterCAD puede utilizarse también para mejorar las características de la red hidráulica. Entre los posibles usos pueden citarse la localización y dimensionado de tuberías, bombas y válvulas, la minimización del gasto energético, la verificación de las condiciones de suministro en caso de incendio, la realización de estudios de vulnerabilidad de la red, o el entrenamiento de los operadores.

Otra ventaja significativa es que WaterCAD permite 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.

Entre los inconvenientes de este software esta el poco amigable sistema de entrada de datos, que en una primera versión difundida en Cuba requiere la creación de un complejo fichero de texto con formato específico. En la versión V.7 del 2000 esta dificultad trata de ser mejorada sin que sea definitivamente resuelta. Otro aspecto es que WaterCAD realiza análisis hidráulicos pero no permite el diseño automático de tramos o sectores de la misma, lo que limita su utilización en el área de proyectos e investigaciones. WaterCAD es un programa de código abierto, o sea que proporciona las herramientas (toolkit) que permiten identificar las DLL (bibliotecas de vínculos dinámicos o Dynamic Link Library) que vienen a ser los motores de cálculo del sistema.

Las DLL, en términos informáticos, son subrutinas ejecutables que proporcionan funciones específicas para un determinado fin, están almacenadas independientemente como archivos con la extensión DLL, sólo se activan cuando el programa principal las llama y tienen la ventaja de poder ser utilizadas por diferentes aplicaciones a la vez, mientras esto no sucede no ocupan memoria(Alfonso 2002).

El software WaterCAD no es capaz de realizar el cálculo de los diámetros de las tuberías, sino que calcula los caudales y alturas piezométricas de la red a partir de todos los datos físicos del sistema y una altura piezométrica conocida. Por lo tanto, tan solo es un apoyo para el diseño de una red de distribución de agua. El método de cálculo utilizado es el de Newton, debido a su sencillez y rapidez de cálculo.

1.6 Sistema de abastecimiento de agua para el ISMM

Para el abasto de agua a la zona industrial y a la población el municipio de Moa cuenta con una Presa Embalse de capacidad para 141 000 000 Hm³ de agua, con un nivel máximo en la cota de corona de 239 msn, con un promedio de lluvia de 2 000 mm/añual, la misma se encuentra ubicada a 12 Km al sur de la ciudad de Moa.

La Derivadora Moa, ubicada a 9 Km río debajo de la Presa Moa, constituye la parte reguladora, manteniendo los niveles del agua que le suministra la presa (Leyva 2010).

Los Pozos de la Veguita, ubicados en las márgenes del río Moa, en el poblado del mismo nombre, que abastece con agua subterránea, a 5 Subestaciones de Bombeo, de las cuales se encuentran en explotación tres, con una capacidad de 500 l/s. De acuerdo a la capacidad de embalse y fuentes de abasto de agua en nuestro territorio, podemos decir que Moa, cuenta con una de las mayores reservas de aguas del país.

La presa Moa suministra por gravedad el agua hasta la planta potabilizadora, esta bombea mediante conductoras el tanque ubicado en las afueras de la ciudad. El tanque distribuye agua por gravedad a la cisterna del ISMM. El siguiente proceso ocurre cuando se produce el trabajo de la bomba, la cual se encarga solo de bombear el tanque emplazado cerca del comedor, el cual con una altura de 34 metros distribuye mediante gravedad el agua con destino al área docente y otros puntos de empleo de esta (comedor, ATM, etc.).



1.7 Conclusiones del capítulo

Se despliega la necesidad de acometer un estudio mediante el cual con el uso de WaterCAD se pueda demostrar las posibilidades del suministro de agua por gravedad, desde el tanque hasta el área de estudio.

La implementación de procedimientos que permita obtener diseños optimizados de la red hidráulica revierte gran importancia para el instituto dado la necesidad de elevar la eficiencia de la actividad de proyecto y la calidad de las soluciones encontradas.

CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Introducción

Mostrar un breve panorama de los problemas a los que se enfrentan los ingenieros en la práctica pues no basta con los principios fundamentales de la Ingeniería Hidráulica y un poco de sentido común para desarrollar proyectos hidráulicos por lo que se hace necesario acudir a métodos científicos como la creación y uso posterior del WaterCAD para sistemas hidráulicos.

El presente capítulo tiene como objetivo plantear la metodología a continuar para el análisis del suministro del agua por gravedad desde el tanque emplazado en el instituto hasta el área docente, comedor, etc. Mediante el software WaterCAD v.7

2.2 Características técnicas del sistema de bombeo del ISMM

La característica del conjunto motor - bomba del sistema de distribución de agua del ISMM se muestra en la tabla 2.1 y 2.2

Tabla 2.1 Datos de la Bomba

| Tipo | Bomba centrífuga OMEGA |
|------------------|------------------------|
| Caudal nominal | 140 m ³ /h |
| Altura nominal | 40 m |
| Potencia nominal | 30 kW |

Tabla 2.2 Datos de la tubería

| | |
|----------|------------------------------|
| Material | Hierro fundido y galvanizado |
| Diámetro | 152,4 |

2.3 Descripción de la red hidráulica del área docente del ISMM

Denominamos el área docente del ISMM, al espacio que comprende el área cocina comedor, el edificio docente, el edificio de la facultad Metalurgia Electromecánica (incluye la nave de

beneficio de la carrera de metalurgia y la instalación semi-industrial de hidrotransporte), edificio de la facultad Minas Geología, el edificio de la Facultad Humanidades y las áreas de la base de transporte del ISMM y ATM.

Todo el sistema de distribución de agua del ISMM, comienza en la cisterna la cual consta de la estación de bombeo que alimenta el tanque elevado (capacidad 350 m³ y altura 34 m), esta bomba se enciende el tiempo necesario para el llenado de dicho tanque, el cual es el encargado de alimentar por gravedad la red de distribución de agua en las áreas correspondientes

2.4 Uso del software WaterCAD

Los pasos a seguir normalmente para modelizar un sistema de distribución de agua con WaterCAD son los siguientes:

Dibujar un esquema de la red de distribución (ver anexos) o importar una descripción básica del mismo desde un fichero de texto.

Editar las propiedades de los objetos que configuran el sistema (anexo 1)

Describir el modo de operación del sistema

Seleccionar las opciones de cálculo.

Realizar el análisis hidráulico.

Ver los resultados del análisis.

2.5 Consideraciones para el cálculo de la red hidráulica usadas por el software WaterCAD

Para la pérdida de carga (o de altura piezométrica) en una tubería debida a la fricción por el paso del agua, puede calcularse utilizando tres fórmulas de pérdidas diferentes:

La fórmula de Hazen – Williams

LA fórmula de Darcy – Weisbach

LA fórmula de Chezy - Manning

La fórmula de Hazen - Williams no puede utilizarse para líquidos distintos del agua y fue desarrollada originalmente sólo para flujo turbulento. Desde el punto de vista académico, la

fórmula de Darcy -Weisbach es la correcta, y es aplicable a todo tipo de líquidos y regímenes. Finalmente, la fórmula de Chezy – Manning es utilizada usualmente para canales y tuberías de gran diámetro, donde la turbulencia está muy desarrollada.

Todas las fórmulas emplean la misma ecuación básica para calcular la pérdida de carga entre el nudo de entrada y el de salida.

$$h_L = A \cdot q^B \quad 2.1$$

Dónde:

h_L - Pérdida de carga (m)

q - Caudal (l/s)

A - Coeficiente de resistencia

B - exponente del caudal.

Las expresiones del coeficiente de resistencia y valor del exponente del caudal para cada una de las fórmulas de pérdidas indicadas. Se alistan en la tabla 2.4

Tabla 2.3 Formulas de pérdidas de carga para tuberías llenas

| <i>Fórmula</i> | <i>Coeficiente de Resistencia (A)</i> | <i>Expon. Caudal (B)</i> |
|----------------|---|------------------------------|
| Hazen-Williams | $10,64 C^{-1,852} d^{-4,871} L \text{ (}^5\text{)}$ | 1,852 |
| Darcy-Weisbach | $0,0826 f(\varepsilon, d, q) d^5 L \text{ (}^6\text{)}$ | 2 |
| Chezy-Manning | $10,3 n^2 d^{-5,33} L \text{ (}^7\text{)}$ | 2 |

donde: C = Coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams
 ε = Coeficiente de rugosidad de Darcy-Weisbach (m)
f = factor de fricción (depende de ε , d, y q)
n = Coeficiente de rugosidad de Manning
d = diámetro de la tubería (m)
L = longitud de la tubería (m)
q = caudal (m³/s)

Fuente: Manual de WaterCAD v.7

Tabla 2.4 Coeficiente de rugosidad para tuberías llenas

| <i>Material</i> | <i>C Hazen-Williams (universal)</i> | <i>ε Darcy-Weisbach (mm)</i> | <i>n Manning (universal)</i> |
|---------------------------------|---|----------------------------------|----------------------------------|
| Fundición | 130 – 140 | 0.26 | 0.012 - 0.015 |
| Hormigón u Hormig. revestido | 120 – 140 | 0.3 – 3.0 | 0.012 - 0.017 |
| Hierro Galvanizado | 120 | 0.15 | 0.015 - 0.017 |
| Plástico | 140 – 150 | 0.0015 | 0.011 - 0.015 |
| Acero | 140 – 150 | 0.045 | 0.015 - 0.017 |
| Cerámica | 110 | | 0.013 - 0.015 |

Fuente: Manual de WaterCAD v.7

Pérdidas menores

Las pérdidas menores (también denominadas pérdidas locales) son debidas al incremento de la turbulencia cuando el flujo pasa por un codo o un accesorio. La importancia de incluir o no tales pérdidas depende del tipo de red modelada y de la precisión de los resultados deseado. Para tenerlas en cuenta hay que incluir entre los datos de la tubería el coeficiente de pérdidas menores. El valor de la pérdida será el producto de dicho coeficiente por la altura dinámica en la tubería,

$$h_L = K \left(\frac{v^2}{2 \cdot g} \right)$$

2.2

Donde

K = coeficiente de pérdidas menores,

v = velocidad del flujo (m/s)

g = aceleración de la gravedad (m/s²)

Tabla 2.5 Valor del coeficiente de pérdidas menores para algunos de los accesorios más comunes.

| <i>ACCESORIO</i> | <i>COEF. PERDIDAS</i> |
|-------------------------------------|-----------------------|
| Válvula de Globo, todo abierta | 10.0 |
| Válvula de Angulo, todo abierta | 5.0 |
| Válv. Retenc. Clapeta, todo abierta | 2.5 |
| Válvula compuerta, todo abierta | 0.2 |
| Codo de radio pequeño | 0.9 |
| Codo de radio mediano | 0.8 |
| Codo de radio grande | 0.6 |
| Codo a 45 grados | 0.4 |
| Codo de Retorno (180°) | 2.2 |
| Té Estándar – flujo recto | 0.6 |
| Té Estándar – flujo desviado | 1.8 |
| Entrada brusca | 0.5 |
| Salida brusca | 1.0 |

Fuente: Manual de WaterCAD v.7

Bombas

Las bombas son líneas que comunican energía al fluido elevando su altura piezométrica. Los datos principales de una bomba son sus nudos de aspiración e impulsión y su curva característica (o relación entre caudal trasegado y la altura comunicada). En lugar de dar la curva característica, el comportamiento de una bomba puede también modelizarse suponiendo que aporta una cantidad de energía constante al fluido por unidad de tiempo (potencia constante), lo que permite determinar la altura comunicada al fluido en función del caudal de paso.

El resultado principal asociado a una bomba es el incremento de altura comunicada al fluido. El flujo a través de una bomba es de sentido único, y WaterCAD no permite a la bomba operar fuera del rango delimitado por su curva característica.

Curvas Características (de una Bomba)

La Curva Característica de una Bomba representa la relación entre la altura comunicada al fluido y el caudal de paso, a su velocidad nominal de giro. La altura es la energía comunicada al fluido por unidad de peso, o bien, la diferencia de presiones entre la salida y la entrada de la bomba, y se representa sobre el eje vertical de la curva (eje Y), en pies (metros). El caudal se representa sobre el eje horizontal (eje X), en las unidades de caudal elegidas. Para que la curva característica de una bomba sea válida, la altura debe disminuir al aumentar el caudal. WaterCAD ajustará diferentes tipos de curvas, en función del número de puntos suministrado. Ver anexo

Válvulas

Las válvulas son líneas que limitan la presión o el caudal en un punto determinado de la red. Los datos principales de una válvula son:

Los nudos aguas arriba y aguas abajo

El diámetro

La consigna

Su estado

Los resultados asociados con una válvula son básicamente el caudal de paso y la pérdida de carga.

2.5.1 El Modelo de Simulación Hidráulica

El modelo de simulación hidráulica de WaterCAD calcula las alturas piezométrica en los nudos y los caudales en las líneas, dados los niveles iniciales en los embalses y depósitos, y la sucesión en el tiempo de las demandas aplicadas en los nudos. De un instante al siguiente se actualizan los niveles en los depósitos conforme a los caudales calculados que entran o salen de los mismos, y las demandas en los nudos conforme a sus curvas de modulación. Para obtener las alturas y caudales en un determinado instante se resuelven simultáneamente las ecuaciones de conservación del caudal en los nudos y las ecuaciones de pérdidas en todos los tramos de la red. Este proceso, conocido como “equilibrado hidráulico”, requiere el uso de método iterativo para resolver las ecuaciones de tipo no lineal involucradas. WaterCAD emplea a tal fin el “Algoritmo del Gradiente”.

2.6 Algoritmos de cálculo usado por el software WaterCAD

Análisis hidráulico.

Supongamos que tenemos una red de tuberías con N nudos de caudal y NF nudos de altura dada (embalses y depósitos). La relación entre la pérdida de carga para una tubería que va del nudo i a la j, y el caudal de paso Q_{ij} , puede escribirse como:

$$H_i - H_j = h_{ij} = rQ_{ij}^n \quad 2.3$$

donde H = altura piezométrica en el nudo, h = pérdida de carga, r = coeficiente de resistencia, Q = caudal, n = exponente del caudal, y m = coeficiente de pérdidas menores. El valor del coeficiente de resistencia depende de la fórmula utilizada para el cálculo de las pérdidas. Para las bombas, la pérdida (esto es, la altura de la bomba cambiada de signo), puede representarse mediante una fórmula potencial del tipo:

$$h_{ij} = -\omega^2 \left(h_0 - r(Q_{ij}/\omega)^n \right) \quad 2.4$$

donde h_0 es la altura a caudal nulo, ω es la velocidad relativa de giro, r y n son coeficientes de la curva de la bomba.

El segundo sistema de ecuaciones a cumplir está configurado por la condición de equilibrio para los caudales en todos los nudos:

$$\sum_j Q_{ji} - D_i = 0 \quad \text{para } i = 1, \dots, N \quad 2.5$$

donde D_i es el caudal de demanda en el nudo i , el cual por convención se toma como positivo cuando entra al nudo. Dados los valores de las alturas en los nudos de altura prefijada, se trata de encontrar una solución para las alturas H_i en los restantes nudos, y para los caudales Q_{ij} de todas las líneas, que satisfagan las ecuaciones (2.4) y (2.2).

El método de resolución del Gradiente comienza haciendo una estimación inicial del caudal por cada tubería, sin necesidad de cumplir la ecuación de continuidad. En cada iteración del método, se obtienen las alturas piezométrica en los nudos resolviendo el sistema de ecuaciones:

$$AH = F$$

2.6

Donde

A = matriz Jacobiana (NxN)

H = vector de incógnitas nodales (Nx1)

F = vector de términos independientes (Nx1)

Los elementos de la diagonal principal de la matriz jacobiana vienen dados por:

$$A_{ii} = \sum_j P_{ij}$$

y los elementos no nulos fuera de la diagonal principal, por:

$$A_{ij} = -P_{ij}$$

Donde p_{ij} es la inversa de la derivada respecto al caudal, de la pérdida de carga en la línea que va del nudo i al j . Su expresión para las tuberías es:

$$P_{ij} = \frac{1}{nr|Q_{ij}|^{n-1} + 2m|Q_{ij}|}$$

y para las bombas:

$$P_{ij} = \frac{1}{n\omega^2 r \left(\frac{Q_{ij}}{\omega} \right)^{n-1}}$$

Los términos independientes están constituidos por el caudal residual en el nudo no equilibrado, más un factor de corrección dado por:

$$F_i = \left[\sum_j Q_{ij} - D_i \right] + \sum_j y_{ij} + \sum_f P_{if} H_f$$

Donde el último término está presente sólo para las tuberías que conectan el nudo i con un nudo de altura conocida f ; por su parte, el factor de corrección del caudal y_{ij} tiene por expresión:

$$y_{ij} = p_{ij} \left(r |Q_{ij}|^n + |Q_{ij}|^2 \right) \text{sgn}(Q_{ij})$$

para las tuberías, donde $\text{sgn}(x)$ es 1 si $x > 0$ y -1 en otro caso, e:

$$y_{ij} = -p_{ij} \omega^2 \left(h_0 - r(Q_{ij}/\omega)^n \right)$$

para las bombas (Q_{ij} es siempre positivo en este caso).

Una vez calculadas las nuevas alturas resolviendo las ecuaciones (2.7), los nuevos caudales se obtienen mediante:

$$Q_{ij} = Q_{ij} - \left(y_{ij} - p_{ij}(H_i - H_j) \right) \quad 2.7$$

Si la suma, extendida a todas las líneas, del valor absoluto de la variación relativa del caudal respecto al caudal total en la línea, es mayor que una cierta tolerancia (p. ej. 0,001), las ecuaciones (2.5) y (2.6) se resuelven de nuevo. Obsérvese que la fórmula de actualización (2.6) conduce al equilibrio de caudales en los nudos, tras la primera iteración.

WaterCAD implementa este método realizando los siguientes pasos:

1. El sistema de ecuaciones lineales 2.5 se resuelve utilizando un método de matrices vacías, basado en la reordenación de los nudos (George y Liu, 1981). Una vez los nudos reordenados al objeto de minimizar el número de coeficientes de relleno en la matriz A , se realiza una factorización simbólica, de modo que sólo los elementos no nulos de A se almacenan en memoria para operar con ellos. A lo largo de una simulación en periodo extendido, la reordenación y factorización de la matriz se efectúa una sola vez, al comienzo del análisis.
2. Para la primera iteración del primer instante de simulación, los caudales en las tuberías se determinan con la condición de que la velocidad de circulación sea de 1 pie/seg. Por su parte, el caudal en las bombas se hace igual al caudal de diseño de la

bomba (internamente todos los cálculos se realizan con las alturas en pies y los caudales en pies^3/seg - cfs)

3. El coeficiente de resistencia de una tubería (r) se calcula según las fórmulas de la Tabla 2.4. En el caso de la ecuación de pérdidas de Darcy-Weisbach, el factor de fricción f se calcula mediante diferentes ecuaciones, dependiendo del Número de Reynolds (Re) del flujo:

Para $Re < 2000$ se emplea la fórmula de Hagen – Poiseuille (Bhave, 1991):

$$f = \frac{64}{Re} \quad 2.8$$

Para $Re > 4000$ se emplea la aproximación de Swamee y Jain a la ecuación de Colebrook - White (Bhave, 1991):

$$f = \frac{0.25}{\left[\log_{10} \left[\frac{\epsilon}{3.7d} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right] \right]^2} \quad 2.9$$

Para $2000 < Re < 4000$ se emplea una interpolación cúbica al Diagrama de Moody (Dunlop, 1991):

$$f = \left(X1 + R(X2 + R(X3 + X4)) \right) \quad 2.10$$

Dónde:

$$R = \frac{R}{1000}$$

$$X1 = 7FA - F$$

$$X2 = 0.128 - 17FA - 2FB$$

$$X3 = -0.128 + 13FA - 2FB$$

$$X4 = R(0.032 - 3FA + 0.5FB)$$

$$FA = (Y3)^{-2}$$

$$FB = FA \left[2 - \frac{0.00514215}{Y2 - Y3} \right]$$

$$Y2 = \frac{\varepsilon}{3.7d} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \quad 2.11$$

$$Y3 = -0.86859 \ln \left[\frac{\varepsilon}{3.7d} + \frac{5.74}{4000^{0.9}} \right] \quad 2.12$$

Dónde: e = rugosidad de la tubería, y d = diámetro de la tubería.

4. El coeficiente de pérdidas menores K, referido a la altura de velocidad, se transforma en el factor equivalente m que multiplica al cuadrado del caudal, mediante la siguiente relación:

$$m = \frac{0.02517K}{d^4} \quad 2.13$$

5. Los emisores aplicados en los nudos se modelizan como una tubería ficticia entre el nudo y un embalse ficticio. Los parámetros de la tubería ficticia son $n = (1/\gamma)$, $r = (1/C)^2$, y $m = 0$, donde C es el coeficiente de descarga del emisor, y γ el exponente de la presión. La altura del embalse ficticio es la propia cota del nudo. El caudal de paso calculado por la tubería ficticia se interpreta como el caudal descargado por el emisor.

6. A las válvulas abiertas se les asigna un valor del coeficiente r calculado bajo el supuesto de que la válvula actúa como una tubería lisa ($f = 0.02$), cuya longitud es dos veces el diámetro de la válvula. Las líneas cerradas se supone que obedecen a una relación de pérdidas lineal con un factor de resistencia muy grande, p. ej. $h = 10^8 Q$, con lo que $p = 10^{-8}$ e $y = Q$. Para las líneas en las cuales $(r + m)Q < 10^{-7}$, entonces $p = 10^{-7}$ e $y = Q/7$.

7. En cada instante de cálculo se comprueba, tras cada iteración hasta la décima, el estado de las bombas, válvulas de retención, válvulas de control del caudal y tuberías

que conectan con depósitos llenos o vacíos. Después de la décima iteración, el estado de estos componentes se vuelve a comprobar de nuevo una vez obtenida la convergencia, excepto para las válvulas de control de la presión (PRV y PSV), cuyo estado se comprueba en todas las iteraciones.

8. Durante la comprobación del estado de los diferentes componentes, las bombas se paran si la altura requerida es superior a su altura a caudal cero (para impedir el flujo inverso). Análogamente, las válvulas de retención se cierran si la pérdida de carga resultante es negativa (ver más adelante). Si más adelante dejan de darse estas circunstancias, dichos elementos vuelven a reactivarse. De forma similar se comprueba el estado de las líneas que conectan con depósitos que poseen limitaciones de nivel. Dichas líneas se cierran si la diferencia de alturas inducen al vaciado de un depósito que está a su nivel mínimo, o al llenado de un depósito que está a su nivel máximo; y se abren de nuevo al dejar de darse estas circunstancias.
9. La simple comprobación del signo de la pérdida ($h < 0$) para determinar si una válvula de retención (VR) debe estar cerrada o abierta, se observó que en algunas redes daba lugar a un comportamiento cíclico de la válvula entre estos dos estados, debido a los límites de precisión numérica. Finalmente se comprobó que el siguiente procedimiento conducía a un comportamiento más robusto de estas válvulas:

si $|h| > H_{tol}$ entonces

si $h < -H_{tol}$ entonces estado = Cerrada

si $Q < -Q_{tol}$ entonces estado = Cerrada

si no estado = Abierta

si no

si $Q < -Q_{tol}$ entonces estado = Cerrada

si no estado = sin cambios

donde $H_{tol} = 0,0005$ pies y $Q_{tol} = 0,001$ pies^3/seg .

10. Si la verificación del estado de una bomba, tubería o VR conduce a su cierre total, entonces el valor del caudal se fuerza a pies 10^{-6} ples³/seg. Cuando se reactiva de nuevo una bomba, su caudal se determina entrando en su curva característica con la altura actual. Cuando se reabre una tubería o una VR, su caudal se determina resolviendo la ecuación D.1 para la pérdida de carga actual h , ignorando cualquier pérdida menor.
11. Los coeficientes de la matriz jacobiana correspondientes a las válvulas de rotura de carga (VRC) se fuerzan a los siguientes valores: $p = 10^8$ e $y = 10^8$ Hset, donde Hset es la caída impuesta como consigna en la válvula (en pies). Las válvulas de regulación (VRG) son tratadas como tuberías, cuyo coeficiente r se establece según las hipótesis del epígrafe 6 y cuyo coeficiente m se obtiene transformando el coeficiente impuesto como consigna en la válvula.
12. Los coeficientes de la matriz jacobiana correspondientes a las válvulas reductoras, sostenedoras y de control del caudal (VRPs, VSPs y VCQs) se calculan una vez todas las demás líneas han sido analizadas. La comprobación del estado de las VRPs y VSPs. Estas válvulas pueden estar completamente abiertas, completamente cerradas, o bien activas imponiendo las consignas de presión o caudal establecidas.
13. La lógica empleada para comprobar el estado de una VRP es la siguiente:

Si estado actual = Activa entonces

si $Q < -Q_{tol}$ entonces nuevo estado = Cerrada

si $H_i < H_{set} + H_{ml} - H_{tol}$ entonces nuevo estado = Abierta

si no, nuevo estado = Abierta

Si estado actual = Abierta entonces

si $Q < -Q_{tol}$ entonces nuevo estado = Cerrada

si $H_i > H_{set} + H_{ml} + H_{tol}$ entonces nuevo estado = Activa

si no, nuevo estado = Abierta

Si estado actual = Cerrada entonces

si $H_i > H_j + H_{tol}$

y $H_i < H_{set} - H_{tol}$

entonces nuevo estado = Abierta

si $H_i > H_j + H_{tol}$

y $H_j < H_{set} - H_{tol}$

entonces nuevo estado = Activa

si no,

nuevo estado = Cerrada

donde Q es el caudal actual a través de la válvula, H_i es la altura aguas arriba, H_j la altura aguas abajo, H_{set} la presión de consigna transformada en altura, H_{ml} la pérdida menor a válvula abierta ($= mQ^2$), y finalmente H_{tol} y Q_{tol} son los mismos valores utilizados para las válvulas de retención. Para las VSP se efectúa una comprobación similar, excepto que en las inecuaciones en que interviene H_{set} , los subíndices i y j aparecen intercambiados, al tiempo que los operadores $>$ y $<$.

14. El caudal que atraviesa una VRP activa es forzado a entrar por el nudo aguas abajo, mientras que el que atraviesa una VSP es obligado a salir del nudo aguas arriba. Para imponer la presión de salida de una VRP que vaya del nudo i al j , se hace:

$$p_{ij} = 0$$

$$F_j = F_j + 10^8 H_{set}$$

$$A_{jj} = A_{jj} + 10^8$$

Con ello se fuerza a la altura en el nudo aguas abajo a tomar el valor de la altura de consigna H_{set} . Para las VSP se procede de manera análoga, excepto que los subíndices de F y A son los correspondientes al nudo aguas arriba i . Cuando las VRPs o las VSPs están totalmente abiertas o cerradas, sus coeficientes en la matriz son tratados del mismo modo que para las tuberías.

15. Para una válvula VCQ activa que vaya del nudo i al j , cuyo caudal de consigna es Q_{set} , éste es añadido al caudal que sale del nudo i y al caudal que entra al nudo j , para lo cual se resta de F_i y se añade a F_j . Si la altura en el nudo i es menor que la del nudo j , entonces la válvula no puede proporcionar el caudal y es tratada como una tubería abierta.

16. Una vez conseguida inicialmente la convergencia (convergencia de los caudales, sin cambios en las VRPs y VSPs) se realiza una nueva comprobación del estado de las bombas, VRs, VCQs, y líneas conectadas a depósitos. También se comprueba el estado de las líneas controladas por presión (p. ej. el estado de una bomba controlada por la presión en un nudo). Si hubiera algún cambio, las iteraciones se prolongan durante al menos dos nuevas pasadas (la comprobación de las condiciones de convergencia es omitida para la primera iteración). En caso contrario, la solución se da por buena.
17. Para desarrollar las simulaciones en periodo extendido (EPS), se ha implementado el siguiente procedimiento:
- a. Una vez encontrada una solución para el instante actual, el incremento de tiempo adoptado para avanzar hasta el instante siguiente será el mínimo entre:
 - ✓ el instante en que comienza un nuevo periodo de demanda.
 - ✓ el menor intervalo de tiempo que hace que se llene o vacíe algún depósito.
 - ✓ el menor intervalo de tiempo para el cual el nivel en algún depósito alcanza el valor de referencia que provoca el cambio de estado en alguna línea (p. ej. arrancar o parar una bomba), según figura en alguna de las leyes de control simples.
 - ✓ el próximo instante en que debe actuar alguna de las leyes de control simple reguladas por tiempo.
 - ✓ el próximo instante en que alguna de las leyes de control basadas en reglas provoque un cambio en la red.

Para calcular el instante en que se alcanza un determinado nivel en un depósito, se supone que éste evoluciona linealmente en base al caudal actual que entra o sale del depósito.

Por su parte, el instante de activación de las leyes de control basadas en reglas, se determina del siguiente modo:

- ✓ Comenzando en el instante actual, las distintas reglas se analizan paso a paso, avanzando con un intervalo de tiempo fijo, cuyo valor por defecto es 1/10 del intervalo

de cálculo hidráulico (por ejemplo, si el intervalo de cálculo hidráulico es de 1 hora, entonces las reglas se evalúan cada 6 minutos).

- ✓ En base a este intervalo de tiempo se actualiza la hora de la simulación, y al mismo tiempo los niveles de agua en los depósitos (tomando como referencia los últimos caudales entrantes o salientes calculados).
- ✓ Si en un momento dado se cumple alguna de las reglas, las actuaciones derivadas se añaden a una lista. Si la actuación propuesta entra en conflicto con otra actuación de la lista sobre la misma línea, prevalece aquella que tiene una prioridad más alta, siendo la otra eliminada. Si las prioridades son equivalentes, entonces prevalece la actuación que estaba ya en la lista.

Después de haber evaluado todas las reglas, si la lista no está vacía se ejecutan todas las actuaciones almacenadas en ella. Si como consecuencia de dichas actuaciones cambia el estado de una o más líneas, se procede a obtener una nueva solución y el proceso de simulación continúa.

- ✓ Si no hay ningún cambio de estado en ninguna línea, se limpia la lista de actuaciones, y se pasa a evaluar las reglas en el siguiente instante, a no ser que se haya alcanzado el próximo intervalo hidráulico.

b. Una vez determinado el intervalo de avance, se actualiza el tiempo de la simulación, se calculan las nuevas demandas, se ajustan los niveles en los depósitos en base a los últimos caudales calculados, y se verifican las reglas de control para determinar qué líneas deben cambiar su estado.

c. Se desencadena un nuevo proceso iterativo para resolver el conjunto de ecuaciones (2.5) y (2.6), partiendo de los caudales actuales.

2.7 Método para el análisis de los gastos energéticos

$$C_{bom} = \frac{t_{el} \cdot t_i \cdot N_m}{\eta_m} \quad 2.14$$

Dónde:

C_{bom} - costo de bombeo de la instalación; (CUC/día),



t_{el} - tarifa eléctrica; (CUC/kW.h),

t_t - tiempo de trabajo del equipo; (h/día),

η_m - rendimiento del motor eléctrico; (%),

N_m - potencia del motor; (kW).

Gasto anual de consumo de energía eléctrica por iluminación.

$$g_{eil} = Ni \cdot Ta \cdot T_{pi}$$

2.15

Dónde:

Ni: Potencia consumida por iluminación.

Tpi: Cantidad de horas de operación en el año.



2.8 Conclusiones parciales

Se establece el procedimiento para el uso y aplicación del software WaterCAD, así como la característica de los principales componentes que configuran la red del área docente.

Se establece las consideraciones y algoritmo de cálculo usado por el Software WaterCAD, para el análisis de la red.

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3.1 Introducción del capítulo

El análisis de una investigación es esencial para instituir en qué medida esta ha contribuido al perfeccionamiento político, económico o social de un estado o región. El correcto estudio de esta permite además registrar las bases para posteriores trabajos que sobre el tópico se desarrollen, de ahí su necesaria relación con la economía, la sociedad y el medio ambiente, en correspondencia con esto:

El **objetivo** del capítulo: Realizar la valoración de los resultados obtenidos en el análisis realizado por el software WaterCAD de la red hidráulica del área docente del ISMM.

3.2 Trazado de la red del área docente del ISMM

El trazado de la red del área docente del ISMM, se obtiene de forma totalmente gráfica, mediante la interfaz del software WaterCAD, definiendo primero los nodos (demandas, tanques o embalses) y enlazándolos a continuación mediante líneas (tuberías, bombas o válvulas) para garantizar así la conectividad de la red. El trazado de las tuberías puede definirse mediante polilíneas, para ajustar mejor el esquema de la red a la realidad. En la figura 3.1 se muestra el trazado de la red en el entorno del software. [Ver anexo 1](#)

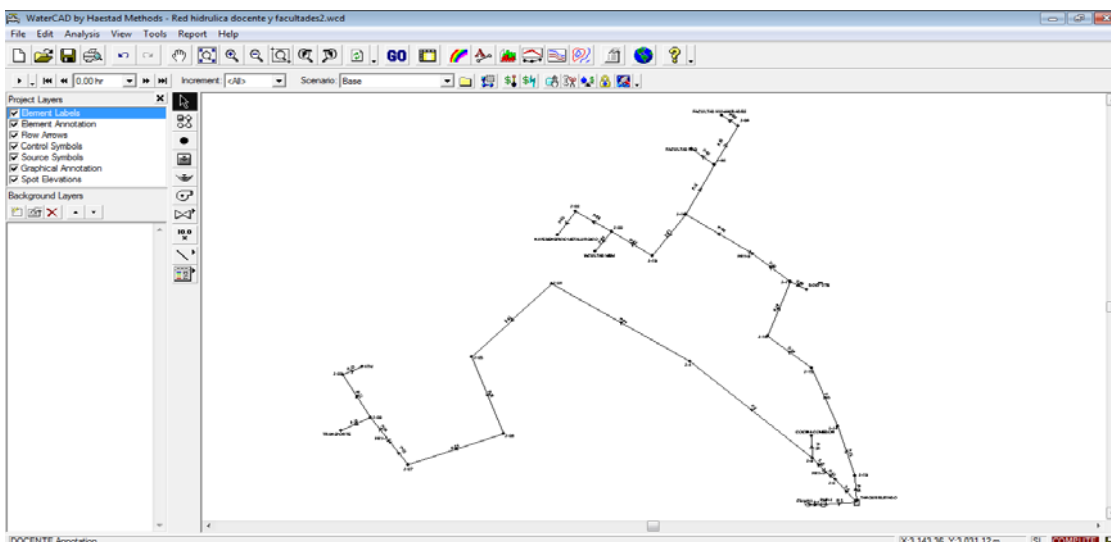


Figura 3.1 Esquema del trazado de la red del área de residencia del ISMM

Una vez confeccionado el trazado de la red se procedió a editar las propiedades de los elementos que configuran la red. **Ver anexos**

3.3 Resultados obtenidos a partir del WaterCad

Luego de introducir los datos necesarios, por la que está creada la red hidráulica del área docente, cocina-comedor, ATM, etc. y se efectuará la ejecución del programa WaterCad, el mismo arrojó los siguientes resultados:

- ✓ Flujo suministrado: 128.84 l/s.
- ✓ Flujo demandado: 78.28 l/s.
- ✓ Flujo guardado: 50.56 l/s.
- ✓ El tanque está a un nivel de 34 m.

3.3.1 Resultados de las bombas

Según los resultados obtenidos a partir de la simulación con el programa WaterCad, la bomba empleada en la instalación trabaja como se muestra en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Resumen de los resultados de operación de la bomba

| Tiempo (hr) | Estado | Presión en la succión (kPa) | Presión en la descarga (kPa) | Descarga (l/s) | Altura (m) | Velocidad relativa | Potencia (kW) |
|-------------|--------|-----------------------------|------------------------------|----------------|------------|--------------------|---------------|
| 0,00 | On | -10,32 | 336,44 | 45,06 | 35,43 | 1,00 | 15,63 |
| 1,00 | On | -10,33 | 333,14 | 45,48 | 35,10 | 1,00 | 15,63 |
| 2,00 | On | -10,34 | 329,94 | 45,89 | 34,77 | 1,00 | 15,62 |
| 3,00 | On | -10,35 | 326,82 | 46,28 | 34,45 | 1,00 | 15,61 |
| 4,00 | On | -10,36 | 323,78 | 46,66 | 34,14 | 1,00 | 15,59 |
| 5,00 | On | -10,37 | 320,82 | 47,02 | 33,84 | 1,00 | 15,58 |
| 6,00 | On | -10,38 | 317,94 | 47,38 | 33,55 | 1,00 | 15,56 |
| 7,00 | On | -10,39 | 315,14 | 47,72 | 33,26 | 1,00 | 15,54 |
| 8,00 | On | -10,39 | 312,41 | 48,05 | 32,98 | 1,00 | 15,51 |
| 9,00 | On | -10,40 | 309,75 | 48,37 | 32,71 | 1,00 | 15,49 |
| 10,00 | On | -10,41 | 307,16 | 48,67 | 32,45 | 1,00 | 15,46 |
| 11,00 | On | -10,42 | 304,63 | 48,97 | 32,19 | 1,00 | 15,43 |
| 12,00 | On | -10,43 | 302,16 | 49,26 | 31,94 | 1,00 | 15,40 |
| 13,00 | On | -10,43 | 299,76 | 49,54 | 31,70 | 1,00 | 15,37 |
| 14,00 | On | -10,44 | 297,42 | 49,82 | 31,46 | 1,00 | 15,34 |
| 15,00 | On | -10,45 | 295,13 | 50,08 | 31,22 | 1,00 | 15,31 |
| 16,00 | On | -10,45 | 292,91 | 50,34 | 31,00 | 1,00 | 15,27 |
| 16,90 | On | -10,46 | 290,95 | 50,56 | 30,80 | 1,00 | 15,24 |
| 17,00 | On | -10,46 | 292,01 | 50,44 | 30,91 | 1,00 | 15,26 |

| Tiempo (hr) | Estado | Presión en la succión (kPa) | Presión en la descarga (kPa) | Descarga (l/s) | Altura (m) | Velocidad relativa | Potencia (kW) |
|-------------|--------|-----------------------------|------------------------------|----------------|------------|--------------------|---------------|
| 17,49 | On | -10,46 | 290,95 | 50,56 | 30,80 | 1,00 | 15,24 |
| 18,00 | On | -10,44 | 296,40 | 49,93 | 31,35 | 1,00 | 15,32 |
| 19,00 | On | -10,45 | 294,14 | 50,19 | 31,12 | 1,00 | 15,29 |
| 20,00 | On | -10,46 | 291,94 | 50,45 | 30,90 | 1,00 | 15,26 |
| 20,46 | On | -10,46 | 290,95 | 50,56 | 30,80 | 1,00 | 15,24 |
| 21,00 | On | -10,44 | 296,75 | 49,89 | 31,39 | 1,00 | 15,33 |
| 22,00 | On | -10,45 | 294,48 | 50,16 | 31,16 | 1,00 | 15,30 |
| 23,00 | On | -10,46 | 292,27 | 50,41 | 30,93 | 1,00 | 15,26 |
| 23,61 | On | -10,46 | 290,95 | 50,56 | 30,80 | 1,00 | 15,24 |
| 24,00 | On | -10,45 | 295,12 | 50,08 | 31,22 | 1,00 | 15,31 |

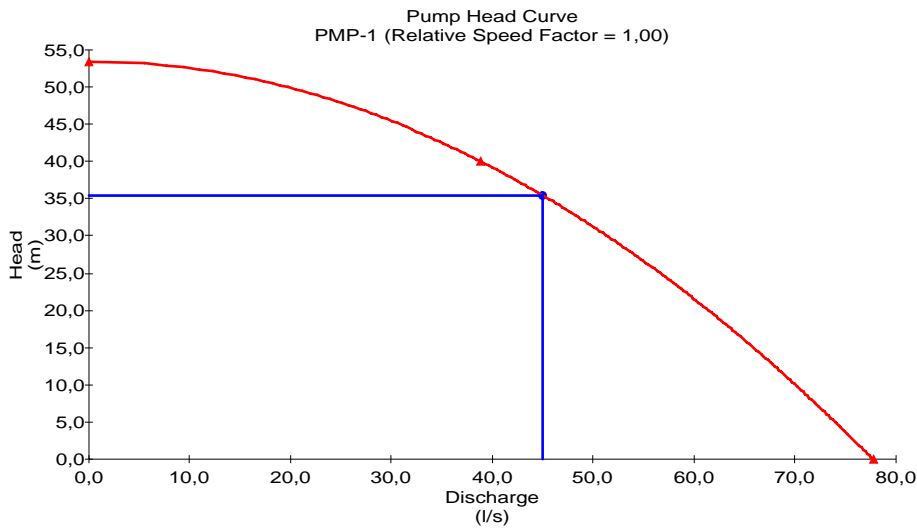


Figura 3.2 Punto de trabajo de la bomba

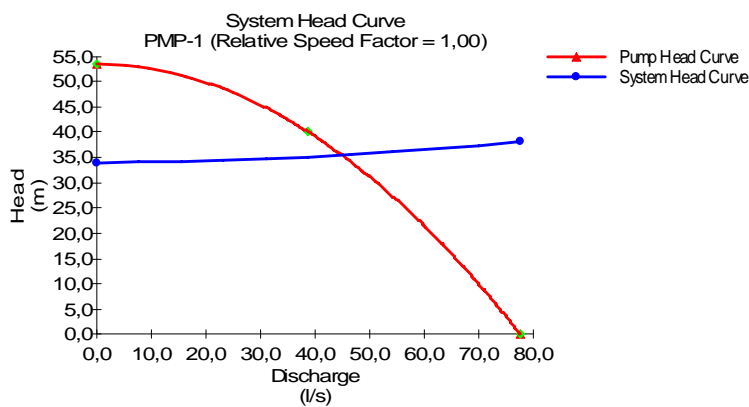


Figura 3.3 Curva característica de la bomba de agua

Tabla 3.2 Resultados de las bombas

| Etiqueta | Descarga (l/s) | Altura (m) | Potencia empleada (KW.) |
|----------|----------------|------------|-------------------------|
| PMP-1 | 45,06 | 35,43 | 30 |

En la figura 3.2 se puede observar que la bomba tiene disponible para su funcionamiento una altura de 35,43 m para un caudal de 140 m³/h, sin embargo los resultados de la simulación arrojados por el WaterCad muestra que la bomba solo utiliza 35,43 m de altura con un caudal correspondiente de 45,06 m³/h.

3.3.2 Resultados de la simulación de las válvulas

En la red hidráulica de objeto de estudio existen válvulas de regulación con el objetivo de darle paso al área docente y alrededores, los parámetros de trabajo de las mismas se exponen en la tabla 3.3.

Tabla 3.3 Resultados de las válvulas

| Etiqueta | Diámetro (mm) | Estado | Descarga (l/s) |
|----------|---------------|---------|----------------|
| PRV-1 | 152,4 | Abierta | 25.32 |
| PRV-3 | 152,4 | Abierta | 28.53 |
| PRV-7 | 152,4 | Abierta | 25.15 |

En la tabla 3.3 se muestran las descargas correspondientes a cada válvula empleada en la red hidráulica, mostrando que las mayores descargas le corresponden a las válvulas PRV-3 y PRV-1 con 28.53 y 25.32 l/s respectivamente.

3.3.3 Resultados de la simulación en las tuberías

Las tuberías en la instalación son de hierro, por lo que es de vital importancia conocer la presión fundamentalmente en las mismas, estos datos se encuentran en la tabla 3.3.

Tabla 3.4 Resultados de las tuberías

| Etiqueta | Diámetro (mm) | Material | Presión (Pa) |
|----------|---------------|----------|--------------|
| P-1 | 152,4 | hierro | 34,38 |
| P-2 | 152,4 | hierro | 30,41 |
| P-4 | 152,4 | hierro | 29,73 |
| P-6 | 152,4 | hierro | 30,62 |
| P-15 | 152,4 | hierro | 29,73 |
| P-16 | 152,4 | hierro | 30,56 |
| P-17 | 152,4 | hierro | 29,73 |
| P-18 | 152,4 | hierro | 30,57 |
| P-19 | 152,4 | hierro | 29,66 |
| P-21 | 152,4 | hierro | 30,57 |
| P-22 | 152,4 | hierro | 29,73 |
| P-23 | 152,4 | hierro | 30,57 |
| P-26 | 152,4 | hierro | 29,73 |
| P-27 | 152,4 | hierro | 30,57 |
| P-28 | 152,4 | hierro | 29,73 |
| P-29 | 152,4 | hierro | 30,57 |
| P-31 | 152,4 | hierro | 29,73 |
| P-32 | 152,4 | hierro | 30,57 |
| P-33 | 152,4 | hierro | 29,73 |
| P-34 | 152,4 | hierro | 30,57 |
| P-35 | 152,4 | hierro | 29,73 |



| | | | |
|------|-------|--------|-------|
| P-36 | 152,4 | hierro | 30,57 |
| P-38 | 152,4 | hierro | 29,66 |
| P-41 | 152,4 | hierro | 30,57 |
| P-42 | 152,4 | hierro | 29,73 |
| P-45 | 152,4 | hierro | 30,57 |
| P-46 | 152,4 | hierro | 29,73 |
| P-53 | 152,4 | hierro | 30,57 |
| P-54 | 152,4 | hierro | 29,73 |
| P-55 | 152,4 | hierro | 34,40 |
| P-56 | 152,4 | hierro | 30,41 |
| P-57 | 152,4 | hierro | 29,73 |
| P-58 | 152,4 | hierro | 30,62 |

Esta tabla muestra que la mayor presión existe en la línea de tubería P-1 y P-55 con un valor de 34,38 Pa y 34,40 Pa respectivamente, mientras que la presión más baja se encuentra en la tubería P-19 y P-38 las dos líneas con un valor de 29,66 Pa.

3.5 Datos de presión y demanda en las áreas

Tabla 3.5 Datos de presión y demanda.

| Áreas | Demanda (L/s) | Presión (K Pa) |
|----------------------------|---------------|----------------|
| Cocina-comedor | 16.78 | 27.62 |
| Trasporte | 7.80 | 5.97 |
| ATM | 4.51 | 1.99 |
| Docente | 5.81 | 3.31 |
| Faculta Met. Elec. | 5.82 | 3.33 |
| Nave Beneficio metalúrgico | 5.12 | 2.57 |
| Fac. M-G | 9.49 | 8.84 |
| Fac. Humanidades | 7.98 | 6.24 |

Las áreas de mayor demanda y presión son cocina-comedor y Facultad M-G con una demanda base de 16.78 l/s y 9.49 l/s y una presión de 27.62 KPa y 8.48 KPa y las de menor demanda y presión son ATM y Nave de Beneficio Metalúrgico con una demanda de 4.51 y 5.12 l/s y una presión de 1.99 y 2.57 KPa respectivamente.

3.5.1 Recomendaciones previas a la medición

Antes de iniciar cualquier medición es recomendable observar los siguientes puntos.

- ✓ Identificar los componentes del sistema de bombeo, tales como: la ubicación del conjunto motor-bomba, tuberías, equipos y el recipiente de succión y descarga.
- ✓ Identificar las fugas en el sistema y corregirlas (por ejemplo, en los puntos de unión en tuberías, en los empaques -goteo excesivo- o sello mecánico, en la bomba o equipos).
- ✓ Verificar la alineación del conjunto motor-bomba, o la alineación de poleas y tensión de bandas.

- ✓ Determinar mediante observaciones físicas o de acuerdo a la experiencia si la bomba está cavitando. Algunas recomendaciones para detectar la cavitación son:
 1. Ruido intenso y continuo al trabajar la bomba (parecido al de un molino de bolas).
 2. Vibración.
 3. Calentamiento de valeros y del fluido.
 4. Frecuente mantenimiento (erosión por cavitación en el impulsor).
 5. Gasto menor al de operación.

3.6 Valoración económica

Para poder confeccionar una correcta estimación económica, es necesario comprender que la evaluación final de una investigación es de primordial importancia para establecer en qué medida esta ha contribuido al desarrollo político, económico o social de un país o región. El correcto análisis de esta permite además sentar las bases para futuros trabajos que sobre la temática se desarrollen, de ahí su ineludible relación con la economía, la sociedad y el medio ambiente.

Para calcular el costo de bombeo se comenzará evaluando el costo que se emplearía para bombear el agua suavizada en el primer tramo de la instalación, por lo que para efectuar el cálculo se emplea la fórmula 3.1

$$C_{bom} = \frac{t_{el} \cdot t_t \cdot N_m}{\eta_m} \quad (3.1)$$

Dónde:

C_{bom} - costo de bombeo de la instalación; (CUC/día),

t_{el} - tarifa eléctrica; (CUC/kW.h),

t_t - tiempo de trabajo del equipo; (h/día),

η_m - rendimiento del motor eléctrico; (%),



N_m - potencia del motor; (kW).

Teniendo en cuenta que el valor de la tarifa eléctrica equivale a 0,09 CUC/kW.h, el tiempo de trabajo del equipo es de 1 hora 30 minutos diaria, el rendimiento del motor es de 78 % y la potencia del motor es de 30 kW, según la ecuación 3.1 el costo de bombeo es de 0,045 CUC/día con un gasto anual de 32.85 CUC/año.

3.8 Conclusiones del capítulo

- ✓ Se alcanzaron los parámetros primordiales para la construcción de la curva de la bomba objetivo de estudio para el sistema de agua por WaterCad V.7.
- ✓ Al concluir el análisis se expuso que el mayor consumo de agua lo poseen el local cocina-comedor y la facultad M-G, con un equivalente de 16.78 y 9.48 (l/s) respectivamente.



Conclusiones generales

A partir de los resultados obtenidos con nuestra tesis se obtiene las siguientes conclusiones:

1. Se logró obtener mediante la simulación la curva característica de la bomba del sistema de agua del ISMM a partir del software WaterCad.
2. Se determinó que la bomba del sistema de agua trabaja con un caudal de $140 \text{ m}^3/\text{h}$ y una altura de trabajo de $35,43 \text{ m}$.
3. Mediante el análisis de la red se obtuvo la demanda de las principales consumidores del área docente y alrededores, determinándose que las mayores demandas están en el área cocina-comedor con $16,78 \text{ l/s}$ y la facultad M-G con un $9,49 \text{ l/s}$.
4. Se estableció el costo de bombeo para el sistema con un importe de $0,09 \text{ CUC/día}$ con un consumo anual de 32.85 CUC/año .



Recomendaciones

- ✓ Implementar un plan de medidas relacionado con el uso racional del agua y dirigirlo a cumplir con su correcta aplicación.
- ✓ Realizar un estudio con mayores aristas sobre la red hidráulica del instituto ya que es la que nos pertenece, para lograr preservarla.
- ✓ Crear un sistema de mantenimiento que abarque como objetivo la bomba de abastecimiento, el tanque y la red en general.

Bibliografía

1. Aguirre, A. et al. *“Ingeniería Hidráulica aplicada a los sistemas de distribución de agua”*, Vol. I, eds. U. D. Mecánica de Fluidos – Universidad Politécnica de Valencia – Aguas de Valencia S.A., Valencia, España. (1996a):
2. Alberson, F. *“Reducción de las incrustaciones de magnesio mediante el tratamiento de agua cruda”*, Nicaro. pp. 7. (1955)
3. Bandala, M.: *“Pérdidas por fricción en fluidos no newtonianos”*. Tesis de Licenciatura. Universidad de las Américas, Puebla, México, 2001.
4. Bienvenido, J. *“Modelo de un sistema de bomba, tanque y red”*. Voluntad Hidráulica, No 28. (1973)
5. Charm, S. *“Fundamentals of Food Engineering”*. AVI Pub. Co. WestportConn.pp. 54-93. (1971)
6. Cherkasski, V.M. *“Bombas, Ventiladores, Compresores”*, Editorial Mir, Moscú, Rusia. (1986)
7. Columbié, O. M. *“Estudio del transporte de fuel oil desde Mazut hasta la planta de Preparación Mineral perteneciente a la empresa “Ernesto Che Guevara”*, Trabajo de diploma en opción al título de Ingeniero Mecánico. ISMMM, p.70. (2006)
8. Farrill, G. *“Recirculación del agua de enfriamiento de los tanques de Lixiviación y Lavado”*, Nicaro. (1967)
9. Gerhart, M. and Gross, J. *“Fundamentos de la Mecánica de los Fluidos”*, eds. Addison – Wesley Iberoamericana, España. (1992)
10. Gerhart, M. and Gross, J. (*“Fundamentos de la Mecánica de los Fluidos”*, Hochstein, 2 ed, eds. Addison – Wesley, USA. 1995)
11. Ibarz, A.; Vélez, J. y Barbosa, G. *“Transporte de alimentos fluidos a través de tuberías”*. Inéditos: 60 hojas. Universidad de las Américas, Puebla, México. (2001)

12. Juregui, S. y Valdés, Y. *“Evaluación de sistemas de bombeo por métodos computacionales”*. Memorias del 1er. Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. Madrid. (1993)
13. Karassik, I. y Carter, R. *“Bombas centrifugas. Selección, operación y mantenimiento”*, editorial Revolucionaria. La Habana. (1968)
14. Karelin, B. *“Fenómeno de cavitación en bombas centrifugas y axiales”*. Moscú. Construcción de Maquinarias. (1987)
15. Kasatkin, A. G. *“Operaciones básicas y aparatos en la tecnología química”*. Tomo II, Editorial educación. (1985)
16. Kuttz, M. *“Enciclopedia de la Mecánica Ingeniería y Técnica”*, Vol. 6, ed. Océano, España. (1995)
17. Labarte, G. *“Evaluación del suministro de agua suavizada en la empresa “Cmdte. René Ramos Latour”*. Trabajo de diploma en opción al título de Ingeniero Mecánico. ISMMM. (2011)
18. Macedo, R. C. *“Manual de Prácticas de Operaciones Unitarias I”*, Universidad de las Américas, Puebla. México. Inéditos. (2001)
19. Martínez y Barreto *“Diseño de un Sistema contra Incendio para una Empresa productora de Cereales”*. Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción, Guayaquil, Ecuador. (2007)
20. Martínez, L.; Monteagudo, J. y Jáuregui, S. *“Mecánica de los Fluidos y Máquinas de Flujo”*, Editorial Universo Sur, Universidad de Cienfuegos, Cuba. (2007)
21. Mastrapa, M. *“Manual de operaciones de planta tratamiento de agua”*, Nicaro. pp. 88. (2006)
22. Nekrasov, B. *“Hidráulica”*, editorial PAZ, Moscú. (1986)
23. Pérez, F. D. *“Equipos de bombeo”*, editorial Pueblo y Educación. La Habana. (1981)
24. Pérez, M. *“Introducción a la Ingeniería Hidráulica y Ambiental”*, editorial “Félix Varela”. La Habana. (2001)

25. Pérez, R. *“Equipos de bombeo”*. 3ra Edición, Tercera Reimpresión, editorial Pueblo y Educación, Ciudad de La Habana. (2000)
26. Rabinóvich, E. Z. *“Hidráulica”*, editorial MIR, Moscú. (1987)
27. Ramos, N. *“Bombas, ventiladores y compresores”*, editorial ISPJAE. La Habana. (1989)
28. Robert, W. and McDonald, A. *“Introducción a la Mecánica de Fluidos”*, Cuarta Edición, ed. McGraw Hill, Interamericana S. A., USA. (1995)
29. Santos, F. y Martín, M. *“Modelos matemáticos para la determinación aproximada de la forma de la característica de trabajo de una bomba centrífuga”*, Centro azúcar, N 1. (1999)
30. Stepanoff, A. *“Centrifugal and axial flow pumps”*, editorial, John Willey & Sons. New York. (1959)
31. Streeter, L. Victor, *“Mecánica de los fluidos”*, editorial Ciencia y Técnica, Ciudad de la Habana. (1978)
32. Streeter, V.; Benjamin, E. y Bedford, K. *“Mecánica de Fluidos”*, Novena Edición. McGraw-Hill. Best Seller International, S.A., Santa Fé de Bogotá, Colombia. (2000)
33. Talwar, M. *“Analyzing centrifugal-pump circuit”*. Chemical Engineering, vol. 90, No. 17. (1983)

Anexo 1 Ventana de edición de los elementos que conforman la red

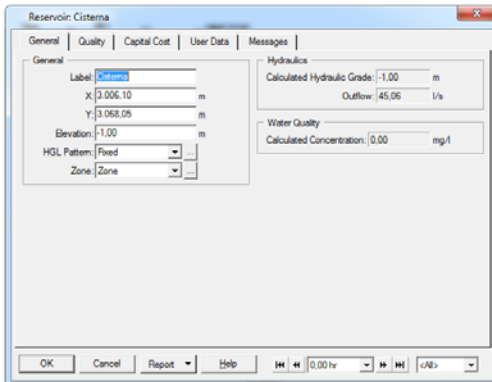


Figura 1 Ventana de edición de las propiedades de la cisterna

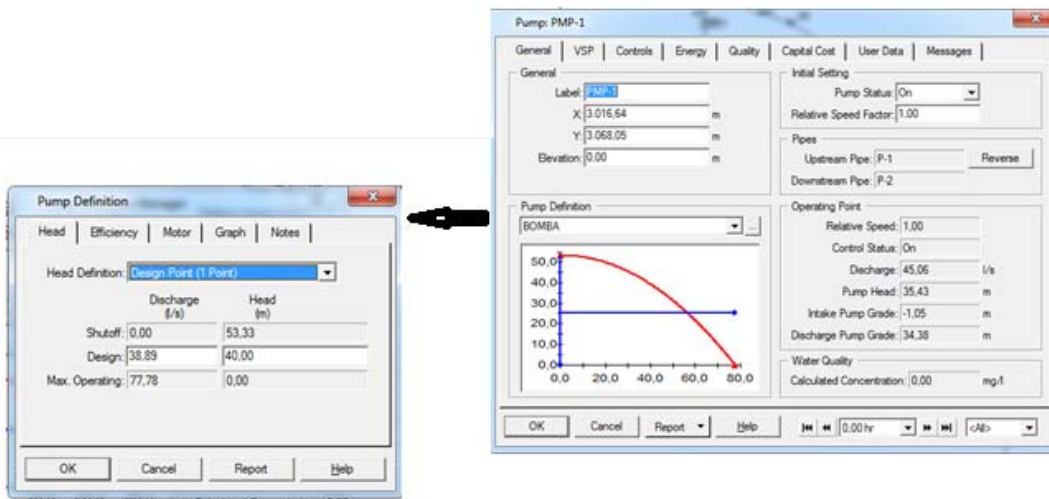


Figura 2 1 Ventana de edición de las propiedades de la bomba y definición de su curva.

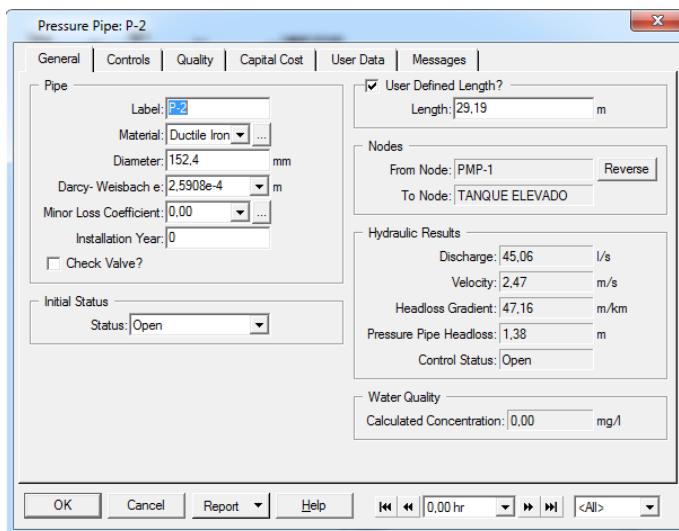


Figura 3 1 Ventana de edición de las propiedades de las tuberías

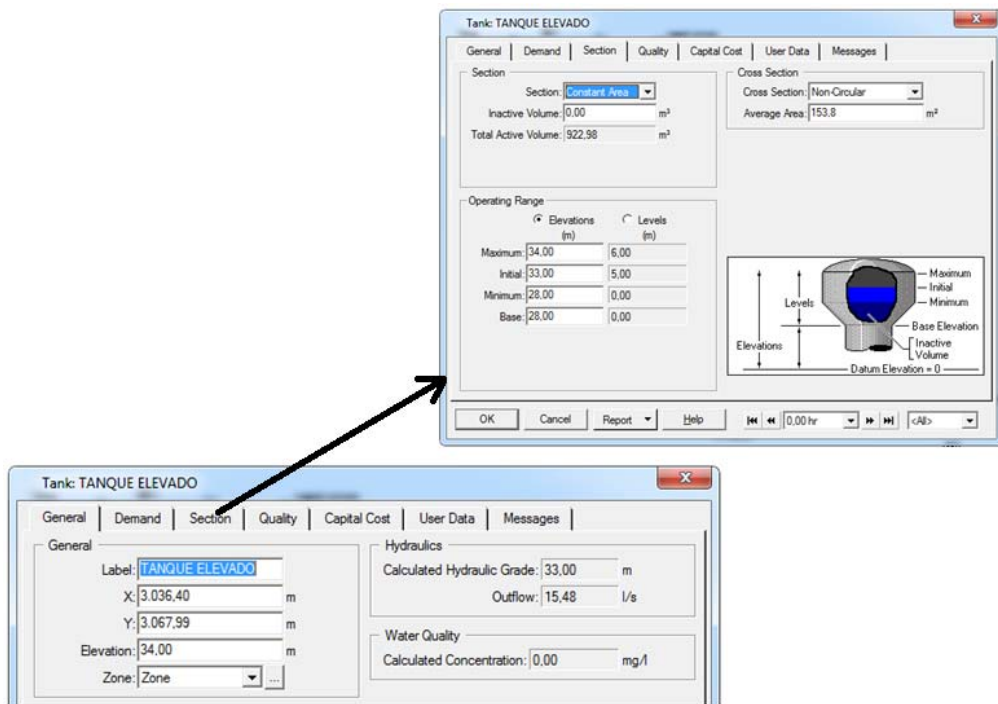


Figura 4 1 Ventana de edición de las propiedades del tanque elevado

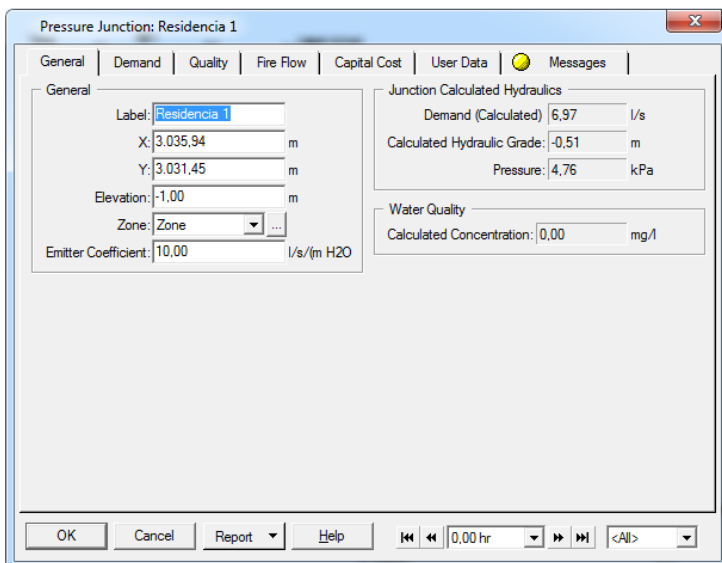


Figura 5 Ventana de edición de las propiedades de los nodos

Anexo 2

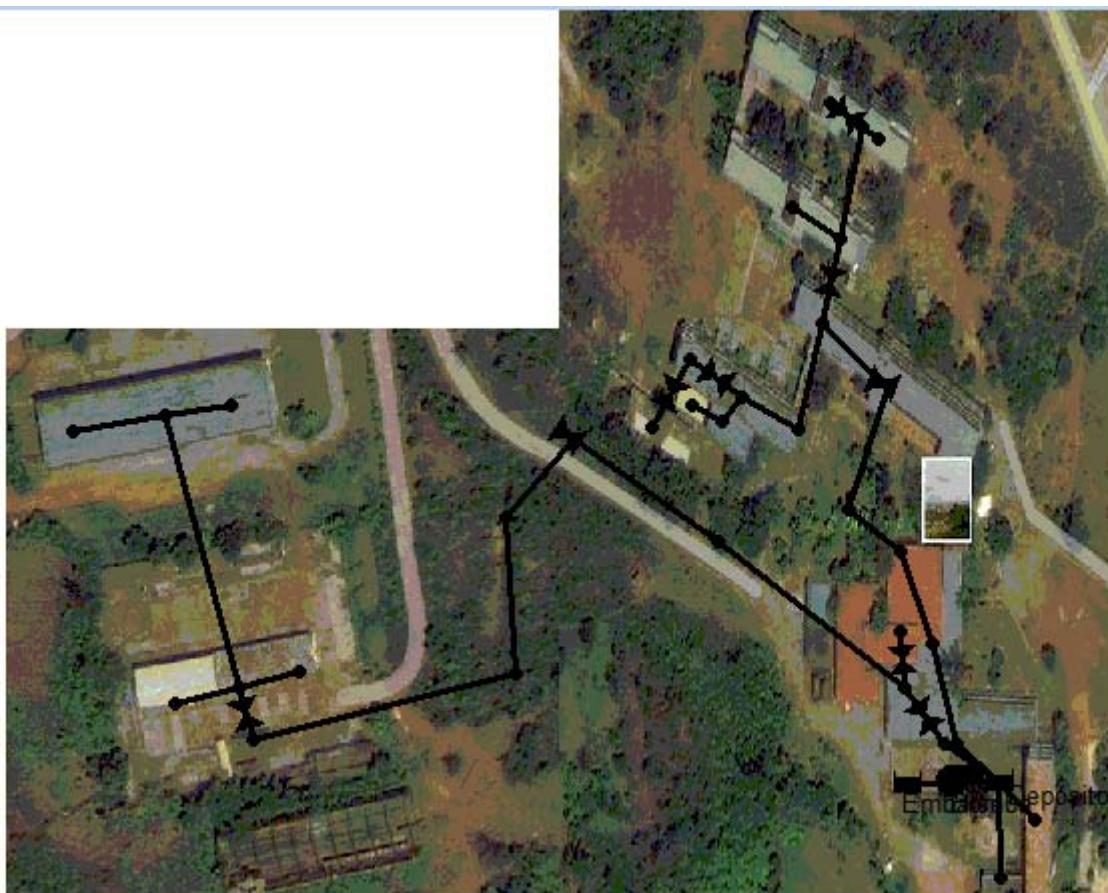


Figura 6 Trazado de la línea de tuberías de la red del área de residencia del ISMM

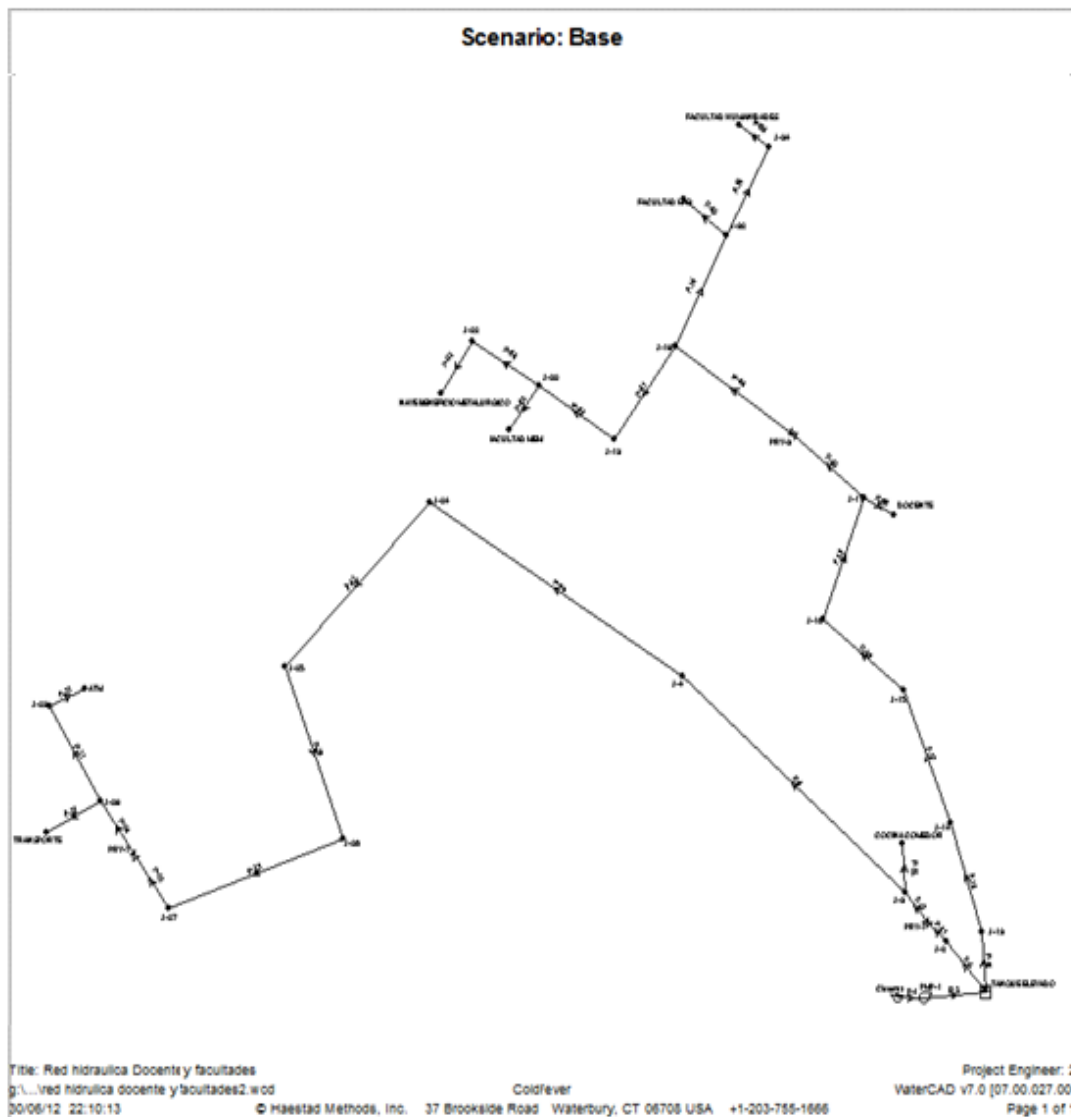


Figura 7 Trazado de la red simulada en WaterCAD V.7

Anexo 3

Anexo 4

Tabla 1 tabla reporte emitida por el software WaterCAD

| Label | Length (m) | Diameter (mm) | Material | Discharge (l/s) | Pressure Pipe Headloss (m) | Hazen-Williams C | Check Valve? | Minor Loss Coefficient | Control Status | Upstream Structure Hydraulic Grade (m) | Downstream Structure Hydraulic Grade (m) | Headloss Gradient (m/km) |
|-------|------------|---------------|--------------|-----------------|----------------------------|------------------|--------------------------|------------------------|----------------|--|--|--------------------------|
| P-1 | 1,16 | 152,4 | Ductile Iron | 45,06 | 0,05 | | <input type="checkbox"/> | 0,00 | Open | -1,00 | -1,05 | 47,16 |
| P-4 | 11,89 | 152,4 | Ductile Iron | 80,55 | 1,77 | | <input type="checkbox"/> | 0,00 | Open | 33,00 | 30,55 | 148,93 |
| P-6 | 140,00 | 152,4 | Ductile Iron | 11,88 | 0,49 | | <input type="checkbox"/> | 0,00 | Open | -0,11 | -0,60 | 3,48 |
| P-15 | 30,00 | 152,4 | Ductile Iron | 146,96 | 14,76 | | <input type="checkbox"/> | 0,00 | Open | 33,00 | 18,24 | 492,04 |
| P-16 | 40,00 | 152,4 | Ductile Iron | 104,29 | 9,95 | | <input type="checkbox"/> | 0,00 | Open | 18,24 | 8,29 | 248,75 |
| P-17 | 35,00 | 152,4 | Ductile Iron | 75,53 | 4,59 | | <input type="checkbox"/> | 0,00 | Open | 8,29 | 3,70 | 131,08 |
| P-18 | 15,00 | 152,4 | Ductile Iron | 56,31 | 1,10 | | <input type="checkbox"/> | 0,00 | Open | 3,70 | 2,60 | 73,26 |
| P-19 | 60,00 | 152,4 | Ductile Iron | 40,20 | 2,26 | | <input type="checkbox"/> | 0,00 | Open | 2,60 | 0,34 | 37,64 |
| P-21 | 53,00 | 152,4 | Ductile Iron | 0,54 | 0,00 | | <input type="checkbox"/> | 0,00 | Open | -0,58 | -0,58 | 0,01 |
| P-22 | 45,00 | 152,4 | Ductile Iron | 8,12 | 0,08 | | <input type="checkbox"/> | 0,00 | Open | -0,58 | -0,65 | 1,67 |
| P-23 | 10,00 | 152,4 | Ductile Iron | 5,82 | 0,01 | | <input type="checkbox"/> | 0,00 | Open | -0,65 | -0,66 | 0,89 |
| P-26 | 160,00 | 152,4 | Ductile Iron | 19,61 | 1,47 | | <input type="checkbox"/> | 0,00 | Open | -0,60 | -2,07 | 9,20 |
| P-27 | 70,00 | 152,4 | Ductile Iron | 33,98 | 1,89 | | <input type="checkbox"/> | 0,00 | Open | -2,07 | -3,96 | 27,04 |
| P-28 | 87,00 | 152,4 | Ductile Iron | 32,06 | 2,10 | | <input type="checkbox"/> | 0,00 | Open | -3,96 | -6,06 | 24,10 |
| P-29 | 110,00 | 152,4 | Ductile Iron | 34,50 | 3,06 | | <input type="checkbox"/> | 0,00 | Open | -6,06 | -9,12 | 27,86 |
| P-31 | 200,00 | 152,4 | Ductile Iron | 9,26 | 0,43 | | <input type="checkbox"/> | 0,00 | Open | -9,34 | -9,77 | 2,15 |
| P-32 | 30,00 | 152,4 | Ductile Iron | 7,80 | 0,05 | | <input type="checkbox"/> | 0,00 | Open | -9,34 | -9,39 | 1,55 |
| P-33 | 40,00 | 152,4 | Ductile Iron | 4,51 | 0,02 | | <input type="checkbox"/> | 0,00 | Open | -9,77 | -9,80 | 0,55 |
| P-34 | 48,00 | 152,4 | Ductile Iron | 35,57 | 1,42 | | <input type="checkbox"/> | 0,00 | Open | -0,58 | -2,00 | 29,58 |
| P-35 | 45,00 | 152,4 | Ductile Iron | 9,49 | 0,10 | | <input type="checkbox"/> | 0,00 | Open | -2,00 | -2,10 | 2,26 |
| P-36 | 56,00 | 152,4 | Ductile Iron | 16,06 | 0,35 | | <input type="checkbox"/> | 0,00 | Open | -2,00 | -2,34 | 6,24 |
| P-38 | 6,71 | 152,4 | Ductile Iron | 5,81 | 0,01 | | <input type="checkbox"/> | 0,00 | Open | 0,34 | 0,34 | 0,89 |
| P-2 | 29,19 | 152,4 | Ductile Iron | 45,06 | 1,38 | | <input type="checkbox"/> | 0,00 | Open | 34,38 | 33,00 | 47,16 |
| P-41 | 5,18 | 152,4 | Ductile Iron | 25,33 | 0,08 | | <input type="checkbox"/> | 0,00 | Open | 30,55 | 30,47 | 15,19 |
| P-42 | 6,71 | 152,4 | Ductile Iron | 25,33 | 0,10 | | <input type="checkbox"/> | 0,00 | Open | -0,00 | -0,11 | 15,19 |
| P-45 | 4,00 | 152,4 | Ductile Iron | 28,53 | 0,08 | | <input type="checkbox"/> | 0,00 | Open | 0,34 | 0,27 | 19,18 |
| P-46 | 30,00 | 152,4 | Ductile Iron | 28,53 | 0,58 | | <input type="checkbox"/> | 0,00 | Open | -0,00 | -0,58 | 19,18 |
| P-53 | 11,28 | 152,4 | Ductile Iron | 25,15 | 0,17 | | <input type="checkbox"/> | 0,00 | Open | -9,12 | -9,22 | 14,98 |
| P-54 | 11,58 | 152,4 | Ductile Iron | 25,15 | 0,17 | | <input type="checkbox"/> | 0,00 | Open | -9,22 | -9,34 | 14,98 |
| P-55 | 8,84 | 152,4 | Ductile Iron | 16,78 | 0,06 | | <input type="checkbox"/> | 0,00 | Open | -0,11 | -0,18 | 6,80 |
| P-56 | 14,94 | 152,4 | Ductile Iron | -10,36 | 0,04 | | <input type="checkbox"/> | 0,00 | Open | -0,73 | -0,65 | 2,67 |
| P-57 | 11,28 | 152,4 | Ductile Iron | -5,12 | 0,01 | | <input type="checkbox"/> | 0,00 | Open | -0,74 | -0,73 | 0,70 |
| P-58 | 7,01 | 152,4 | Ductile Iron | -7,98 | 0,01 | | <input type="checkbox"/> | 0,00 | Open | -2,36 | -2,34 | 1,62 |

Anexo 5

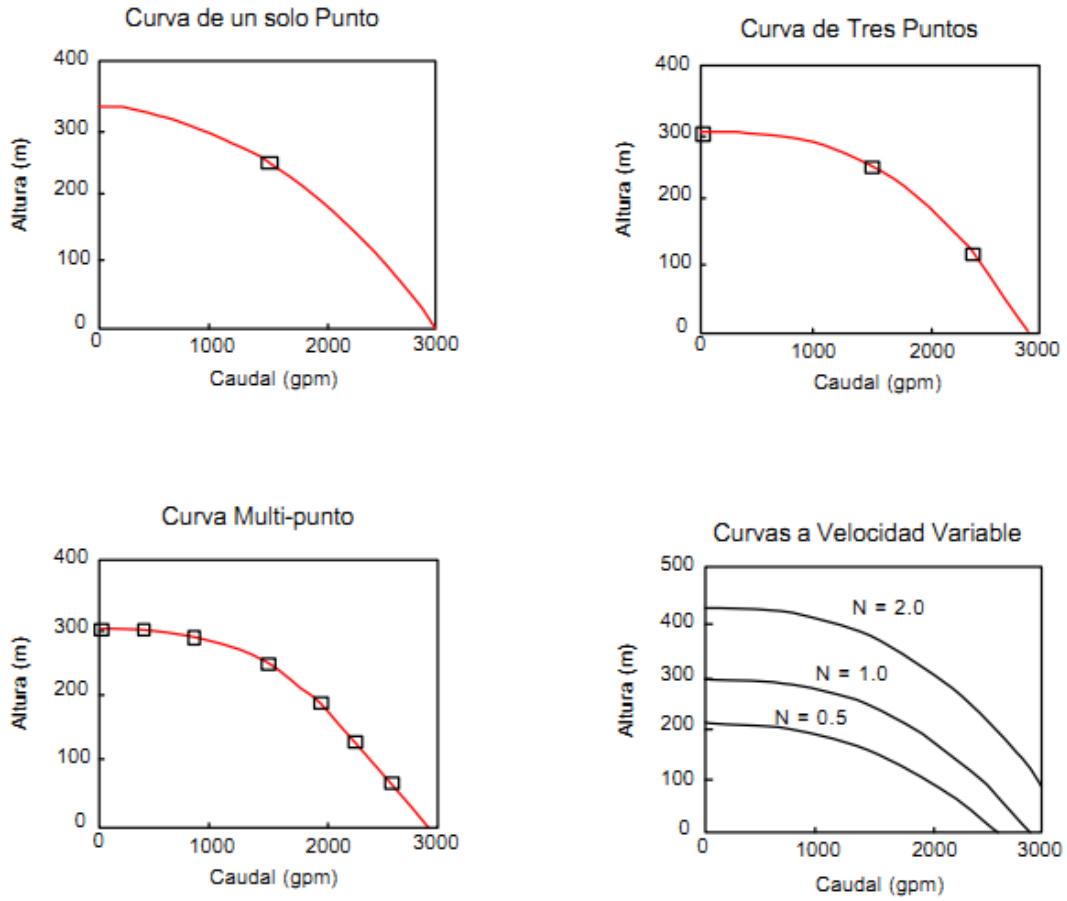


Figura 8 Curvas características de la bomba

Anexo 6

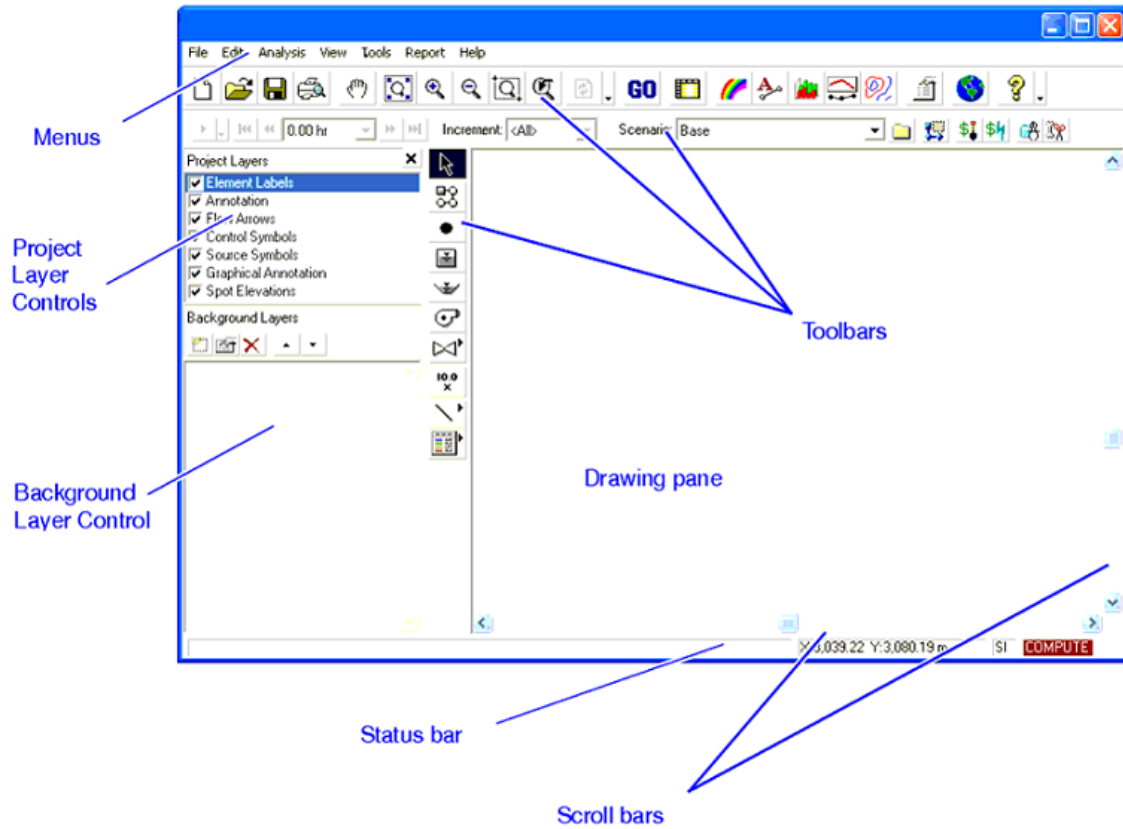


Figura 9 Entorno de trabajo del software WaterCAD