

# Título: Análisis energético de la operación de redes hidráulicas en Matlab

Autor: Isidoro Gámez Pérez  
Tutores: Dr.C. Reineris Montero Laurencio  
Ing. Liomnis Osorio Laurencio

Moa, 2015

“Año 57 de la Revolución”



**Declaración de autoridad**

Yo:

Isidoro Gámez Pérez, autor de este trabajo de diploma titulado: “**Título: Análisis energético de la operación de redes hidráulicas en Matlab.**”, certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, el cual podrá hacer uso del mismo para fines docentes y educativos.

Para que así conste firmamos el presente:

A los \_\_\_\_ días del mes de \_\_\_\_\_ del 2015.

---

Autor:

Isidoro Gámez Pérez

---

Tutor:

Dr.C Reineris Montero Laurencio.

---

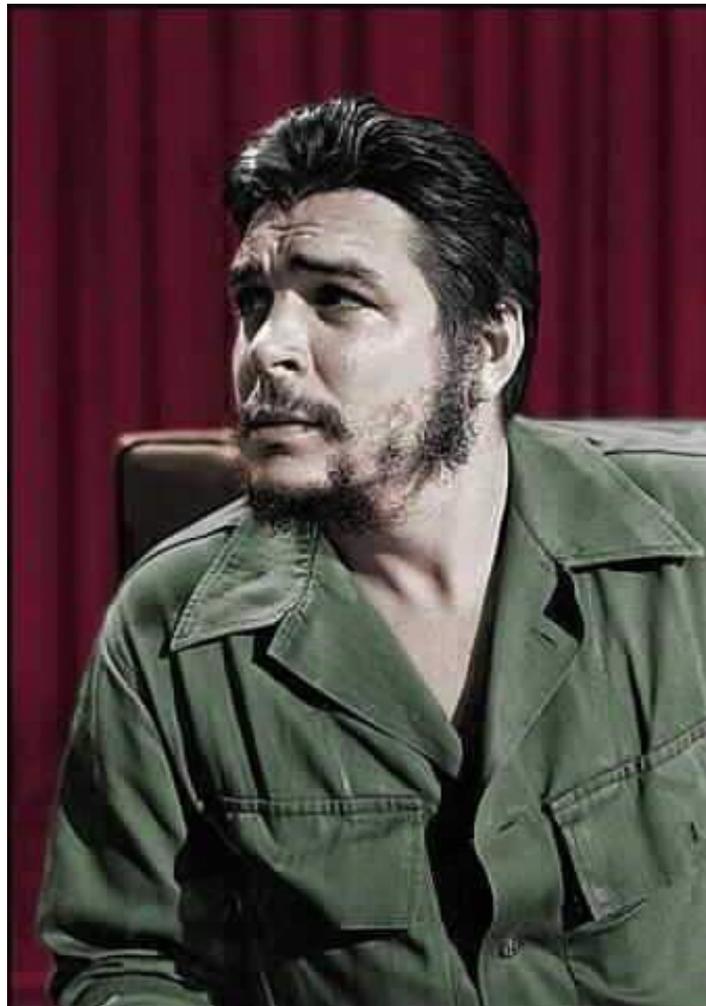
Tutor:

Ing Liomnis Osorio Laurencio.



## *PENSAMIENTO*

*“Debemos preocuparnos por prestar servicios con eficiencia y óptima calidad, y simultáneamente producir el nuevo hombre que constituye y crea la nueva sociedad socialista, que es el hombre que produce, sirve, dirige, controla y supervisa. Hace falta tener control y supervisión para prestar servicios con eficiencia...”*



*Ernesto Che Guevara*

**DEDICATORIA**

*Dedico este trabajo de diploma a todas esas personas que siempre han estado presentes, en especial:*

*A mis padres: Marelis e Isidoro que tanto me han apoyado siempre,*

*A mis hermanos Danner y David,*

*A mis amigos,*

*En especial Lianiset Columbié Lamorú (Cosi),*

*Por el gran esfuerzo que hizo para ayudarnos,*

*Y a todas esas personas que son especiales para mí y saben*

*Que siempre están presentes aunque no las mencione.*



## *AGRADECIMIENTOS*

*Deseo agradecer:*

*A mis tutores por toda su ayuda en el desarrollo de este trabajo,*

*A mis padres y a toda mi familia, que siempre me estimularon a*

*Seguir adelante con mis estudios,*

*A mis amigos de forma general,*

*Y a todas las personas que me ayudaron y aconsejaron tanto en los buenos como en los malos momentos,*

*A todos, les doy las gracias.*



## *RESUMEN*

El estudio de la eficiencia energética de las redes hidráulicas con aplicaciones informáticas constituye una vía para poder realizar correctamente la selección del conjunto bomba motor que alimentará el sistema. En este trabajo se realizó, con el uso del EPAnet-Matlab Class, un GUI en Matlab que permitió visualizar el comportamiento de la potencia que la red hidráulica le demanda a la bomba a un caudal determinado y cuando se realizaron cambios en la topología de la misma. Por los resultados obtenidos se demostró que se pueden utilizar las potencialidades de estos softwares para el análisis energético de estas redes.

Además, se logra incorporar unos drivers en Matlab a través de los cuales se puede captar la información de las redes hidráulicas diseñadas en EPANET para posteriormente aplicarle determinadas funciones ya predeterminadas y que favorecen el estudio energético de la operación de las redes hidráulicas. La conformación de una aplicación en Matlab mediante este trabajo favorece a la experimentación energética para tomar decisiones en cuanto al accionamiento utilizado así como los regímenes más racionales de operación que se puede experimentar al variar la carga hidráulica de las redes o cambiar la topología de las mismas.



*ABSTRACT*

The study of the energy efficiency of hydraulic networks applications is a way to allow for proper selection of the motor pump unit that feeds the system. This work was performed with the use of EPANET-Matlab Class, a GUI in Matlab which allowed visualize the behavior of the power hydraulic network to demand the pump at a given flow rate and when changes were made to the topology same. The results obtained showed that you can use the potential of these energy analysis software for these networks.

Furthermore, it results in Matlab incorporates drivers through which information can be captured hydraulic EPANET networks designed for specific functions and subsequently applying predetermined and promote energy study of the operation of hydraulic networks. The formation of an application in Matlab through this work favors energy experimentation to make decisions as to drive used and the most rational operating regimes that can be experienced by varying the hydraulic loading of the nets or change the topology of the same.



**Índice:**

INTRODUCCIÓN GENERAL .....	1
CAPÍTULO 1 : ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL DEL COMPORTAMIENTO ENERGÉTICO EN LA OPERACIÓN DE REDES HIDRÁULICAS.....	6
1.1. Introducción .....	6
1.2. Trabajos precedentes .....	6
1.3. Aplicaciones que se utilizan para el análisis de operación de redes hidráulicas. ....	10
1.3.1. <i>EPAnet</i> .....	10
1.3.2. <i>WaterCAD</i> .....	13
1.3.3. <i>Matlab</i> .....	15
1.3.4. <i>Software de Equilibrado hidráulico</i> .....	17
1.4. Uso de variadores de velocidad en sistemas de bombeo.....	18
1.5. Potencialidades del Matlab para su adaptación al cálculo energético de redes hidráulicas .....	21
1.6. Conclusiones del capítulo .....	23
CAPÍTULO 2 : BASES PARA EL USO DEL MATLAB EN EL ANÁLISIS ENERGÉTICO DE LAS OPERACIONES DE LAS REDES HIDRÁULICAS ....	24
2.1. Introducción .....	24
2.2. Elementos básicos para el cálculo de redes hidráulicas.....	24
2.2.1. <i>Pérdidas por fricción</i> .....	24
2.2.2. <i>Resistencia del fluido</i> .....	28
2.2.3. <i>Leyes de bombas y ventiladores</i> .....	30
2.2.4. <i>Máxima potencia al fluido</i> .....	31
2.2.5. <i>Velocidad variable</i> .....	31
2.2.6. <i>Diversidad de la carga</i> .....	32
2.3. Métodos de cálculo .....	32
2.3.1. <i>Método de redes en mallas</i> .....	33
2.3.2. <i>Método de Hardy Cross</i> .....	33
2.3.3. <i>Método del gradiente</i> .....	35
2.4. Cálculo de potencia .....	37



2.5. EPAnet como base de cálculo hidráulico acertado y su facilidad de exportación de los ficheros. ....	41
2.6. Procedimientos para la adaptación del EPAnet en el entorno Matlab. 45	
2.6.1. <i>Pasos para dejar enlazados</i> .....	46
2.7. Funciones del EPAnet-Matlab Class .....	49
2.8. Algoritmo general del GUI realizado en Matlab para evaluar el comportamiento energético de sistemas de bombeo de agua. ....	50
2.9. Conclusiones del capítulo .....	51
<b>CAPÍTULO 3 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS MISMOS .....</b>	<b>52</b>
3.1. Introducción .....	52
3.2. GUI de la aplicación.....	52
3.3. Validación de la aplicación.....	53
3.4. Simulación con EPAnet-Matlab de una red hidráulica abierta de distribución .....	56
3.4.1. <i>Presentación de la red abierta utilizada</i> .....	56
3.4.2. <i>Resultados y análisis de las simulaciones de la red abierta</i> .....	57
3.5. Simulación con EPAnet Matlab de una red hidráulica cerrada utilizada en la climatización centralizada .....	59
3.5.1. <i>Presentación de la red cerrada estudia</i> .....	60
3.5.2. <i>Resultados y análisis de las simulaciones de la red cerrada</i> .....	61
3.6. Valoración técnica y económica de la aplicación.....	62
3.7. Conclusiones del capítulo .....	63
<b>CONCLUSIONES GENERALES .....</b>	<b>64</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>65</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>lxvi</b>

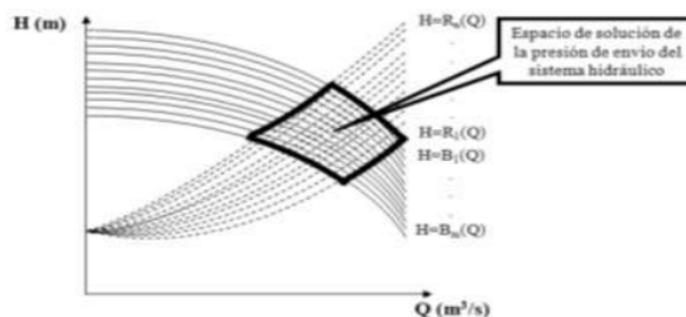


## INTRODUCCIÓN GENERAL

Unas de las medidas planteadas por la Revolución Energética en Cuba consisten en realizar mejoras tecnológicas en los diferentes sistemas de bombeo. Estas medidas están encaminadas a la sustitución de las bombas y motores por otros más eficientes, así como la reparación de las redes de distribución con la introducción de materiales que mejoran el desempeño energético de las mismas.

Resulta significativa la energía eléctrica que se consume en el trabajo de los sistemas de bombeo para agua, donde en muchas ocasiones se encuentran sobredimensionados, se manifiesta pérdidas energéticas relacionadas con el transporte y las pérdidas del fluido. En esto también juega un importante papel las características topológicas.

Para cada posible configuración topológica de una red hidráulica le corresponde una curva  $H = R_i(Q)$ ,  $i = 1, \dots, n$ , para toda la red (Figura 1).  $R_i$  expresa la relación funcional entre la altura de carga  $H$  de la red del sistema y el caudal  $Q$ , y representa de forma simplificada todas las pérdidas energéticas del fluido en los tramos de tuberías y accesorios en operación.



**Figura 1 Espacio de solución de la presión de envío del sistema hidráulico en la red.**

El valor de  $R_i$  puede variar en función de las características de la red hidráulica, esencialmente si cambia su configuración topológica. Análogamente, para cada

valor de potencia que se le suministre a la bomba, se tiene una función  $H = B_j(Q)$ ,  $j = 1, \dots, m$  que describe el valor de  $H$  según varía  $Q$ .

Como se aprecia en la Figura 1, el cambio simultáneo de las curvas de la bomba y de la red crea un espacio de soluciones del problema de encontrar cuál es la potencia eléctrica suficiente para lograr que la bomba garantice el caudal necesario  $Q_{sp}$  a la presión  $H_{sp}$  que satisfaga los requerimientos del suministro. Si se conoce el valor de la altura de carga  $H_{sp}$  (valor de presión requerido en la red hidráulica para garantizar el caudal  $Q_{sp}$ , calculado a partir del cumplimiento de los caudales necesarios en los diferentes tramos), entonces puede determinarse la potencia eléctrica que se necesita para establecer la curva de la bomba que pasa por el punto  $(Q_{sp}; H_{sp})$ . El actual criterio de asumir que la energía que se suministra a la bomba es la necesaria para garantizar una presión en correspondencia con la demanda máxima de la red, conduce a la falta de eficiencia energética.

Por su parte, La modelación hidráulica constituye el eslabón fundamental para determinar los parámetros de los accionamientos encargados de garantizar las presiones en los nodos, de tal forma que permitan mover el fluido y conseguir los caudales requeridos en las unidades terminales. El transporte del agua como fluido incomprensible posee un conjunto de regularidades en cuanto al cálculo de las pérdidas energéticas, las cuales pueden ser determinadas con la ayuda de expresiones y leyes conocidas que se resumen en: las ecuaciones de Bernoulli, las ecuaciones para determinar las pérdidas de carga, la ecuación de continuidad, la primera y segunda ley de Kirchhoff y las leyes de afinidad [1, 2]. Estas expresiones y leyes físicas que rigen el comportamiento del agua como fluido se definen en la literatura [3].

Para dar solución a la modelación hidráulica de una red los métodos de solución se pueden agrupar en dos grandes familias: los primeros, basados en las conocidas técnicas iterativas de Gauss-Seidel y Jacobi, los cuales resuelven el sistema al efectuar en cada iteración la resolución secuencial de cada una de

las ecuaciones (al emplear fundamentalmente el Método de Cross y sus derivados); y los segundos, basados en la linealización del sistema de ecuaciones, de forma que el problema original se transforme en la resolución simultánea de un sistema de ecuaciones lineales [4, 5]. Actualmente el método más difundido es el Método del Gradiente, el cual implementa un modelo para la resolución de sistemas de tuberías a presión.

El modelo está representado por un sistema de ecuaciones lineales expresadas en forma matricial y tiene como principal ventaja que evita el ensamblado de las matrices, por lo que disminuye la cantidad de procesos a realizar en comparación con otros métodos [6]. Este es un aspecto importante durante los procedimientos de optimización. Algunas ventajas del método radican en que: asegura solución única al no tener problemas de convergencia; permite expresar la topología de la red, las pérdidas de carga y la continuidad de caudales en términos de ecuaciones matriciales; emplea un modelo real de redes y no es necesario estimar una solución inicial cercana al valor real [6].

Los software que tradicionalmente se comercializan para el análisis de la operación y el diseño de las redes hidráulicas, donde se destaca el EPANet, se basan en el método del gradiente, cuyas herramientas de cálculo son las bases de otros programas relacionados con las redes hidráulicas. El EPANet, por su parte, permite realizar análisis hidráulicos de redes a partir de las características físicas de las tuberías y las dinámicas de los nodos (consumos), para obtener la presión y los caudales correspondientes. Sin embargo, no tienen la posibilidad de ir evaluando los requerimientos de potencia eléctrica que garanticen las diferentes restricciones de la red, adaptadas a diferentes variantes topológicas y que permita tomar decisiones acertadas de como explotar mejor los circuitos hidráulicos.

Basados en estos elementos, se planteó la tarea de localizar una aplicación que se pudiera adaptar a estas condiciones de análisis, encontrándose la posibilidad de utilizar una dll (dynamic-link library o biblioteca de enlace dinámico) que

permite enlazar el EPAnet con el entorno Matlab. Como se conoce el Matlab es un software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Está disponible para las plataformas Unix, Window9s y Apple Mac OS X. Entre sus prestaciones básicas se hallan: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware.

### **Situación problemática**

El desconocimiento de la evaluación de los requerimientos de potencia eléctrica por parte del EPAnet que garanticen las diferentes restricciones de las redes hidráulicas, adaptadas a diferentes variantes topológicas y que permita tomar decisiones acertadas de como explotar mejor los circuitos hidráulicos y lograr un mejor eficiente trabajo de las bombas existentes en la misma.

### **Problema**

La no implementación en el EPAnet del análisis energético de los sistemas de bombeo en redes hidráulicas.

### **Objetivo**

Desarrollar una programación en el GUI del Matlab que mediante el uso de la aplicación EPAnet-Matlab Class permita el análisis energético de los sistemas de bombeo de redes hidráulicas bajo diferentes propiedades físicas y cambios en su topología.

### **Objeto de Estudio**

Sistemas de bombeo de las redes hidráulicas

### **Campo de Acción**



Comportamiento energético bajo diferentes condiciones de operación del objeto de estudio.

### **Objetivos específicos**

1. Lograr el enlace entre los “.dll” de EPAnet y el Matlab.
2. Desarrollar una programación en el GUI del Matlab que permita utilizar las funciones del EPAnet-Matlab Class para el análisis energético de un sistema de bombeo a partir de las informaciones topológicas y los parámetros de una red hidráulica.
3. Implementar en el ambiente Matlab las pruebas experimentales que demuestren las facilidades de las funciones para el análisis energético de un sistema de bombeo en un caso de estudio.

### **Hipótesis**

Si se pudiera realizar con una programación en el ambiente Matlab que permita el análisis de la operación de los sistemas de bombeo de las redes hidráulicas, entonces se pueden aprovechar un conjunto de potencialidades de cálculo y herramientas para tomar decisiones referidas a la operación eficiente de estas instalaciones.

### **Métodos de la investigación**

1. Método histórico-lógico para la sistematización del conjunto de conocimientos y teorías relacionadas con el objeto de estudio.
2. Métodos de investigación empíricos para contribuir a la descripción y caracterización del objeto de estudio.
3. Método de análisis y síntesis para sistematizar los diferentes aspectos técnicos que caracterizan el comportamiento energético de las redes hidráulicas.

## **CAPÍTULO 1 : ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL DEL COMPORTAMIENTO ENERGÉTICO EN LA OPERACIÓN DE REDES HIDRÁULICAS.**

### **1.1. Introducción**

En este capítulo se presenta un análisis bibliográfico, donde se señalan aspectos relacionados con el consumo energético de las redes hidráulicas, se da un breve resumen de algunas de las aplicaciones que se utilizan para realizar esta operación. Se citan algunos trabajos de estudio de operaciones de redes hidráulicas. Se habla además del uso de variadores de velocidad en los sistemas de bombeo para el control de caudal en condiciones de operación a flujo variable y se hace una reseña acerca de las potencialidades del Matlab para su adaptación al cálculo de redes hidráulicas.

### **1.2. Trabajos precedentes**

Las redes de tuberías (fluidos) y conductos (aire) se diseñaban (y diseñan todavía) tradicionalmente para su operación a carga total (o caso más desfavorable). Pero con el advenimiento de bombas con variador de frecuencia (velocidad variable VSD- variable speed drive) y los ahorros energéticos que ello conlleva incluso en el tamaño de bombas y ventiladores, se requiere ahora un buen control para asegurar que todo funciona de manera estable cuando la instalación no trabaja a plena carga. Uno debería entender cómo varían las presiones en la red cuando cambia el caudal y las cargas térmicas y ello recibe el nombre de “*análisis de redes*“. Permite reducir una red compleja en una resistencia equivalente que determina la característica resistiva del sistema.

Numerosos han sido los trabajos realizados en el área del análisis energético de las redes de distribución hidráulica usando la programación. A continuación se mencionan algunos de los más significativos.



Gerard (2012) [7], perteneciente al Grupo Sistemas de Control Avanzado de la Universidad Politécnica de Catalunya en España redactó un artículo que tiene como título “*Benchmark de control y supervisión de redes de distribución de agua*” en el que se habla acerca de una aplicación desarrollada con la Toolkit EPANet-Matlab cuyo objetivo principal es facilitar el trabajo a todos los usuarios, ofreciendo un entorno gráfico donde el conocimiento de programación Matlab y de los detalles de redes de distribución de agua pasan a un segundo plano. Asimismo, ofrece muchas posibilidades tanto de desarrollo como de prueba de diferentes metodologías sobre redes complejas.

Se presentan el módulo principal, con el que se puede obtener información sobre los elementos de la red y realizar simulaciones de la misma; y un módulo extra que permite realizar diferentes estructuras de control de presión sobre uno o varios nodos de la red a través de válvulas de reducción de presión.

En este artículo se da una abarcadora explicación de las nuevas herramientas que nos brinda esta aplicación y se hace un diagrama de bloque que permite el control de la presión de los nodos, pero está dirigido en lo principal a la parte hidráulica de la red y no aborda mucho acerca del funcionamiento de las bombas en este sistema.

Moraleda *et al.* (2006) [8], pertenecientes al Centro Regional de Estudios del Agua (CREA) realizaron un estudio acerca del consumo de energía del riego Español junto con la maquinaria agrícola en la agricultura el cual titularon “*Medidas de mejoras energéticas en las instalaciones de comunidades de regantes de Castilla- La Mancha*” en el cual se utilizó un modelo de análisis de la eficiencia energética en estaciones de bombeo (MAEEB) desarrollado por el doctor ingeniero agrónomo Miguel Ángel Moreno , creado en Matlab y además se desarrolló el modelo hidráulico de la red en EPANet para determinar la altura en cabecera necesaria.

Esta aplicación en, el caso de las estaciones de bombeo, ha permitido conocer el rendimiento de las mismas bajo las condiciones de manejo llevadas a cabo por las Comunidades de Regantes y proponer como mejoras otros tipos de regulaciones en la secuencia de activación de las bombas con las que se pueden conseguir rendimientos más elevados y, por lo tanto una mayor eficiencia energética. Los objetivos logrados en este estudio son muy relevantes pero si se hubiera utilizado la herramienta que facilitó la Environmental Protection Agency (EPA) se cree que se hubiera logrado un análisis más profundo con el objetivo de lograr un trabajo mucho más eficiente de las bombas hidráulicas.

Fernández (2003), [9], realizó una asesoría técnica nombrada "*Uso del software Epanet 2.0 para el diseño de redes hidráulicas*" en la cual se da una abarcadora explicación acerca del uso del Epanet 2.0 en el diseño de redes de distribución de agua, además de abordar acerca de la metodología de cálculo de la hidráulica aplicada a los sistemas de tuberías haciendo énfasis en las propiedades físicas de los fluidos, el flujo de estos por las tuberías, las pérdidas en la red hidráulica y el funcionamiento de la bomba centrífugas. Además propone varios ejercicios prácticos del tipo de cálculo y de simulación hidráulica.

Pardo *et al.* (2012), perteneciente al Grupo de Investigación en Ingeniería Hidráulica y Ambiental del Departamento de Ingeniería de la Construcción de Obras Públicas e Infraestructura Urbana de la Universidad de Alicante presentaron un artículo referente al uso de la programación usando la caja de herramientas (Toolkit de Epanet) que facilitó la Environmental Protection Agency (EPA) que permite la simulación hidráulica de una red desde un entorno de programación cualquiera (C/C++, Visual Basic, Matlab, etc.). En dicho artículo llamado "Iniciación a la programación de un software de simulación hidráulica" se hizo una descripción de las características de esta caja de herramientas, de manera que se logró la creación de un manual orientado a estudiantes, investigadores y profesionales de la industria del agua[10].



Este artículo resulto ser el punto de partida para la realización de este proyecto de tesis ya que la Toolkit de la que se habla en este, nos brinda la facilidad de lograr un enlace entre el Epanet y el Matlab, este último utilizado como herramienta de trabajo en la carrera de Ingeniería Eléctrica en el Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa (ISMM).

Benitez (2002), propone una metodología para el análisis de variadores de velocidad en sistemas de bombeo, pero solo se relacionan las interacciones entre las características de la bomba, la red y el motor de inducción [11]. A partir de las ecuaciones de proporcionalidad y las ecuaciones del motor de inducción se establecen leyes de afinidad para el análisis de sistemas de carga estática. A pesar de que se evalúa el comportamiento energético del accionamiento, no se ha aplicado la metodología al caso de las cargas variables.

García (2006) [12], realizo un proyecto de fin de carrera nombrado "Modelación y Simulación de Redes Hidráulicas a presión, mediante herramientas informáticas" en el cual se utilizó el EPAnet como software principal y que tenía como objetivos:

- El aprendizaje y dominio en el análisis, diseño y comprobación de redes hidráulicas a presión.
- El diseño y optimización en periodo extendido de la estación de bombeo de una red ficticia de abastecimiento.
- La optimización de la infraestructura y régimen de explotación de una red de regadíos real.

Demetrio (2014) [13, 14]., del centro de investigación KIOS crearon una aplicación llamada "*EPAnet-Matlab Class*" la cual es de código abierto que funciona en el entorno Matlab, el cual proporciona una interfaz de programación en este para la última versión de EPANET. Es una aplicación de modelación de redes hidráulicas y de calidad del agua creado por la EPA en EEUU, con el

Matlab, que está catalogado como un software de computación técnica de alto nivel. El objetivo de la Clase de Matlab es servir como un marco de programación común para la investigación y el desarrollo en el creciente campo de las redes de agua inteligentes. La Clase EPANET - Matlab ofrece comandos fáciles de usar para visualizar, modificar, simular y realizar la extrapolación de los resultados producidos por las bibliotecas del EPANET

En las revisiones de los trabajos anteriores se evidencia que el tema del análisis de redes hidráulicas desde el punto de vista energético es muy actual y es preocupación de múltiples investigadores, los que centran su atención en buscar la manera más eficiente de reducir las pérdidas en estos sistemas.

La tendencia actual, es a estructurar mejores sistemas para el modelado y el análisis operacional dado que la escasez tanto de los recursos energéticos como del agua obliga a buscar variantes de análisis más sofisticadas para la toma de decisiones en la operación de estos sistemas, sin tener que implementarlo de forma práctica.

### **1.3. Aplicaciones que se utilizan para el análisis de operación de redes hidráulicas.**

Las principales aplicaciones informáticas que se utilizan para el análisis de las redes hidráulicas son muy efectivas a la hora de realizar las tareas para las que fueron diseñadas, algunas de las más usadas son las que se mencionan a continuación:

#### **1.3.1. EPAnet**

EPAnet es un programa de ordenador que realiza simulaciones en periodos prolongados del comportamiento hidráulico en redes de suministro a presión. Una red puede estar constituida por tuberías, nodos (uniones entre tuberías), bombas, válvulas y depósitos de almacenamiento o embalses. Efectúa un seguimiento de la evolución de los caudales en las tuberías, las presiones en los nodos, los niveles en los depósitos, y la concentración de las especies

químicas presentes en el agua, a lo largo del periodo de simulación y discretizado en múltiples intervalos de tiempo [4].

El programa proporciona un entorno integrado bajo Windows, para la edición de los datos de entrada a la red, la realización de simulaciones hidráulicas y la visualización de resultados en una amplia variedad de formatos. Entre éstos se incluyen mapas de la red codificados por colores, tablas numéricas, gráficas de evolución y mapas de isolíneas [4].

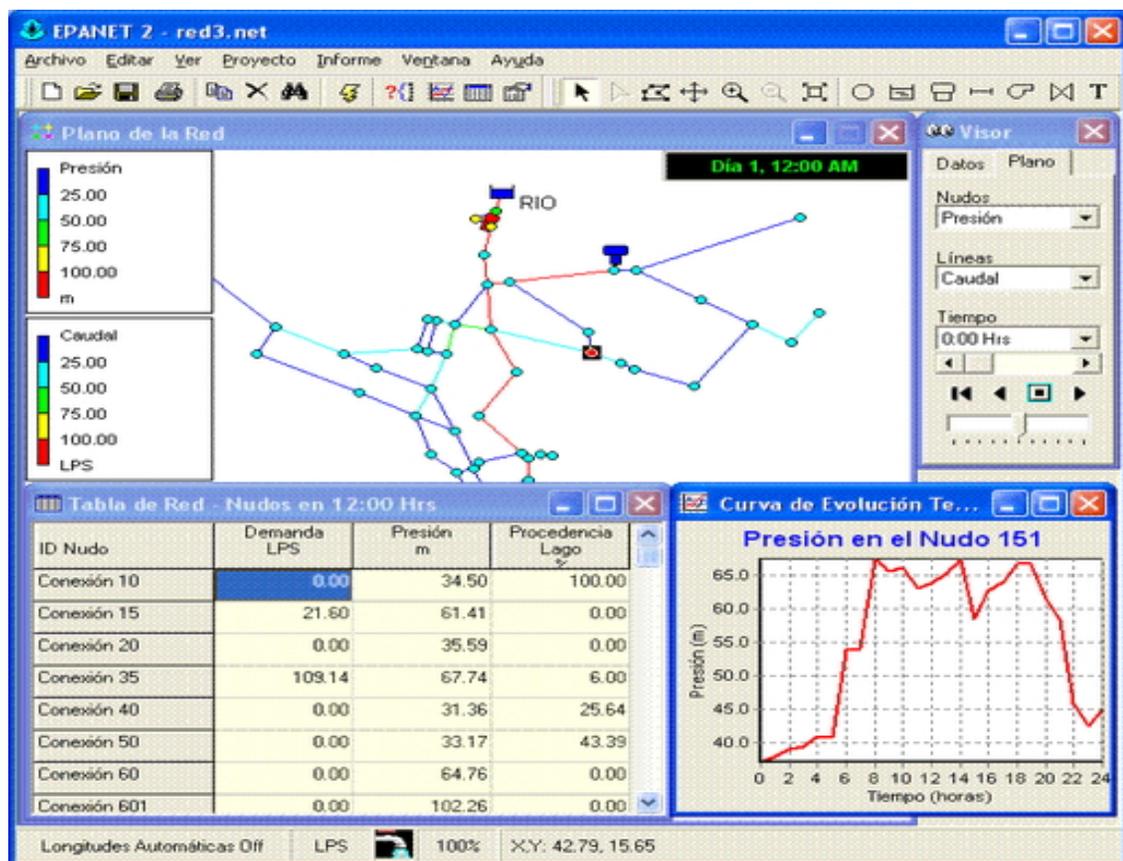


Figura 1.1 Interfaz gráfica del EPANet.

El éxito de EPANet radica en su potente simulador hidráulico que ofrece las siguientes prestaciones:

- No existe límite en cuanto al tamaño de la red que puede procesarse.

- 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 considerar 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 varíe con el nivel).
- Considera diferentes tipos de demanda en los nodos, cada uno con su propia curva de modulación en el tiempo.
- Permite modelar tomas 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 [15].

Este software es un simulador dinámico en período extendido para redes hidráulicas a presión compuesto principalmente por un módulo de análisis hidráulico que permite simular el comportamiento dinámico de la red bajo determinadas leyes de operación. Admite tuberías (tres opciones para el cálculo de las pérdidas), bombas de velocidad fija y variable, válvulas de estrangulación, reductoras, sostenedoras, controladoras de caudal, rotura de carga, depósitos de nivel fijo o variables, leyes de control temporales o por consignas de presión o nivel, curvas de modulación, etc.

EPAnet permite calcular:

- El caudal que circula por cada una de las conducciones,
- La presión en cada uno de los nodos,
- El nivel de agua en cada tanque,

- La concentración de diferentes componentes químicos a través de la red,
- El tiempo de permanencia del agua en las tuberías,
- La procedencia del agua en cada punto de la red.

EPAnet también puede tener en cuenta el consumo de energía y el coste de la bomba. A cada bomba se le puede asignar una curva de eficiencia y una lista de precios de energía. Si no es suministrado entonces se usarán unas condiciones energéticas generales que son el rendimiento, precio de la energía, patrón de precio y demanda de carga.

### 1.3.2. WaterCAD

BentleyWaterCAD es un software comercial de análisis, modelación y gestión de redes a presión (sistemas de distribución o de riego), propiedad de la Empresa de SoftwareBentleySystems Incorporated que produce soluciones para el diseño, construcción y operación de infraestructuras en diversos campos.

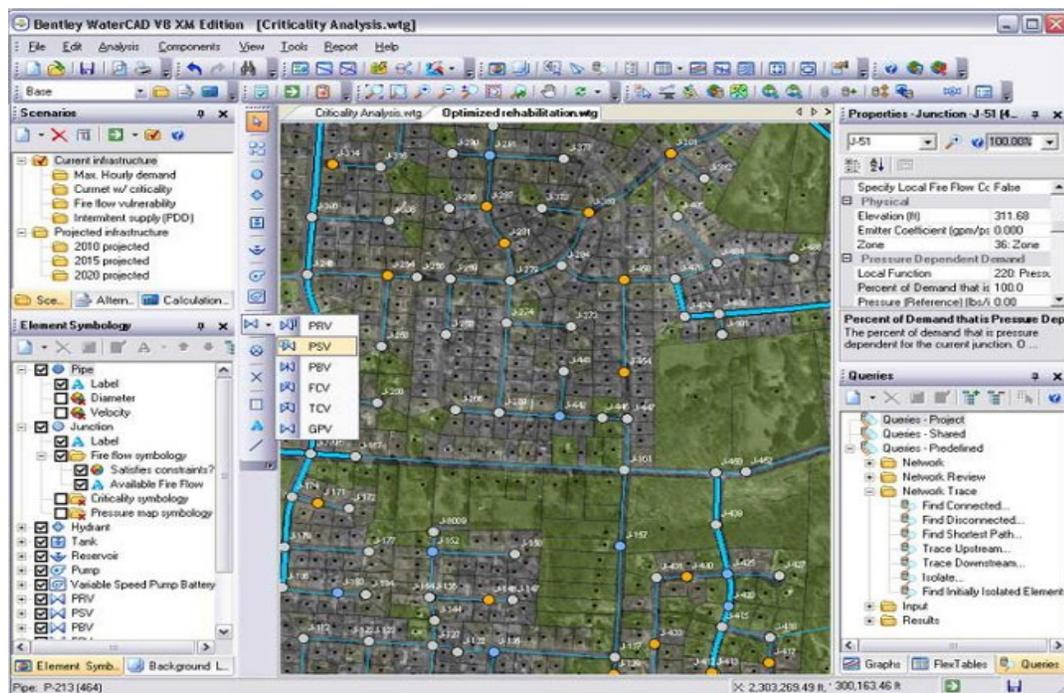


Figura 1.2 Interfaz gráfica del WaterCAD.



WaterCAD permite la simulación hidráulica de un modelo computacional representado en este caso por elementos tipo: Línea (tramos de tuberías), Punto (Nodos de Consumo, Tanques, Reservorios, Hidrantes) e Híbridos (Bombas, Válvulas de Control, Regulación, etc).

El software cuyo algoritmo de cálculo se basa en el método del Gradiente Hidráulico, permite el análisis hidráulico de redes de agua (aunque puede usarse para cualquier fluido newtoniano) determinando las presiones en diversos puntos del sistema, así como los caudales, velocidades, pérdidas en las líneas que conforman la red hidráulica; así como otros muchos parámetros operativos derivados de los elementos presentes en el sistema como: Bombas, Válvulas de Control, Tanques, etc. a partir de las características físicas del sistema y unas condiciones de demanda previamente establecidas.

WaterCAD. Además permite extender sus capacidades a temas de gestión a largo plazo de sistemas de abastecimiento incluyendo: análisis de vulnerabilidad, análisis de protección contra incendio, estimación de costos energéticos, calibración hidráulica, optimización, etc. [16]

Este software consta con varios Tipos de Cálculo y Módulos Complementarios que le permiten al usuario una mejor interacción con el mismo como son:

Tipos de cálculo (Régimen Permanente):

- Análisis Hidráulico en Periodo Estático (también Conocido como Análisis SteadyState o SS por su Siglas en Inglés)
- Análisis Hidráulico en Periodo Extendido o Cuasi-Estático (también Conocido como Análisis EPS por su Siglas en Inglés)
- Análisis de Costos de Energía (Determinación de la Energía Consumida y Costos en las Estaciones de Bombeo)
- Análisis de Segmentos Críticos o de Vulnerabilidad del Sistema ante cortes de servicio (Criticality Analysis)
- Análisis y Proyección de Roturas de Tuberías (Pipe Break Analysis)
- Centro de Control de Demandas (Demand Control Center)

- Asignación Automática de Elevaciones a partir de Modelos Digitales de Terreno (Trex)
- Asignación Automática de Demandas basada en Análisis Espacial (LoadBuilder)

Existen además otros módulos que se pueden adquirir separadamente para complementar la funcionalidad de WaterCAD, entre ellos se encuentra

- Optimización Energética para Programación de Ciclos de Bombeos basado en Algoritmos Genéticos

Adicional a los módulos anteriores, el usuario puede personalizar el Software WaterCAD a través de la utilidad WaterObjects, que a través de aplicaciones y rutinas tipo VBA permite adicionar nuevas herramientas de cálculo y de visualización de resultados, extendiendo y personalizando las capacidades del software a proyectos o usos específicos[16].

### **1.3.3. Matlab**

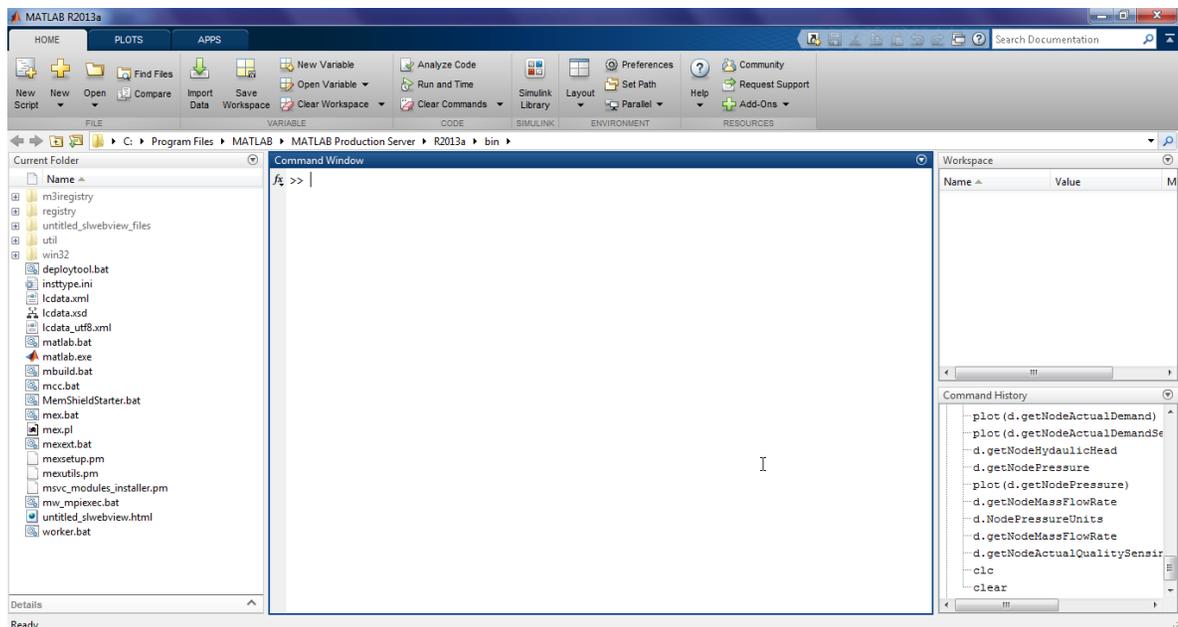
Matlab (abreviatura de MATrixLABoratory, "laboratorio de matrices") es un software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Está disponible para las plataformas Unix, Windows y Apple Mac OS X.

Entre sus prestaciones básicas se hallan: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware. El paquete Matlab dispone de dos herramientas adicionales que expanden sus prestaciones, a saber, Simulink (plataforma de simulación multidominio) y GUI (editor de interfaces de usuario - GUI). Además, se pueden ampliar las capacidades de Matlab con las cajas de herramientas y las de Simulink con los paquetes de bloques (blocksets), en la

cual se encuentra un paquete de bloques destinado específicamente para la simulación de redes hidráulicas.

El lenguaje de Matlab soporta las operaciones vectoriales y matriciales que son fundamentales para problemas en ingeniería y científicos. Esto permite un desarrollo y ejecución rápida. Permite programar y desarrollar algoritmos más rápidamente que con los lenguajes de programación tradicionales porque no necesita desarrollar tareas administrativas de bajo nivel, como declarar variables, especificar tipos de datos y reservar memoria. Como un resultado, en una línea de código Matlab puede ser remplazado diversas líneas de código C o C++[17].

Es un software muy usado en universidades y centros de investigación y desarrollo como por ejemplo el Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. En los últimos años ha aumentado el número de prestaciones, como la de programar directamente procesadores digitales de señal o crear código VHDL.



**Figura 1.3** Interfaz gráfica del Matlab.



Recientemente se ha proporcionado una herramienta adicional llamada Matlab Builder bajo la sección de herramientas "Application Deployment" para utilizar funciones Matlab como archivos de biblioteca que pueden ser usados con ambientes de construcción de aplicación .NET o Java. Pero la desventaja es que el computador donde la aplicación tiene que ser utilizada necesita MCR (Matlab Component Runtime) para que los archivos Matlab funcionen correctamente. MCR se puede distribuir libremente con los archivos de biblioteca generados por el compilador Matlab.

#### **1.3.4. Software de Equilibrado hidráulico**

Los problemas de equilibrado se deben a que no se obtienen los caudales que se proyectaron. Sólo si se obtienen los caudales nominales, el sistema de control puede actuar eficazmente. La única manera de conseguirlos es equilibrando la instalación, mediante válvulas juiciosamente repartidas en la red hidráulica [18-20]. Si la instalación por no estar equilibrada, no puede producir o distribuir la potencia para la cual fue diseñada, entonces no será rentable la inversión. Con una inversión del 1% del costo de la instalación, el equilibrado permite distribuir y emitir la potencia máxima instalada [19].

Las herramientas necesarias para realizar el equilibrado de las redes son: las válvulas de equilibrado, un instrumento de medida y un procedimiento de equilibrado. Las válvulas de equilibrado tienen como objetivo ofrecer la mayor precisión en los caudales y en consecuencia contribuir a la optimización del funcionamiento del sistema de control y de los consumos energéticos. En el anexo 4 se aprecian figuras y características relacionadas con las válvulas de equilibrado del objeto de estudio, los demás detalles se pueden encontrar en la literatura [19].

A pesar de que las válvulas que más se utilizan en las redes de distribución son las válvulas de equilibrado, no se pueden dejar de mencionar las válvulas de control que se usan a la entrada de las unidades terminales.

Las válvulas de control comúnmente utilizadas en los sistemas a caudal variable son las motorizadas de operación on-off [21], sin embargo, pueden ser de acción modulante cuando se exige una regulación muy precisa de la temperatura de las redes.

En la actualidad se cuenta con programas informáticos que resuelven esta problemática como es la aplicación informática CAD (ColdWater), el TA Select, HVAC Toolbox etc, [4, 5, 16], y se utilizan en el cálculo hidráulico para simular diferentes estados que se producen en la red de distribución de agua, sin tener que experimentar físicamente [5, 22].

#### **1.4. Uso de variadores de velocidad en sistemas de bombeo**

A medida que la electrónica avanza y la generación de energía es cada vez más costosa, se torna rentable y necesario hacer cada vez más eficientes los procesos de producción, éste es el caso de aquellos procesos que involucren bombas y que haciendo uso de los controles de frecuencia (variadores) pueden ser más eficientes y por lo tanto ahorrar energía.

Los variadores de velocidad empleados en el sistema de bombeo basan su principio general de funcionamiento en la velocidad de sincronismo ( $\text{min}^{-1}$ ) de un motor asincrónico. Esta velocidad depende del número de polo ( $p$ ) y de la frecuencia ( $f$ ) de su alimentación. Dicha magnitud se relaciona por la expresión:

$$n_s = \frac{120f}{p} \quad (1.1)$$

Cambiar la frecuencia ( $f$ ) significa cambiar la velocidad ( $n_s$ ) de sincronismo de un motor dado. Sin embargo, cambiar la frecuencia sin modificar la tensión de alimentación modifica la densidad del flujo magnético en el motor. Por eso los moduladores hacen variar simultáneamente tensión y frecuencia de salida, lo cual permite optimizar la curva de par del motor y evitar su calentamiento[23].

Los sistemas de velocidad variables se pueden aplicar en aquellos sistemas en donde se requiere regular el flujo a diferentes cargas.

Los organismos operadores de agua potable tienen un gran potencial de ahorro de energía mediante la aplicación de velocidad variable a sus sistemas de bombeo directo a la línea, ya que éste es el caso donde la carga es variable.

La utilización de variadores de velocidad en el control del caudal en comparación con la estrangulación provoca un importante ahorro de energía eléctrica. La carga de este tipo de mecanismos es proporcional, aproximadamente, al cuadrado de la velocidad. Al reducir la velocidad para disminuir el caudal, se provoca una sustancial disminución de la carga que trae como consecuencia una menor circulación de corriente tanto por el rotor como por el estator, con la consecuente disminución de las pérdidas de cobre.

En las condiciones de operación a caudal variable son predominantes las pérdidas en el acero, pudiendo aumentarse la eficiencia con la reducción de las mismas. Esta opción existe en muchos variadores de velocidad industriales los cuales utilizan una ley de mando en que la tensión es proporcional al cuadrado de la frecuencia. Esta ley garantiza menores pérdidas que la conocida tensión/frecuencia constante. Al disminuir la velocidad disminuye apreciablemente el momento o par resistivo de la carga y, por tanto, la corriente que solicita el motor [24].

#### **1.4.1. Procedimiento de Evaluación**

Sobre la base de que las redes de distribución de agua trabajan con caudal variable y se aplica estrangulación o recirculación como control de flujo, se procede a realizar los siguientes pasos para evaluar esta medida de ahorro:

- a) Determinar el tipo de regulación de caudal.
- b) Determinar las Condiciones de Operación Promedio. Es importante evaluar el tiempo de operación a diferentes caudales, cargas y potencias con el fin

de determinar para un período de operación típica, cuáles serían los ahorros totales a obtener y así evaluar la operación de la bomba con variación de velocidad.

- c) Aplicar las Leyes de Semejanza o Afinidad. Inicialmente se aplican las leyes de semejanza o afinidad para determinar la nueva carga de operación. Para aplicarlas, se deben conocer tres de las cuatro variables.

Mediante estas variables y las relaciones de semejanza se determinan:

- La nueva carga de operación (H2).

$$H_2 = H_1 / \left( \frac{Q_1}{Q_2} \right)^2 \quad (1.2)$$

- La velocidad de la bomba (N2).

$$N_2 = N_1 / \left( \frac{Q_1}{Q_2} \right) \quad (1.3)$$

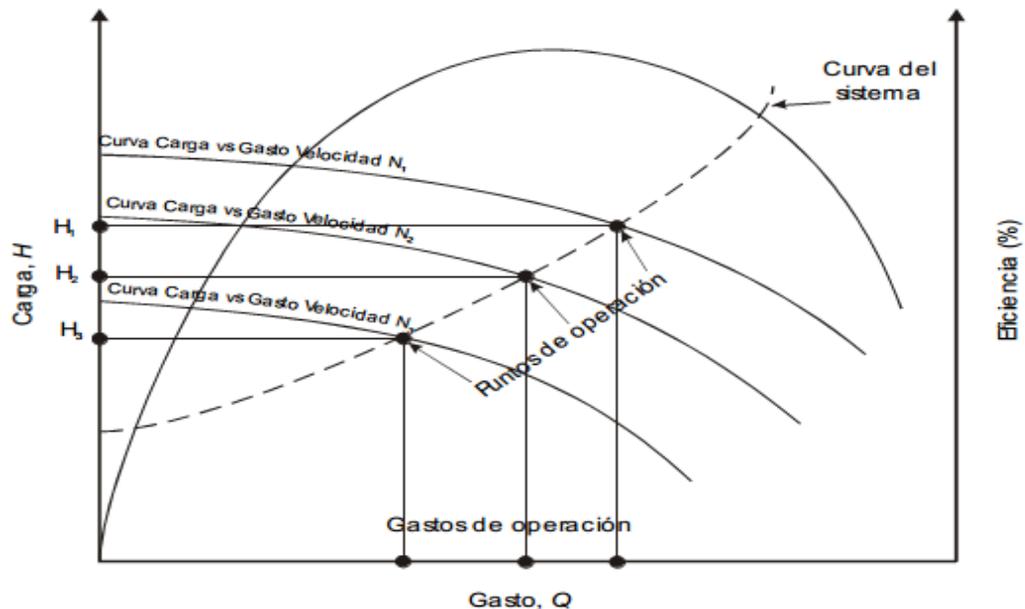
- La potencia en la flecha (BHP2). La potencia en la flecha actual (BHP1) se determina con la ecuación presentada en la Sección anterior; posteriormente se aplican las leyes de semejanza:

$$BHP_2 = BHP_1 / \left( \frac{Q_1}{Q_2} \right)^3 \quad (1.4)$$

Mediante el convertidor de frecuencia pueden cambiar las revoluciones por minuto del impulsor (RPM), entregando mayor o menor capacidad de caudal, dependiendo de las necesidades requeridas por el proceso. Lo mejor de esta aplicación es la reducción de las pérdidas por fricción y en consecuencia, el ahorro de energía resultante (Figura 1.4). Determinar la potencia requerida por el conjunto bomba-motor con la nueva velocidad de operación.

- d) Calcular el ahorro económico.

- e) Realizar la evaluación económica de la medida de ahorro, es decir, determinar el tiempo de recuperación, valor presente neto y tasa interna de retorno[24].



**Figura 1.4 Cambio de caudal mediante la variación de velocidad.**

### 1.5. Potencialidades del Matlab para su adaptación al cálculo energético de redes hidráulicas

Matlab integra análisis numérico, cálculo matricial, proceso de señal y visualización gráfica en un entorno completo donde los problemas y sus soluciones son expresados del mismo modo en que se escribirían tradicionalmente, sin necesidad de hacer uso de la programación tradicional. Es un sistema de trabajo interactivo cuyo elemento básico de trabajo son las matrices. El programa permite realizar de un modo rápido la resolución numérica de problemas en un tiempo mucho menor que si se quisiesen resolver estos mismos problemas con lenguajes de programación tradicionales como pueden ser los lenguajes Fortran, Basic o C.

Matlab dispone también en la actualidad de un amplio abanico de programas de apoyo especializado, denominado Toolboxes, que extienden significativamente

el número de funciones incorporadas en el programa principal. Estos toolboxes cubren en la actualidad prácticamente casi todas las áreas principales en el mundo de la ingeniería y la simulación, destacando entre ellos el 'toolbox' de proceso de imágenes, señal, control robusto, estadística, análisis financiero, matemáticas simbólicas, redes neurales, lógica difusa, identificación de sistemas, simulación de sistemas dinámicos y la toolbox de EPAnet-Matlab que es la que se utilizará mayormente en este trabajo.

Además también se dispone del programa Simulink que es un entorno gráfico interactivo con el que se puede analizar, modelar y simular la dinámica de sistemas no lineales.

La construcción y desarrollo de aplicaciones utilizando la Matlab C MathLibrary es un proceso de amplias perspectivas una vez se tiene un dominio adecuado de su operativa. El producto está dividido en dos categorías (como librerías objeto): la librería (built-in library) contiene versiones de las funciones de Matlab en lenguaje C del tipo numérico, lógico y utilidades. Por otra parte la librería de la caja de herramientas (toolbox library) contiene versiones compiladas de la mayoría de ficheros M de Matlab para cálculo numérico, análisis de datos y funciones de acceso a ficheros y matrices [25].

La herramienta Simulink, contiene un conjunto de diagramas de bloques para la modelación y análisis de sistemas dinámicos de TheMathWorks, entre ellos se encuentran modelos de tuberías, válvulas, turbinas los cuales hacen posible una modelación dinámica de las redes hidráulicas. Gracias a la Toolbox proporcionada por la EPA, el Matlab es capaz de realizar más eficientemente en el análisis de las redes hidráulicas usando el lenguaje de programación C, a su vez consta en el Simulink, con un conjunto de herramientas que facilitan la representación gráfica de los sistemas hidráulicos donde se pueden observar más físicamente los componentes principales de la configuración de estas redes.

## 1.6. Conclusiones del capítulo

Existen numerosos software que se utilizan para el análisis para el análisis de operación de redes hidráulicas los cuales poseen poderosas herramientas para el estudio de las mismas, pero solo el EPAnet puede exportar los resultados en un formato que nos permita analizarlo con el Matlab gracias a la herramienta “*EPAnet-Matlab class*”.

- Se han realizado numerosos trabajos con el “*EPAnet-Matlab class*” pero muy pocos se dirigen al estudio de las bobas centrífugas en los sistemas de bombeo.
- El uso de variadores de velocidad en sistemas de bombeo es de vital importancia para el ahorro de energía eléctrica y para eliminar el malgasto de fluidos en las redes hidráulica.
- Los software Matlab y “*EPAnet-Matlab class*” conforma una potencial herramienta para el análisis del comportamiento energético en la operación de redes hidráulicas.

## **CAPÍTULO 2 : BASES PARA EL USO DEL MATLAB EN EL ANÁLISIS ENERGÉTICO DE LAS OPERACIONES DE LAS REDES HIDRÁULICAS**

### **2.1. Introducción**

El presente capítulo tiene como objetivo, crear las bases para poder realizar el cálculo de potencia eléctrica de las bombas, en las redes de distribución hidráulica, usando como vía el uso del software Matlab. Se hace una descripción detallada del procedimiento para la adaptación del EPAnet en Matlab, a través de la aplicación “*EPAnet-Matlab class*” y se mencionan algunas de las funciones más importantes con las que se podrían lograr los objetivos trazados en este proyecto.

### **2.2. Elementos básicos para el cálculo de redes hidráulicas.**

Son varios los elementos que se deben tener en cuenta a la hora de realizar el cálculo de las redes hidráulicas, estos son de vital importancia a la hora de hacer un análisis energético del sistema ya que de los resultados que se obtengan se podrían saber las pérdidas existentes en el mismo y poder saber la demanda real que le pide la red a la bomba.

#### **2.2.1. Pérdidas por fricción.**

En el análisis de una red hidráulica se busca fundamentalmente descubrir el tamaño de la bomba (presión y caudal) necesario para que pueda soportar sin problemas las pérdidas fricción que ocurren en el sistema, principalmente en tuberías, conductos, elementos intercambiadores y accesorios.

Para las pérdidas de presión por fricción se puede usar la expresión del factor de fricción de Darcy (expresado en altura de fluido):

$$h = \frac{4L}{2D\gamma} f v^2 \quad (2.1)$$

$h \equiv$  altura (m)

$v \equiv$  velocidad (m/s)

$\gamma = \rho \cdot g \equiv$  peso específico (N/m<sup>3</sup>)

$L \equiv$  longitud de la tubería (m)

$D \equiv$  Diámetro de la tubería (m)

$f \equiv$  factor de fricción de Darcy

$$h = \frac{\Delta P}{\gamma} \quad (2.2)$$

$\Delta P =$  caída de presión (Pa)

$$\Delta P = \frac{2}{D} f L v^2 \quad (2.3)$$

Cuando cambiamos el diámetro de la tubería la velocidad del fluido cambia. Esto no afecta a la caída de presión total  $\Delta P_{total}$  pero sí afecta a la caída de presión estática  $\Delta P_{estat}$  (la que “empuja” el fluido) y la presión dinámica  $\Delta P_{din}$  (aquella debida al movimiento del fluido). La relación es:

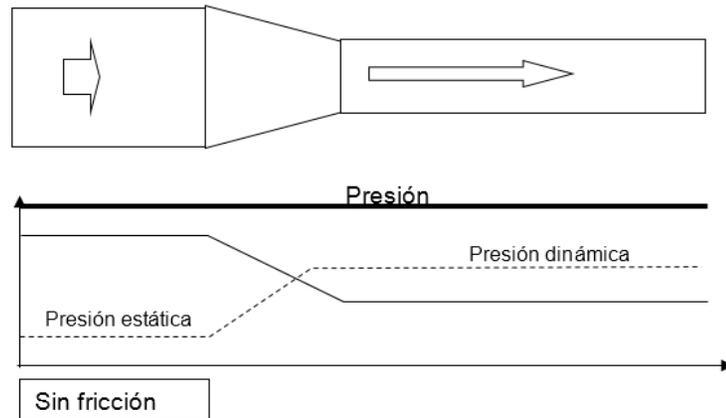
$$\Delta P_{total} = \Delta P_{estat} + \Delta P_{din} \quad (2.4)$$

Dónde:

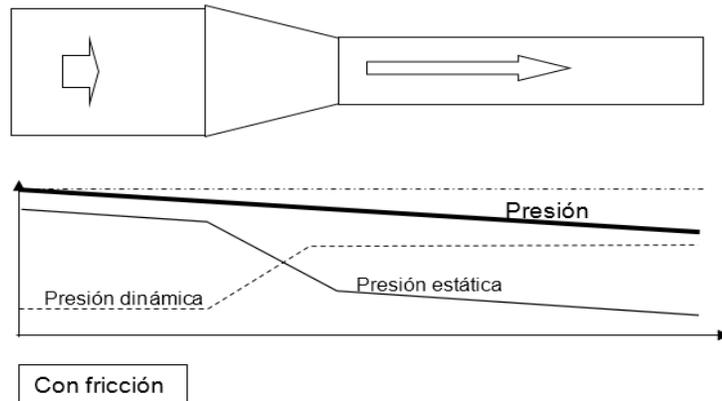
$$\Delta P_{din} = \rho \frac{v^2}{2} \quad (2.5)$$

Para sistemas con aire esta presión suele ser del orden de 15 Pa a 5 m/s, que es importante comparada con la caída de presión estática en un conducto de aire 1 Pa/m. Para un sistema hidráulico (agua) a una velocidad de 1m/s la presión dinámica es 500 Pa y la caída de presión estática es 300 Pa/m. Por lo tanto la presión dinámica no es tan importante para el agua como lo es para el aire. Por lo tanto en análisis rápidos, la presión dinámica en sistemas de agua se suele ignorar.





**Figura 2.1 Comportamiento de la presión del agua sin fricción.**



**Figura 2.2 Comportamiento de la presión del agua con fricción.**

Luego la pérdida de energía está relacionada con la caída de presión estática (no con la dinámica que se mantiene – el fluido se mueve por una tubería de cierto diámetro a velocidad constante).

La pérdida de energía en accesorios (válvulas etc...) está relacionada con la velocidad con la que atraviesa el fluido el accesorio. Por lo tanto se suele definir como:

$$\Delta P_{\text{accesorio}} = K \frac{\rho V^2}{2} \quad (2.6)$$

Si se expresa la caída de presión por fricción, en función del caudal volumétrico  $Q$  m<sup>3</sup>/s se tiene:

$$\Delta P = 32f \frac{L}{\pi^2 D^5} Q^2 \quad (2.7)$$

Que muestra la tremenda dependencia de la caída de presión con el diámetro de la tubería.

AGUA: Una tubería de 25 mm de  $D_i$  (interior) de acero, de 1 m de larga y con un caudal de 0.46 kg/s de agua tiene una caída de 300 Pa. Si se toma un tamaño superior en la escala  $D_i = 32$  mm la caída es de 75 Pa. Se toma un tamaño inferior en la escala  $D_i = 20$  mm la caída es de 980 Pa.

AIRE: Si el caudal de aire es  $0.35 \text{ m}^3/\text{s} = 1260 \text{ m}^3/\text{h}$  la caída en un conducto de  $D_i = 300$  mm es 1 Pa. Un tamaño superior  $D_i = 350$  mm produce 0.5 Pa y un tamaño inferior  $D_i = 250$  mm es 2.6 Pa.

En general cualquier pérdida de presión estática debida a la tubería o a un accesorio se puede escribir como:

$$\Delta P = RQ^2 \quad (2.8)$$

Pero en esta simplificación la resistencia hidráulica  $R$ , en el caso de la tubería, está relacionada con el factor de fricción de Darcy  $f$  que a su vez depende del Reynolds y por lo tanto de la velocidad y del caudal.

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (2.9)$$

1. Laminar si  $Re < 2000$
2. Zona Critica  $2000 < Re < 3000$
3. Turbulento –transición-  $3000 < Re$
4. Totalmente turbulento (sólo depende de la rugosidad)

En la zona (1) se usa la fórmula analítica de Poiseuille:

$$f = 16 / Re \quad (2.10)$$

En la zona (2) es impredecible (puede ser laminar o turbulento). Es inestable.

En la zona turbulenta Colebrook-White:

$$f^{-1/2} = -4 \cdot \log_{10} \left[ \frac{\epsilon_s}{3.7 \cdot D} + \frac{1.255}{Re} f^{-1/2} \right] \quad (2.11)$$

Resolver esta ecuación para saber  $f$  en función del Reynolds y de la rugosidad de la tubería precisa de iteración. Existen alternativas explícitas de diversos autores, por ejemplo Miller propone:

$$f = \frac{0.25}{4 \cdot \log_{10} \left[ \frac{\varepsilon_s}{3.7D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right]} \quad (2.12)$$

En la zona totalmente turbulenta, como no depende del Reynolds ni de la rugosidad relativa tenemos:

$$f = \frac{0.25}{4 \cdot \log_{10} \left[ \frac{\varepsilon_s}{3.7D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right]}, \frac{\varepsilon_s}{3.7D} \gg \frac{5.74}{Re^{0.9}} \rightarrow f = \frac{0.25}{4 \cdot \log_{10} \left[ \frac{\varepsilon_s}{3.7D} \right]} \quad (2.13)$$

Por ejemplo, en aire los conductos tienen una rugosidad  $\varepsilon_s=0.15$  mm mientras que para acero  $\varepsilon_s=0.046$ mm (nota: si la tubería está oxidada puede subir a 2.5 mm).

### **2.2.2. Resistencia del fluido**

Si a pesar de todo asumimos que el factor de fricción es constante, entonces la  $R$  (resistencia hidráulica) es constante y simplifica el análisis (para un cálculo detallado se debería tener en cuenta todo lo anterior, pero esta sección busca una visión práctica).

Es una buena aproximación. El ajuste del error hace que el exponente del caudal volumétrico se modifique; en lugar de 2 se pone 1.864. Sin embargo para el análisis el error relativo es pequeño.

- Resistencias en serie.

La Figura 2.3 muestra dos resistencias hidráulicas en serie:  $R_1$  y  $R_2$ . Si se pretende simplificar el circuito en un solo elemento se debe hacer:



$$\Delta P_1 = R_1 Q^2$$

$$\Delta P_2 = R_2 Q^2$$

$$\Delta P_{eq} = R_{eq} Q^2$$

$$\Delta P_{eq} = \Delta P_1 + \Delta P_2 = (R_1 + R_2) Q^2 = R_{eq} Q^2$$

$$(R_1 + R_2) = R_{eq}$$

Luego sucede lo mismo que en circuitos eléctricos.



**Figura 2.3 Resistencias hidráulicas en serie.**

- Resistencias en paralelo.

En este caso la caída de presión debe ser la misma por cada rama pero no los caudales luego:

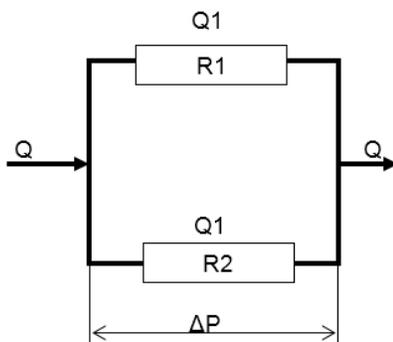
$$\Delta P_1 = R_1 Q_1^2 = \Delta P_2 = R_2 Q_2^2 = \Delta P_{eq} = R_{eq} Q^2$$

$$Q = Q_1 + Q_2$$

$$\left( \frac{\Delta P}{R_{eq}} \right)^{1/2} = \left( \frac{\Delta P}{R_1} \right)^{1/2} + \left( \frac{\Delta P}{R_2} \right)^{1/2}$$

$$\left( \frac{1}{R_{eq}} \right)^{1/2} = \left( \frac{1}{R_1} \right)^{1/2} + \left( \frac{1}{R_2} \right)^{1/2}$$

$$R_{eq} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2}}$$



**Figura 2.4 Resistencias hidráulicas en paralelo.**

Si las resistencias R1 y R2 fueran iguales a R, la resistencia equivalente sería  $R_{eq}=R/4$ , ¡esto es totalmente diferente del caso eléctrico ya que sería R/2!  
Imagínese 3 resistencias hidráulicas en paralelo iguales a R. La resistencia equivalente sería R/9.

Esto tiene implicaciones serias en los sistemas de producción; calderas y enfriadoras en paralelo. ¿Por qué? Pues porque cuando se van arrancando en función de la demanda de potencia térmica del edificio y una rama que estaba cerrada se abre la resistencia hidráulica del conjunto lo nota mucho, es muy sensible.

### 2.2.3. Leyes de bombas y ventiladores

Estas leyes sirven para entender cómo reacciona una bomba cuando varía su velocidad de giro. Las tres leyes que se va a usar para bombas centrífugas son:

$$Q \propto n \quad (2.14)$$

.n es la fracción de velocidad: 0- parado, 1- a plena velocidad.

La segunda ley es:

$$\Delta P \propto n^2 \frac{1}{2} \quad (2.15)$$

La tercera tiene que ver con la potencia, que es el producto de la altura por el caudal:

$$Q\Delta P \propto n^3 \quad (2.16)$$

La eficiencia es el cociente entre la energía del fluido y la electricidad consumida. Suele estar alrededor del 80%.

Cuando se cambia la velocidad de giro la característica cambia así:

$$\Delta P = \Delta P_0 \cdot \left( n^2 - \left( \frac{Q}{Q_0} \right)^2 \right) \quad (2.17)$$

$\Delta P_0$  es la presión a caudal nulo

$Q_0$  es el caudal a presión nula.



### **2.2.4. Máxima potencia al fluido**

No es bueno operar la bomba lejos de su punto óptimo de rendimiento. Fuera de su rango la bomba sólo calienta el fluido. El punto de máxima potencia se obtiene diferenciándola expresión de la potencia:

$$Pot = Q\Delta P = Q\Delta P_0 \cdot \left( n^2 - \left( \frac{Q}{Q_0} \right)^2 \right) \quad (2.18)$$

$$\frac{dPot}{dQ} = 0 = \left( n^2 - 3 \left( \frac{Q}{Q_0} \right)^2 \right) \Delta P_0 \quad (2.19)$$

Por lo tanto el máximo está cuando:

$$Q = Q_0 / \sqrt{3} \quad (2.20)$$

, entonces la presión será:

$$\Delta P = \frac{2}{3} \Delta P_0 \quad (2.21)$$

Esto sólo da una aproximación al punto más eficiente para hacer operar la bomba.

### **2.2.5. Velocidad variable**

Tradicionalmente se ha usado válvulas de 3 vías para controlar la potencia comunicada por los sistemas hidráulicos. Cuando la demanda de energía es baja esto significa que debemos estar moviendo tanto líquido como en el caso de plena carga. Esto a su vez hace perder o ganar más calor a lo largo de las tuberías. Por lo tanto es interesante el poder modular.

Si se compara la energía transportada y la del transporte:

$$Pot_{Calor} = m \cdot cp \cdot (T_i - T_r) = Q \cdot \rho \cdot cp \cdot (T_i - T_r)$$

$$Pot = Q\Delta P$$

$$\frac{Pot}{Pot_{Calor}} = \frac{\Delta P}{\rho \cdot cp \cdot (T_i - T_r)}$$



Si asumimos unos 100m de instalación (tuberías y accesorios) y una eficiencia del bombeo total del 50% se requieren unos 3.6 W/kW por cada kW de potencia a transmitir.

### **2.2.6. Diversidad de la carga**

Puede ocurrir que al bajar la velocidad de la bomba no exista suficiente presión para suministrar el caudal requerido por alguna rama. Para esto hace falta la ecuación del sistema la cual se obtiene al igualar la presión de la bomba con la curva característica de la misma y la ecuación resistiva del sistema.

$$\frac{27}{2} RQ^2 \left( n^2 - \frac{Q_{total}^2}{48Q^2} \right) = \frac{2R}{16} Q_{total}^2 + \frac{2R}{9} (Q_1 + Q_2 + Q_3)^2 + \frac{2R}{4} (Q_1 + Q_2)^2 + 3RQ_1^2 \quad (2.22)$$

Si se pone todas las ramas a mitad de caudal  $x=0.5$  se obtiene:

$$.n=0.5$$

Esta velocidad es menor que aquella ( $n=0.65$ ) que marca la ecuación de control. Por lo tanto habrá presión de sobra para alimentar todas las ramas con el caudal requerido.

### **2.3. Métodos de cálculo**

Existen diferentes métodos para el cálculo de redes hidráulicas los cuales están implementados en diferentes softwares. Actualmente se destaca el Método del Gradiente, el cual implementa un modelo para la resolución de sistemas de tuberías a presión. El modelo está representado por un sistema de ecuaciones lineales expresadas en forma matricial y tiene como principal ventaja que evita el ensamblado de las matrices, por lo que disminuye la cantidad de procesos a realizar en comparación con otros métodos [4].

Este es un aspecto importante durante los procedimientos de optimización. Algunas ventajas del método radican en que: asegura solución única al no tener problemas de convergencia; permite expresar la topología de la red, las

pérdidas de carga y la continuidad de caudales en términos de ecuaciones matriciales; emplea un modelo real de redes y no es necesario estimar una solución inicial cercana al valor real[4].

### **2.3.1. Método de redes en mallas**

La mayoría de los métodos de solución propuestos en el campo de las redes de distribución se pueden agrupar en dos grandes familias: los primeros, basados en las conocidas técnicas iterativas de Gauss-Seidel y Jacobi, los cuales resuelven el sistema al efectuar en cada iteración la resolución secuencial de cada una de las ecuaciones (al emplear fundamentalmente el Método de Cross y sus derivados); y los segundos, basados en la linealización del sistema de ecuaciones, de forma que el problema original se transforme en la resolución simultánea de un sistema de ecuaciones lineales [4, 26].

Actualmente se destaca el Método del Gradiente, el cual implementa un modelo para la resolución de sistemas de tuberías a presión. El modelo está representado por un sistema de ecuaciones lineales expresadas en forma matricial y tiene como principal ventaja que evita el ensamblado de las matrices, por lo que disminuye la cantidad de procesos a realizar en comparación con otros métodos [6]. Este es un aspecto importante durante los procedimientos de optimización. Algunas ventajas del método radican en que: asegura solución única al no tener problemas de convergencia; permite expresar la topología de la red, las pérdidas de carga y la continuidad de caudales en términos de ecuaciones matriciales; emplea un modelo real de redes y no es necesario estimar una solución inicial cercana al valor real [6]

### **2.3.2. Método de Hardy Cross**

El Método de Aproximaciones Sucesivas, de Hardy Cross, está basado en el cumplimiento de dos principios o leyes:

- Ley de continuidad de masa en los nodos;
- Ley de conservación de la energía en los circuitos.

El planteamiento de esta última ley implica el uso de una ecuación de pérdida de carga o de "pérdida" de energía, bien sea la ecuación de Hazen & Williams o, bien, la ecuación de Darcy & Weisbach.

La ecuación de Hazen & Williams, de naturaleza empírica, limitada a tuberías de diámetro mayor de 2", ha sido, por muchos años, empleada para calcular las pérdidas de carga en los tramos de tuberías, en la aplicación del Método de Cross. Ello obedece a que supone un valor constante para el coeficiente de rugosidad,  $C$ , de la superficie interna de la tubería, lo cual hace más simple el cálculo de las "pérdidas" de energía.

La ecuación de Darcy & Weisbach, de naturaleza racional y de uso universal, casi nunca se ha empleado acoplada al método de Hardy Cross, porque involucra el coeficiente de fricción,  $f$ , el cual es función de la rugosidad,  $k$ , de la superficie interna del conducto, y el número de Reynolds,  $R$ , de flujo, el que, a su vez depende de la temperatura y viscosidad del agua, y del caudal del flujo en las tuberías.

Como quiera que el Método de Hardy Cross es un método iterativo que parte de la suposición de los caudales iniciales en los tramos, satisfaciendo la Ley de Continuidad de Masa en los nodos, los cuales corrige sucesivamente con un valor particular,  $D Q$ , en cada iteración se deben calcular los caudales actuales o corregidos en los tramos de la red. Ello implica el cálculo de los valores de  $R$  y  $f$  de todos y cada uno de los tramos de tuberías de la red, lo cual sería inacabable y agotador si hubiese que "hacerlo a uña" con una calculadora sencilla. Más aún, sabiendo que el cálculo del coeficiente de fricción,  $f$ , es también iterativo, por aproximaciones sucesiva.

Lo anterior se constituía, hasta hoy, en algo prohibitivo u obstaculizador, no obstante ser la manera lógica y racional de calcular las redes de tuberías.

Hoy, esto será no sólo posible y fácil de ejecutar con la ayuda del programa en lenguaje BASIC que aquí se presenta, sino también permitirá hacer

modificaciones en los diámetros de las tuberías y en los caudales concentrados en los nodos, y recalcular la red completamente cuantas veces sea conveniente.

### 2.3.3. Método del gradiente

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

$$H_i - H_j = h_{ij} = rQ_{ij}^n + mQ_{ij}^2 \quad (2.23)$$

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 (ver más adelante). Para las bombas, la pérdida (esto es, la altura de la bomba cambiada de signo), puede representarse mediante una fórmula potencial del tipo:

$$h_{ij} = -\omega^2 (h_0 - r(Q_{ij} / \omega)^n) \quad (2.24)$$

Donde  $h_0$  es la altura a caudal nulo,  $\omega$  es la velocidad relativa de giro, y 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 nodos:

$$\sum_j Q_{ij} - D_i = 0 \quad (2.25)$$

Para  $i=1, \dots, N$

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

odos de altura prefijada, se trata de encontrar una solución para las alturas  $H_i$  en los restantes nodos, y para los caudales  $Q_{ij}$  de todas las líneas, que satisfagan las ecuaciones (2.23) y (2.24).

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 piezométricas en los nodos resolviendo el sistema de ecuaciones:

$$AH = F \quad (2.26)$$

Donde  $A$  = matriz Jacobiana ( $N \times N$ ),  $H$  = vector de incógnitas nodales ( $N \times 1$ ), y  $F$  = vector de términos independientes ( $N \times 1$ )

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

$$A_{ii} = \sum_j p_{ij} \quad (2.27)$$

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

$$A_{ij} = -p_{ij} \quad (2.28)$$

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:

$$p_{ij} = \frac{1}{nr|Q_{ij}|^{n-1} + 2m|Q_{ij}|} \quad (2.29)$$

Y para las bombas:

$$p_{ij} = \frac{1}{n\omega^2 r (Q_{ij}/\omega)^{n-1}} \quad (2.30)$$



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

$$F_i = \left( \sum_j Q_{ij} - D_i \right) + \sum_j y_{ij} + \sum_f p_{if} H_f \quad (2.31)$$

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:

$$y_{ij} = p_{ij} \left( r |Q_{ij}|^n + m |Q_{ij}|^2 \right) \text{sen}(Q_{ij}) \quad (2.32)$$

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

$$y_{ij} = -p_{ij} \omega^2 \left( h_0 - r (Q_{ij}/\omega)^n \right) \quad (2.33)$$

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

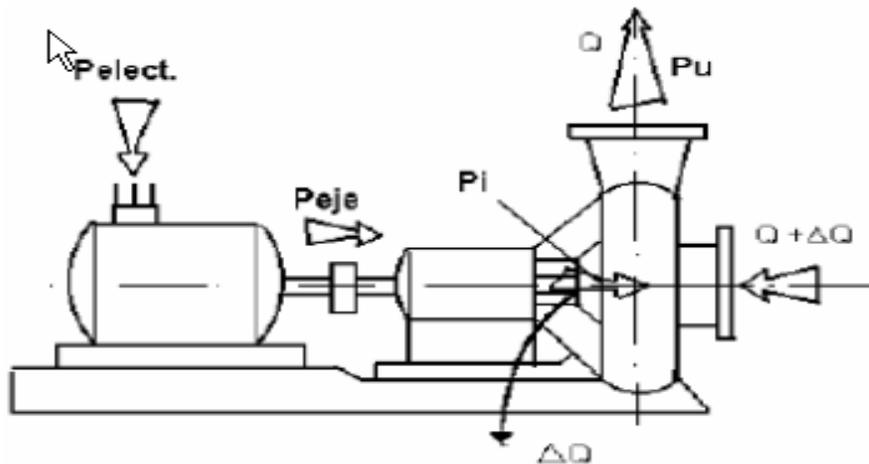
Una vez calculadas las nuevas alturas resolviendo las ecuaciones (2.26), los nuevos caudales se obtienen mediante:

$$Q_{ij} = Q_{ij} - \left( y_{ij} - p_{ij} (H_i - H_j) \right) \quad (2.34)$$

Si la suma, extendida a todas las líneas, del valor absoluto de la variación del caudal respecto al caudal total de cada línea es mayor que una cierta tolerancia, las ecuaciones (2.26) y (2.34) se resuelven de nuevo. Obsérvese que la fórmula de actualización (2.34) conduce al equilibrio de caudales en los nodos, tras la primera iteración.

#### **2.4. Cálculo de potencia**

El cálculo correcto de la potencia que la bomba necesita para poder suministrar al sistema la demanda del caudal que este exige y evitar el despilfarro de energía eléctrica que se produce a raíz de las pérdidas que se producen en el proceso.



**Figura 2.5 Cambio de caudal mediante la variación de velocidad.**

Este cálculo se realiza teniendo en cuenta los siguientes factores:

**Carga de impulsión (H).**- Energía suministrada por la máquina al fluido. En las bombas generalmente se expresa en unidades de longitud. Ej. Metros de una columna de líquido. Resulta común identificarla por el término de carga de labomba en m.

**Caudal (Q).**- Cantidad de líquido que desplaza la máquina en la unidad de tiempo.

En las bombas puede denominarse también como flujo y se puede expresar en unidades volumétricas o másicas por unidad de tiempo. Ej  $m^3/s$  ó  $kg/s$ .

**Potencia útil. (Pu).**- Cantidad de energía por unidad de tiempo, entregada al fluido que abandona la máquina por la tubería de descarga.

$$P_u = \frac{\rho g Q H}{1000} \text{ (kW)} \quad (2.35)$$

Donde:

$\rho$  .- Densidad del fluido ( $kg/m^3$ )

$g$  .- Aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ )

$Q$ .- Flujo volumétrico ( $m^3/s$ )

$H$ .- Carga de impulsión (m).

**Potencia interna. (Pi).**- Energía por unidad de tiempo entregada a todo el fluido que circula por el interior de la máquina.

$$P_i = \frac{\rho g (Q + \Delta Q) * (H + \Delta H)}{1000} \text{ (kW)} \quad (2.36)$$

Donde:

$\Delta Q$  .- Pérdidas del flujo volumétrico. (m<sup>3</sup>/s).

$\Delta H$ .- Pérdidas en la carga de impulsión (m).

Rendimiento interno ( $\eta_i$ ): Valora que cantidad de la energía por unidad de tiempo entregada a todo el fluido que circula por el interior de la máquina se transforma en energía útil en el fluido por unidad de tiempo. Se obtiene relacionado la Potencia útil y la Potencia interna.

$$\eta_i = \frac{P_u}{P_i} \quad (2.37)$$

Sustituyendo en la ecuación anterior los términos de Potencia útil y Potencia interna por sus expresiones de cálculo se obtiene la ecuación:

$$\eta_i = \frac{\frac{\rho g Q H}{1000}}{\frac{\rho g (Q + \Delta Q) (H + \Delta H)}{1000}} \quad (2.38)$$

Eliminando términos semejantes en la ecuación anterior ésta se puede representar en la forma dada en la ecuación:

$$\eta_i = \frac{Q}{Q + \Delta Q} * \frac{H}{H + \Delta H} \quad (2.39)$$

$$\eta_i = \eta_v * \eta_h \quad (2.40)$$

Donde:

$\eta_v$  - Rendimiento volumétrico.

$\eta_h$  .- Rendimiento hidráulico.

El sentido de cada uno de estos rendimientos es:

**Rendimiento volumétrico ( $\eta_v$ ).**- Valora la cantidad de flujo que sale de la máquina para ser utilizado de forma útil, respecto al flujo total trasegado por la máquina.

**Rendimiento hidráulico ( $\eta_h$ ).**- Valora la cantidad de energía por unidad de tiempo, entregada al fluido que abandona la máquina por la tubería de descarga, con relación a toda la energía entregada al fluido.

Otro rendimiento a considerar en las bombas es el **rendimiento mecánico ( $\eta_m$ )**, el cual valora que magnitud de la energía entregada en el eje de la máquina es transferida al fluido en el interior del equipo, ya sea usada de forma útil o gastada en vencer pérdidas.

El Rendimiento mecánico ( $\eta_m$ ) se determina según la expresión

$$\eta_m = \frac{P_i}{Peje} \quad (2.41)$$

La Potencia al eje requerida por la bomba se determina de la Ecuación

$$Peje = \frac{P_i}{\eta_m} \quad (2.42)$$

Sustituyendo en la Ecuación anterior el término de Potencia Interna ( $P_i$ ) obtenido anteriormente en función de la Potencia útil ( $P_u$ ); y considerando que el Rendimiento interno ( $\eta_i$ ) es el producto de los rendimientos hidráulicos y volumétricos se tiene que la Potencia al eje de la bomba se determina según la ecuación :

$$Peje = \frac{P_u}{\eta_m * \eta_h * \eta_v} = \frac{P_u}{\eta_b} = \frac{\rho g Q H}{1000 * \eta_b} \quad (2.43)$$

Valores comunes del rendimiento de la bomba ( $\eta_b$ ) según el tamaño y calidad de fabricación se ofrecen en la Tabla 2.1.

**Tabla 2.1 Valores del rendimiento de la bomba según tamaño y calidad de la Bomba.**

Tipo de máquinas	$\eta_v$	$\eta_h$	$\eta_m$
Grandes bombas con fabricación minuciosa	0,96-0,98	0,85-0,96	0,92-0,94
Bombas medianas y pequeñas	0,85-0,95	0,80-0,85	0,90-0,94

Dado que el rendimiento de la bomba ( $\eta_b$ ) es el producto de estos tres rendimientos, se tiene que el rendimiento de la bomba alcanza valores de ( $\eta_b=0.75 - 0.90$ ). Lo que indica que se puede perder más del 25% de la energía dada a la bomba, aún estando bien seleccionado el equipo.

La cantidad de energía entregada por la máquina al fluido (Carga de impulsión  $H$ ) y el flujo trasegado por la misma (Caudal  $Q$ ) dependen de la forma geométrica del y ello se toma en consideración por el coeficiente de clasificación denominado Velocidad Específica ( $n_s$ ) [2, 26].

### **2.5. EPAnet como base de cálculo hidráulico acertado y su facilidad de exportación de los ficheros.**

Dos de los requisitos fundamentales para poder construir con garantías un modelo de la calidad del agua son la potencia de cálculo y la precisión del modelo hidráulico utilizado. EPAnet contiene un simulador hidráulico muy avanzado que ofrece las siguientes prestaciones:

- no existe límite en cuanto al tamaño de la red que puede procesarse
- 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 considerar 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 varíe con el nivel)
- permite considerar diferentes tipos de demanda en los nodos, cada uno con su propia curva de modulación en el tiempo
- permite modelar tomas 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 de la confección de modelos hidráulicos, EPANet ofrece las siguientes prestaciones para la confección de modelos de calidad:

- simula el desplazamiento de trazadores no reactivos por toda la red, a lo largo del tiempo
- simula 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)
- permite emplear cinéticas de orden  $n$  para modelar las reacciones en el seno del agua
- emplea cinéticas de orden cero o de primer orden para modelar las reacciones en las paredes de las tuberías
- tiene en consideración las limitaciones de transferencia de masa al modelar las reacciones 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 correlacionar los coeficientes de velocidad de reacción en la pared de las tuberías con su rugosidad.
- 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 simularse como una mezcla homogénea, mediante un modelo de pistón, o como un reactor de dos compartimentos.

Mediante estas prestaciones, EPAnet permite estudiar fenómenos relacionados con la calidad del agua tales como:

- la mezcla de agua procedente de diversas fuentes
- el envejecimiento del agua mientras discurre por la red
- la pérdida de cloro residual
- el crecimiento de los subproductos derivados de la cloración
- el seguimiento del avance de un contaminante, tras su intrusión en la red.

Se entiende por Escenario de un Proyecto a un subconjunto de datos, de entre todos los que caracterizan las condiciones actuales bajo las cuales se está analizando la red. Un escenario puede contener una o más de las siguientes categorías de datos:

- Demandas en todos los nodos (demanda base y curva de modulación para todos los tipos de demanda)

- Calidad inicial del agua en todos los nodos
- Diámetros de todas las tuberías
- Coeficientes de rugosidad para todas las tuberías
- Coeficientes de reacción (en el medio y en la pared) para todas las tuberías
- Leyes de control simples y basadas en reglas.

EPAnet puede compilar un escenario en base a alguna o todas las categorías de datos listadas, guardar el escenario en un fichero, y volver a leer el escenario más tarde.

Los Escenarios proporcionan un método eficiente y sistemático de analizar las diversas alternativas de diseño y operación de la red. Pueden utilizarse para examinar el impacto de diferentes condiciones de carga, buscar valores óptimos de los parámetros de la red (en calibración por ejemplo), o evaluar los cambios en la red ante diversas estrategias de operación. Los ficheros de escenario se almacenan como ficheros de texto ASCII y pueden crearse o modificarse desde fuera de EPAnet, utilizando un editor de textos o una hoja de cálculo.

EPAnet requiere como datos, los siguientes:

- El peso específico y la viscosidad cinemática relativos a los valores del agua a 20 0 C.
- Propiedades de las tuberías (diámetro, longitud física, rugosidad y la suma de los coeficientes de los accesorios o singularidades de que disponga o su longitud equivalente).
- Propiedades de las bombas (caudal y carga del punto nominal,  $Q_0$  y  $H_0$ , como mínimo).
- Propiedades de las válvulas (tipo, estado y consigna o curva de comportamiento de pérdidas de carga vs. caudal) [4].

## **2.6. Procedimientos para la adaptación del EPAnet en el entorno Matlab.**

El Módulo de Herramientas (o Toolkit) para programadores de EPAnet es una librería de enlace dinámico (DLL) constituida por una serie de funciones que permiten a los desarrolladores personalizar el módulo de cálculo de EPAnet según sus necesidades particulares. Las funciones pueden incorporarse en aplicaciones para Windows escritas en C/C++, Delphi Pascal, Visual Basic (VB), o cualquier otro lenguaje que permita la llamada a funciones incorporadas a una DLL de Windows.

Esta versión en particular llamado “*EPAnet-Matlab class*” es un software de código abierto que funciona dentro del entorno Matlab, para proporcionar una interfaz de programación para la última versión de EPAnet. El objetivo de este software es servir como un marco de programación común para la investigación y el desarrollo en el creciente campo de las redes de agua inteligentes.

El “*EPAnet-Matlab class*” ofrece un paquete de comandos muy fácil de usar para visualizar, modificar, simular y graficar los resultados producidos por las bibliotecas del EPAnet [14].

Este producto se compone de un conjunto de envolturas de Matlab que permiten el uso de la API de EPAnet y kit de herramientas de EPAnet-MSX para poder ser programado desde el entorno Matlab. El uso de las funciones de Matlab es similar; las listas de argumentos son idénticas, con la excepción de que Matlab separa argumentos de entrada y de salida. Además de las envolturas de la API de Matlab, este producto incluye un pequeño número de rutinas de utilidad que, por ejemplo, permiten el trazado de la red utilizando gráficos de Matlab.

Este software consta con la siguiente estructura interna:

1. Tres carpetas:

- **LIBRARIES:** En esta se encuentra las dll pertenecientes al Toolkit para programadores del EPAnet.
- **NETWORKS:** Es la carpeta donde se guardaran los ficheros de extensión .INP exportados desde el EPAnet. (Desde esta carpeta no es posible cargar la red a estudiar, ya que es estrictamente para el guardado de estas.)
- **RESULTS:** Será la carpeta en al que se guardarán los resultados de los análisis hechos a través de esta herramienta en formato .txt.

2. Tres ficheros:

- **README.md:** En este archivo se da una explicación en idioma inglés de lo que trata la aplicación y se especifica que esta aplicación es de código abierto.
- **epanet.m:** Contiene todos los comandos que utiliza la herramienta programados en una clase y su respectivas especificaciones.
- **TEST.m:** Este archivo contiene ejemplos de programación con cada uno de los comandos de la herramienta en el análisis de un fichero de ejemplo nombrado "*Net1\_Rossmann2000.inp*".

### **2.6.1. Pasos para dejar enlazados**

Para poder lograr que la aplicación sea ejecutada correctamente en Matlab se deben seguir los siguientes pasos:

1. Ejecutar el Matlab y establecer como carpeta de trabajo, aquella que contiene la aplicación.
2. Ejecutar el archivo nombrado como *TEST.m* para comprobar si es necesario ejecutar los pasos que continuación se mencionan.

Si ocurriera el error representado en la Figura 2.6:

```
Create EPANET Class
Error using loadlibrary (line 254)
A 'Selected' compiler was not found. You may need to run mex -setup.

Error in epanet>ENLoadLibrary (line 2284)
    loadlibrary('epanet2','epanet2.h');

Error in epanet/epanetLoadLibrary (line 388)
    [errcode] = ENLoadLibrary;

Error in epanet (line 236)
    [obj.errcode]=obj.epanetLoadLibrary;

Error in TEST (line 17)
    d=epanet([inpname, '.inp']);
```

**Figura 2.6 Posibles errores del Matlab al ejecutar el fichero TEST.m.**

3. Ejecutar el comando `mex -setup` en la ventana de comandos (CommandWindow) del Matlab.

Luego de aparecerles los mensajes de la Figura 2.7 se debe confirmar en la ventana de comandos con la letra "y" para poder seleccionar uno de los compiladores instalados en el sistema.

```
>> mex -setup

Welcome to mex -setup. This utility will help you set up
a default compiler. For a list of supported compilers, see
http://www.mathworks.com/support/compilers/R2013a/win32.html

Please choose your compiler for building MEX-files:

fx Would you like mex to locate installed compilers [y]/n? |
```

**Figura 2.7 Mensaje mostrado después de ejecutar el comando mex -setup.**

4. A continuación aparecerán unos mensajes como los de la los cuales muestran todos los compiladores que están instalados en el sistema, los cuales aparecen enumerados desde el 1 en adelante. De estos se deberá seleccionar el que coincida con el lenguaje de programación en el que se piensa trabajar en nuestro caso se seleccionó el "Lcc-win32 C 2.4.1 in C" (número 1 en la **Figura 2.8**) que es el que trae por defecto el Matlab.

```
[1] Lcc-win32 C 2.4.1 in C:\PROGRA~1\MATLAB\R2013a\sys\lcc  
  
[0] None  
  
fx Compiler: |
```

**Figura 2.8: Ejemplo de cómo se muestran en el Matlab los compiladores instalados en el sistema.**

5. Luego de seleccionado el compilador correspondiente, el Matlab le pedirá que confirme si efectivamente es el compilador que desea utilizar como se muestra en la Figura 2.9.

Si es afirmativa la respuesta se tecldea la letra "y" en la ventana de comandos y luego de que aparezcan los mensajes de la Figura 2.10 ya la aplicación está lista para su uso.

```
Compiler: 1  
  
Please verify your choices:  
  
Compiler: Lcc-win32 C 2.4.1  
Location: C:\PROGRA~1\MATLAB\R2013a\sys\lcc  
  
fx Are these correct [y]/n? |
```

**Figura 2.9: Mensaje de verificación de la correcta selección del compilador a utilizar.**

```
Are these correct [y]/n? y

Trying to update options file: C:\Users\Estudiantes\AppData\Roaming\MathWorks\MATLAB\R2013a\mexopts.bat
From template:          C:\PROGRA~1\MATLAB\R2013a\bin\win32\mexopts\lccopts.bat

Done . . .

*****
Warning: The MATLAB C and Fortran API has changed to support MATLAB
variables with more than 2^32-1 elements. In the near future
you will be required to update your code to utilize the new
API. You can find more information about this at:
http://www.mathworks.com/help/matlab/matlab\_external/upgrading-mex-files-to-use-64-bit-api.html
Building with the -largeArrayDims option enables the new API.
*****

fx >>
```

**Figura 2.10: Mensaje de Atención del Matlab proponiendo algunas recomendaciones para el correcto funcionamiento del el mismo.**

Es recomendable que la versión del Matlab a utilizar sea a 32bits ya que para la de 64 bits sería necesario instalar un compilador externo para el correcto funcionamiento del “EPAnet-Matlab class”.

### **2.7. Funciones del EPAnet-Matlab Class**

Una vez logrado el enlace entre el EPAnet y el Matlab ya es posible programar un proyecto con el fin que se desee, para ello es necesario conocer las principales funciones con las cuales se pueden lograr los objetivos trazados, en nuestro caso haremos más énfasis en aquellas que nos muestren los datos necesarios para poder realizar el cálculo de la potencia de las bombas. En la tabla 2.2 se muestran algunas de las principales funciones utilizadas en la programación del GUI.

**Tabla 2.2 Funciones principales del EPAnet-Matlab**



<b>Funciones</b>	<b>Descripción</b>
solveCompleteHydraulics	Resuelve el sistema hidráulico en Matlab
NodeElevation	Muestra la elevación de cada nodos
getLinkRoughnessCoeff	Muestra el coeficiente de rugosidad de las tuberías
getLinkDiameter	Muestra el diametro de las tuberías
getNodePressure	Muestra la presión en los nodos
NodeBaseDemands	Demanda base de los nodos
getNodeActualDemand	Demanda actual de los nodos
getNodePressure	Muestra la presión en los nodos
getLinkDiameter	Muestra diámetro de los enlaces
getLinkFlows	Muestra el flujo (o caudal) de la red
getNodeHydraulicHead	Muestra la altura de carga de la red por nodo

### **2.8. Algoritmo general del GUI realizado en Matlab para evaluar el comportamiento energético de sistemas de bombeo de agua.**

El algoritmo desarrollado para esta aplicación está conformado por los siguientes pasos:

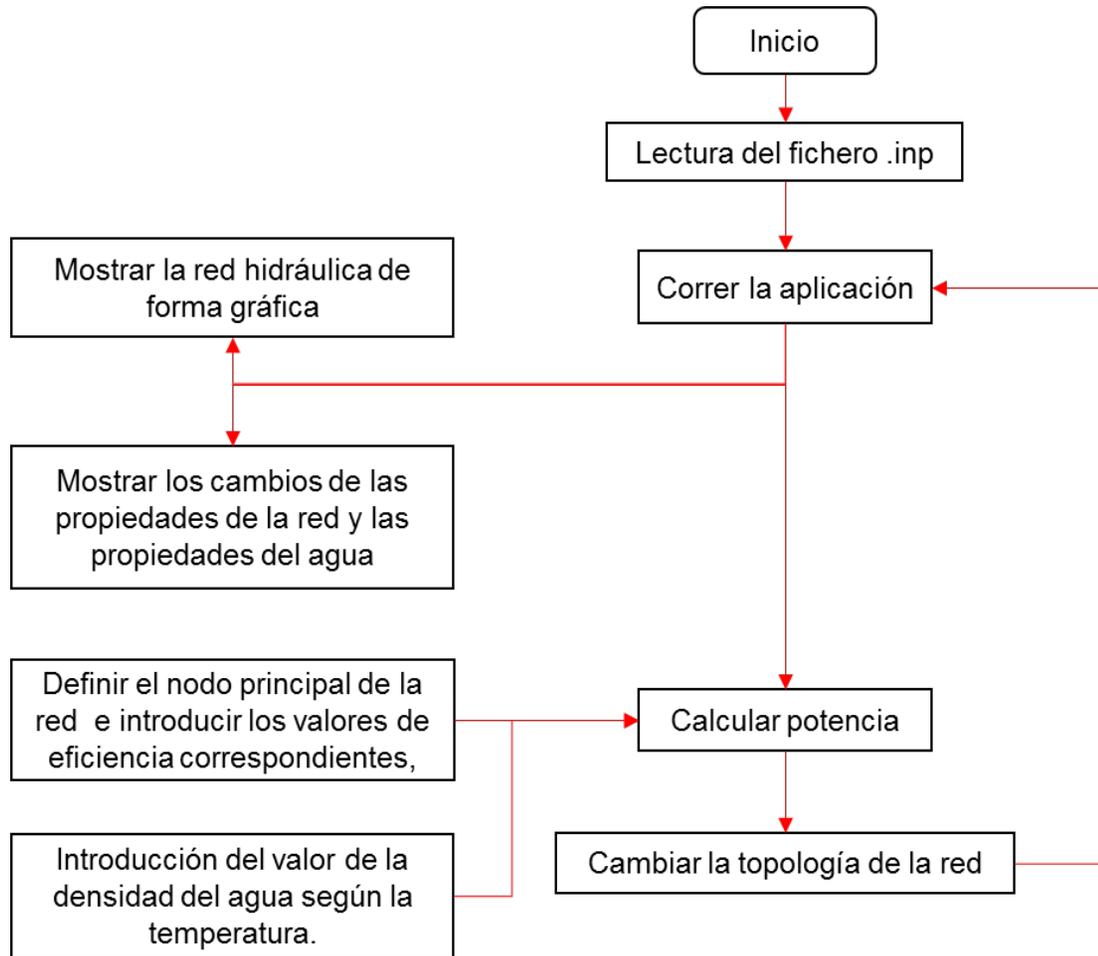
Inicio

Cargar el archivo de extensión .inp anteriormente creado en EPAnet.

Operaciones:

- Visualizar la red hidráulica
  - Se observa de forma gráfica la configuración de la red hidráulica.
- Cambio de topología
  - Se varían las propiedades de las tuberías para poder simular la variación de caudal en la red.
- Mostrar los cambios de las propiedades de la red
  - Se observa cómo se actualiza el diámetro de las tuberías y los valores de presión, caudal y altura de carga del sistema al cambiar las propiedades de los en laces
- Calculo de la potencia eléctrica de la bomba
  - Mediante la programación se insertó la fórmula 2.43 para poder realizar los cálculos de la potencia que le demanda la red hidráulica a la bomba.

El algoritmo básico para la creación de la aplicación es el siguiente:



**Figura 2.11 Algoritmo básico de la aplicación.**

## 2.9. Conclusiones del capítulo

- En sistemas a carga variable es necesario el uso de variadores de velocidad para poder garantizar las presiones necesarias en el suministro del caudal requerido por la red.
- Se logró el correcto enlace de la aplicación EPAnet-Matlab Class con el Matlab sin muchas restricciones del sistema operativo en el cual se trabajó.
- Se logró la conformación de un algoritmo sencillo capaz de realizar un análisis de las redes hidráulicas con el fin de calcular la potencia requerida por la red hidráulica ante diferentes cambios del sistema.

## RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS MISMOS

### 3.1. Introducción

En este capítulo se presentaran los resultados obtenidos de las simulaciones de varios ejemplos de redes hidráulicas en la aplicación realizada en Matlab, de los cuales se hace referencia en el anexo 6, entre los que se encuentra el ejemplo 7.5 del libro Hidráulica de las Tuberías [6], una red hidráulica abierta de distribución modelada previamente en EPAnet, y otra cerrada utilizada en la climatización centralizada perteneciente a los patinejos AB y CD de la zona 6 del hotel Blau Costa Verde, ubicado en el municipio Banes de la provincia de Holguín.

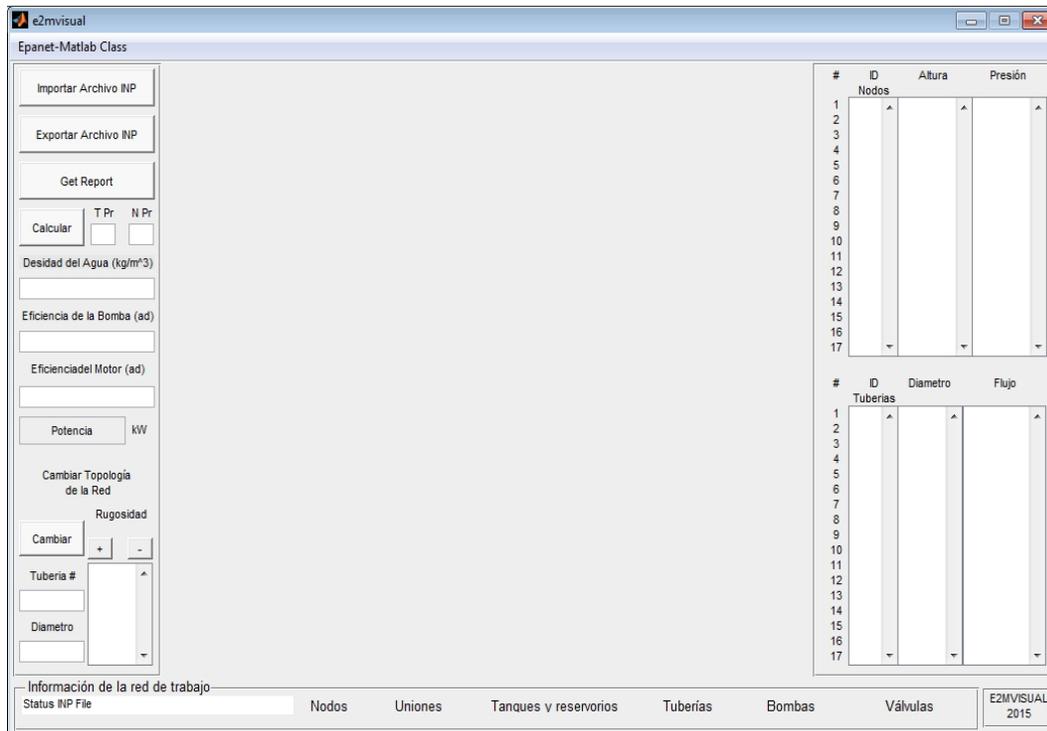
### 3.2. GUI de la aplicación

La aplicación realizada en Matlab muestra en la Figura 2.12. Esta ventana principal brinda la principal información sobre la red hidráulica que se estudie.

A continuación se mostrarán los resultados obtenidos con el fin de mostrar la potencialidad del Matlab en el análisis de la eficiencia energética de las redes hidráulicas.

En la parte izquierda de la aplicación se muestran 7 botones que tienen como función: importar y exportar el archivo a analizar (extensión .inp), calcular la potencia que demanda la red, cambiar el diámetro de las tuberías, guardar los datos en un reporte y aumentar o disminuir el coeficiente de rugosidad, además cuenta con 5 Edit Text (Texto editable) entre los que se encuentran los relacionados con la selección del nodo y la tubería específica en la cual se va a calcular la potencia demandada y el resto son para la introducción de los valores de densidad, eficiencia de la boba y eficiencia del motor de esta, estos datos son fundamentales para poder determinar la potencia de la bomba que se mostrara en el Static Text (texto estático) que aparece en la aplicación. En esta

área también se muestra y se puede variar el coeficiente de rugosidad de las tuberías.



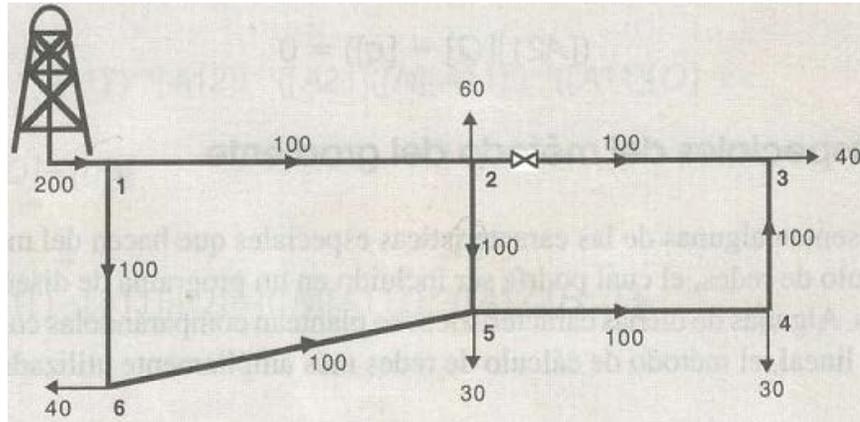
**Figura 2.12 Pantalla principal del GUI de la aplicación en Matlab.**

A la derecha de la aplicación se mostrarán los valores de presión, caudal, altura de carga, diámetro de las tuberías y la identificación de los nodos y las tuberías en la red.

En la parte inferior se muestra la cantidad de nodos, válvulas, tuberías, bombas, tanques y reservorios con que cuenta la red, además, se muestra el nombre del archivo cargado y al centro se muestra la red hidráulica como tal.

### 3.3. Validación de la aplicación.

Para poder utilizar la aplicación creada fue necesario demostrar su correcto funcionamiento en la misma por lo que se tomó como ejemplo de prueba el ejemplo 7.5 del libro “Hidráulica de Tuberías”, de Saldarriaga, (1998), el cual se muestra en la Figura 2.12.



**Figura 2.13 Esquema del ejemplo para validar la funcionalidad del método del gradiente [6].**

Este ejemplo consiste en calcular los caudales y las presiones del esquema de la Figura 3.1. En esta red todos los caudales iniciales se suponen de 100 l/s, la presión en el nodo 1 conocido es de 100 mca. Otros datos de la red y el ejemplo resuelto en la aplicación informática se presentan en el anexo 1.

Para lograr la validación de la aplicación se modeló y simuló el ejemplo en el EPANet y luego de obtener los resultados se exportó la red ya diseñada a la aplicación creada en Matlab observándose que los resultados en Matlab se dan con una mayor exactitud.

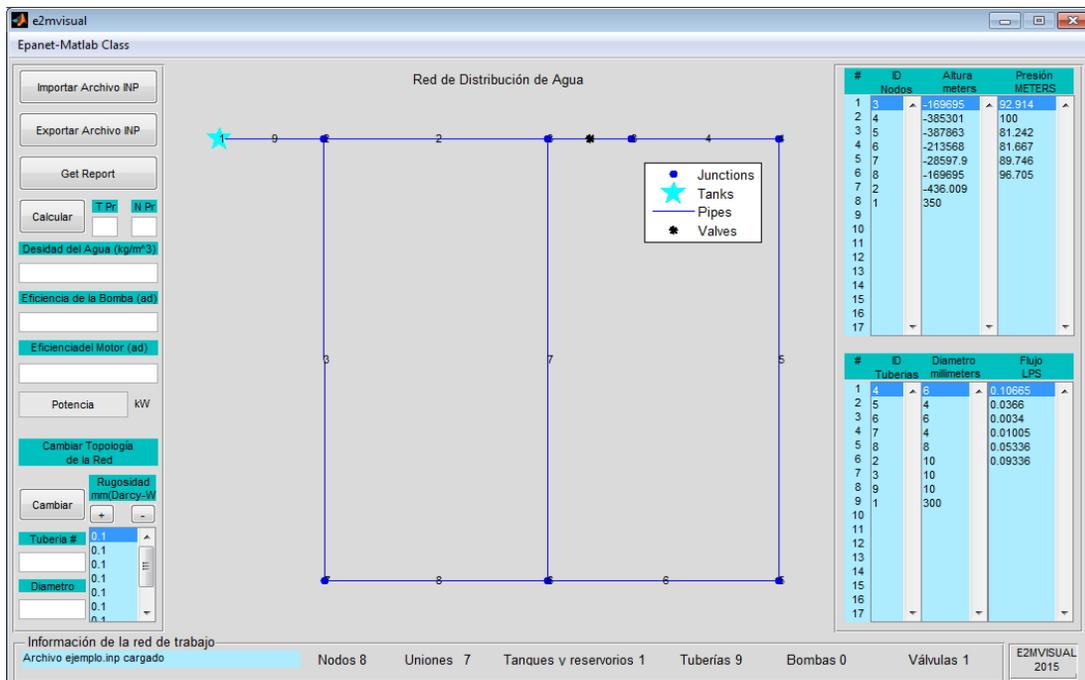
**Tabla 2.3 Resultados de la validación del Método del Gradiente con la aplicación en los tramos de la red.**

Tramo	Q. ejemplo	Q. calculado por	Q. calculado por	Desv. (%)
	(m <sup>3</sup> /s)	Epanet(m <sup>3</sup> /s)	Epanet-Matlab(m <sup>3</sup> /s)	
2--3	0,10667	0,11	0,10665	0,018749
3--4	0,03658	0,04	0,0366	-0,046473
4--5	0,00342	0	0,0034	0,508772
5--6	0,03342	0,03	0,0334	0,050868
6--3	0,01009	0,01	0,01005	0,416254
6--7	0,05333	0,05	0,05336	-0,046878
7--2	0,09333	0,09	0,09336	-0,026787
Desviación estándar				0,234833
Desviación promedio				0,124929

**Tabla 2.4 Resultados de la validación del Método del Gradiente con la aplicación en los nodos de la red.**

Nodo	H. ejemplo	H. calculado por	H. calculado por	Desv. (%)
	(mca)	Epanet (mca)	Epanet-Matlab (mca)	
3	92,96	92,91	92,914	0,049
4	81,358	81,24	81,242	0,143
5	81,78	81,67	81,667	0,138
6	89,812	89,75	89,746	0,073
7	96,727	96,71	96,705	0,023
Desviación promedio				0,085
Desviación estándar				0,053

Como se puede observar en los resultados obtenidos en las tablas 3.1 y 3.2 los resultados del EPANet y la aplicación en Matlab son prácticamente iguales y comparados con el ejemplo 7.5 la diferencia es mínima. Esto se debe a que el método matemático programado en ambas aplicaciones para realizar los cálculos hidráulicos es el método del gradiente. De esta manera se demuestra la fiabilidad de la aplicación.



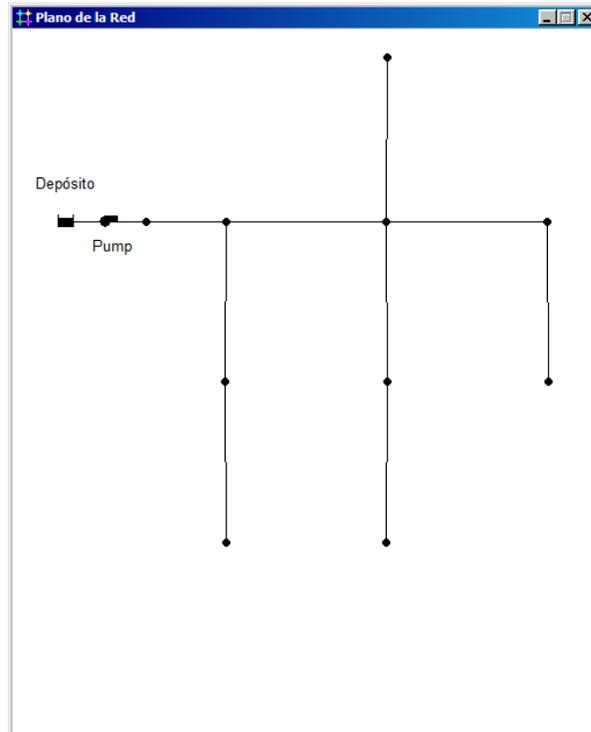
**Figura 2.14 Ejemplo 7.5 resuelto en la aplicación.**

### **3.4. Simulación con EPAnet-Matlab de una red hidráulica abierta de distribución**

Luego de haberse demostrado la efectividad de la aplicación creada con EPAnet-Matlab Class se procederá al análisis de una red abierta sencilla diseñada y simulada previamente en EPAnet, la cual se muestra en la Figura 3.4. **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, con el objetivo de comprobar la efectividad de la programación realizada para el cálculo de la potencia demandada.

#### **3.4.1. Presentación de la red abierta utilizada**

La red abierta utilizada consta con un total de 9 nodos, 9 tuberías, un depósito de agua, y una bomba hidráulica con una eficiencia de un 75%. En la Tabla 2.5 se muestra la configuración de la red.



**Figura 2.15 Red abierta mostrada en EPAnet.**

**Tabla 2.5 Parámetros de las tuberías pertenecientes a la red abierta a analizar.**

ID Línea	Nudo Inicial	Nudo Final	Longitud (m)	Diámetro (mm)
1	1	2	3209,54	457,7
2	2	3	1609,34	355,6
3	3	4	1609,34	254
4	11	3	60,96	457,2
5	2	5	1609,34	254
6	3	6	1609,34	304,8
7	4	7	1609,34	203,2
8	5	8	1609,34	203,2
9	6	9	1609,34	152,4

### **3.4.2. Resultados y análisis de las simulaciones de la red abierta**

En las tablas 3.4 y 3.5 se muestran los resultados de la red simulada en los softwares EPAnet y Matlab donde se puede apreciar que los resultados del análisis realizado en esta son prácticamente iguales, con solo una diferencia en las unidades decimales lo que no significa mucho para este sistema en específico por sus dimensiones.

**Tabla 2.6 Resultados de las presiones en los nodos de la red analizada.**

ID Nodos	Presiones calculadas en epanet (mca)	Presiones calculadas en EPAnet-Matlab (mca)
1	299,93	299,928
2	-207,82	-207,818
3	-591,34	-591,341
4	-796,23	-796,225
5	-1005,03	-1005,03
6	-708,85	-708,855
7	-1032,33	-1032,33
8	-630,54	-630,539
9	-1168,79	-1168,79
11	-1,19E+13	-1,19E+13

**Tabla 2.7 Resultados de los caudales en las tuberías.**

ID	Caudal calculado por EPAnet (m <sup>3</sup> /s)	Caudal calculado por EPAnet-Matlab (m <sup>3</sup> /s)
1	1313,36	1313,36
2	850	850
3	370,88	370,88
4	250	250
5	150	150
6	300	300
7	313,36	313,36
8	100	100
9	100	100

En la tabla 3.6 se muestran los resultados del cálculo de la potencia eléctrica que demanda esta red hidráulica al sufrir cambios en alguno los tramos que la conforman. Como se puede apreciar la demanda de potencia total de la red es de 8788.19 kW, al sufrir fallas en algunos sectores según la demanda de estos, la potencia que le es demandada a la bomba va a tender a bajar.

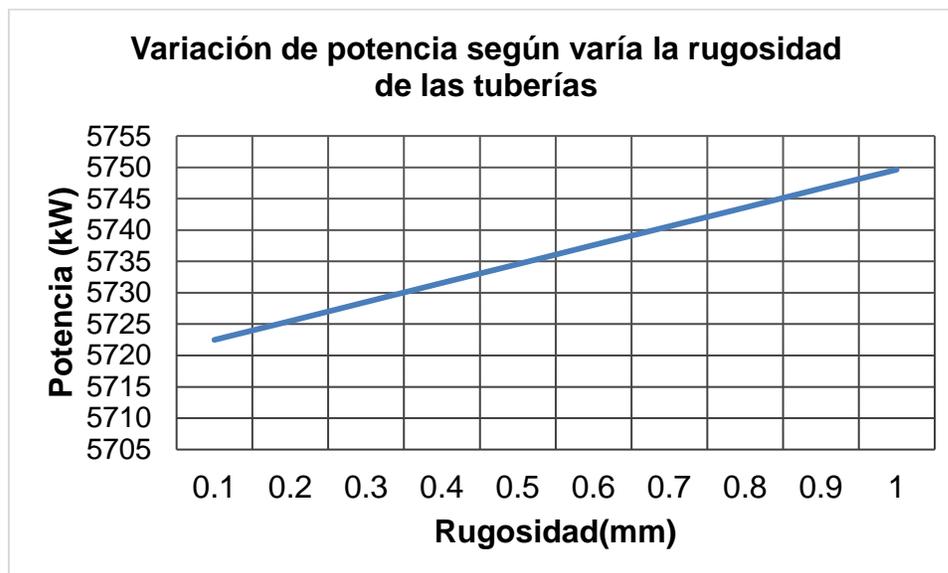
Como se puede apreciar la demanda de potencia total de la red es de 8788.19 kW, al sufrir fallas en algunos sectores según la demanda de estos, la potencia que le es demandada a la bomba va a tender a disminuir

También se simuló la potencia que demanda la red para diferentes valores de rugosidad en los enlaces ya que no en todas las redes hidráulicas se utilizan los mismos tipos de tuberías. En la Tabla 2.8 y la se muestran los resultados de la simulación al llevar a cero el diámetro de las tuberías y variar el valor del coeficiente de rugosidad.

**Tabla 2.8 Potencia que demanda la red al ser eliminado uno de los tramos y al variar la rugosidad de las tuberías.**

Tubería modificada	Potencia (kW)	Rugosidad (mm)	Potencia (kW)
-	8788,19	0,1	5722,46
2	335,571	0,2	5725,49
3	8788,19	0,3	5728,52
4	7518,29	0,4	5731,54
5	8788,19	0,5	5734,56
6	335,571	0,6	5737,58
7	335,571	0,7	5740,6
8	8788,19	0,8	5743,61
9	8788.19	0,9	5746,62

En el siguiente gráfico se muestra el aumento de la demanda de potencia de la red según se aumenta la rugosidad de las tuberías. Se debe aclarar que la rugosidad es una propiedad que traen los diferentes tipos de tuberías y esta solo afecta la demanda de la bomba si se cambian los enlaces en la red hidráulica.



### 3.5. Simulación con EPAnet Matlab de una red hidráulica cerrada utilizada en la climatización centralizada

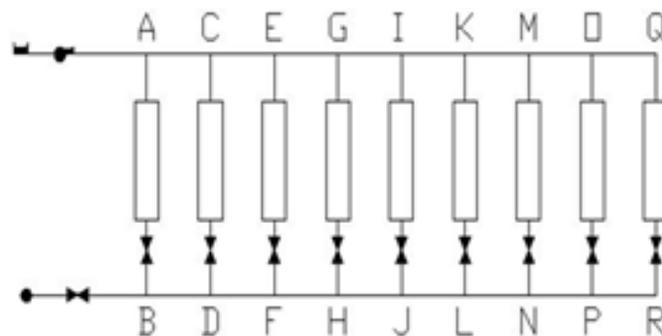
En este epígrafe se toma como caso de estudio los patinejos AB y CD perteneciente a la red hidráulica de la zona 6 del hotel Blau Costa Verde,

constituida por un edificio de tres plantas con un total de 59 habitaciones de las cuales 12 son las pertenecientes a los dos patinejos que se van a utilizar.

### **3.5.1. Presentación de la red cerrada estadia**

La red de tuberías es mallada de material PVC. En la Figura 3.5 se muestra la representación simplificada de la red hidráulica con los nueve ramales principales. La temperatura ambiental promedio de la instalación se encuentran entre los 25 y 29 °C, según los datos de la estación climatológica más cercana, situada en Cabo Lucrecia en el municipio de Banes, provincia de Holguín [27].

Las características nominales de la bomba de la zona 6 son: marca STERLING de la serie SIHI 032200B con 28 m<sup>3</sup>/h de caudal y una carga de 70 m. El motor asíncrono acoplado de forma directa a la bomba es del modelo AM132 – SZA2, con una potencia nominal de 8,8 kW y 3490 rev/min. Al motor se encuentra acoplado un variador de velocidad ALTIVAR 31 [28].



**Figura 2.16 Esquema simplificado de la red hidráulica.**

Dentro de los componentes de la red que se estudiarán se resaltan, las unidades terminales (fan-coil) y las válvulas de equilibrio, de los cuales se hace referencia en los anexos 3 y 4, para las cuales se garantizaron los caudales y presiones necesarias con una presión determinada a la entrada del sistema. En la red hidráulica escogida, solo se emplean válvulas de equilibrado a la salida de los patinejos y una de compensación en el retorno de sistema. Esta red consta con 72 nodos, 66 tuberías, 15 válvulas [27].

**3.5.2. Resultados y análisis de las simulaciones de la red cerrada**

Para poder realizar la simulación de la red diseñada y simulada previamente en EPAnet , de la cual se hace referencia en el anexo 5, en Matlab se tomaron como datos la densidad del agua una temperatura de 10°C y una eficiencia del conjunto bomba motor de un 88%.

El estudio para determinar el orden ocupacional que garantiza los menores requerimientos de potencia eléctrica de la bomba en el hotel fue realizado por Montero (2013), dicho orden fue utilizado para la simulación de la red hidráulica en Matlab. En la tabla 3.8 se muestran los resultados de esta simulación.

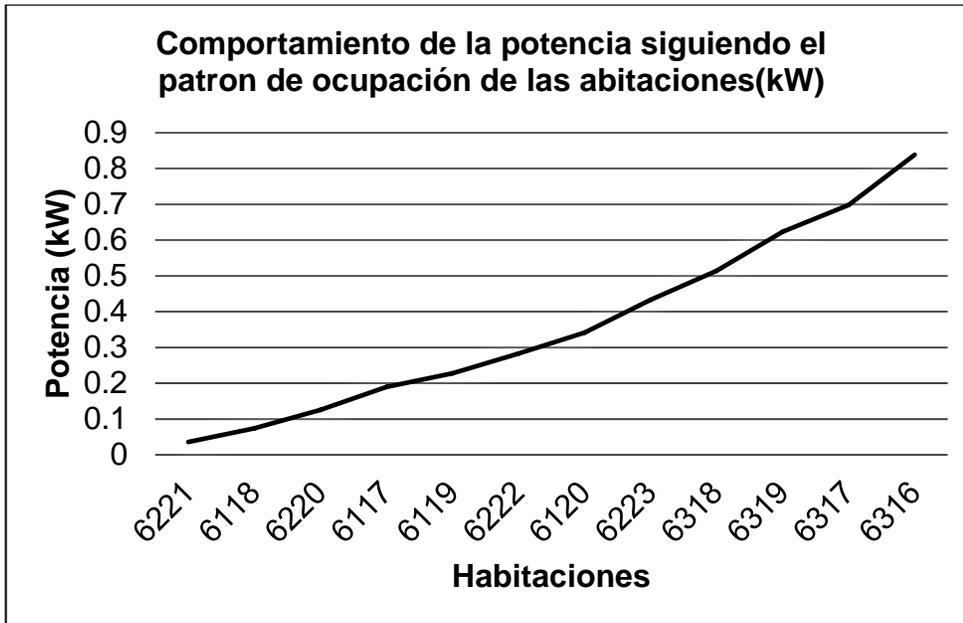
El procedimiento para poder simular correctamente la red en el Matlab consistía en llevar a cero el diámetro de las tuberías que representaban las habitaciones desocupadas en el hotel e ir aumentándolo uno a uno según el orden que se determinó para la ocupación del local.

**Tabla 2.9 Resultados de la simulación siguiendo el orden de ocupación de Montero (2013).**

<b>Escalón</b>	<b>6221</b>	<b>6118</b>	<b>6220</b>	<b>6117</b>	<b>6119</b>	<b>6222</b>
<b>Te(°C)</b>	10,719	11,328	11,557	11,666	11,637	11,679
<b>Peb(kW)</b>	0,035796	0,073989	0,125989	0,189989	0,227989	0,282988
<b>Qr(m<sup>3</sup>/s)</b>	0,00215975	0,0010866	0,000717453	0,000589616	0,000572438	0,00044439
<b>He(mca)</b>	34,3666	34,3647	34,3637	34,3637	34,3637	34,3638
<b>Escalón</b>	<b>6120</b>	<b>6223</b>	<b>6318</b>	<b>6319</b>	<b>6317</b>	<b>6316</b>
<b>Te(°C)</b>	11,702	11,733	11,745	11,745	11,732	11,733
<b>Peb(kW)</b>	0,341988	0,432985	0,513995	0,622991	0,697987	0,837992
<b>Qr(m<sup>3</sup>/s)</b>	0,00027158	0,0002487	0,000216006	0,000186156	0,000233867	0,00018475
<b>He(mca)</b>	34,3638	34,3641	34,3631	34,3635	34,3639	34,3633

En la gráfica que se mostrará a continuación se puede apreciar como varía la demanda de potencia según se van ocupando las habitaciones. La variación de potencia es pequeña por que la instalación hidráulica a pesar de su complejidad es muy pequeña comparada con el ejemplo anterior, además no se toma en cuenta la climatización por habitaciones que es muy variable y dicho elemento influye mucho a la hora de calcular las pérdidas.





Para poder obtener estos valores de potencia fue necesario cambiar en la simulación los valores de la curva característica de la bomba ya que esta solo brindaba la potencia necesaria para suplir el caudal que demandaba la red hidráulica.

### **3.6. Valoración técnica y económica de la aplicación**

Vistos ya los resultados obtenidos por la aplicación, se puede afirmar que el código creado en esta puede constituir uno de los primeros pasos para su uso con el conjunto de herramientas técnicas y novedosas con que cuenta el Matlab para el estudio a fondo de las redes hidráulicas, como por ejemplo el reconocimiento de patrones de comportamiento, sistemas de aprendizaje de las operaciones, evaluación combinatoria de las topologías de las redes para elegir la mejor configuración para explotarlas y dar el servicio adecuado.

Como este trabajo está dirigido a la programación de una aplicación para realizar un análisis energético de redes hidráulicas, la valoración económica que se evaluó fue la del tiempo de trabajo empleado en el desarrollo de la aplicación y el precio comercial del propio Matlab.

El precio de la versión de Matlab Home que se empleó para la programación del GUI fue Matlab2013b y cuesta 127 USD el WorkSpace y 59 cada Toolbox [29].

En la Tabla 2.10 se resume el costo total de la energía consumida en la programación del GUI de la aplicación en Matlab. Para esto, se tuvo en cuenta que el total de días empleados en la programación fue de dos meses con un máximo de 10 horas diarias, lo que equivale a  $2 * 30 * 10 = 600$  horas de uso de los equipos. (La tabla refleja sólo el primer mes)

**Tabla 2.10 Costo de la energía eléctrica consumida en la programación del GUI.**

Equipo	Potencia (W)	Tiempo de uso (horas)	Energía consumida (kW/h)
PC Escritorio	100	310	31000
Monitor	50	310	15500
Lámpara fluorescen	18	310	5580
<b>Energía total consumida (kW/h)</b>			52,08
<b>Costo total (CUP)</b>			4,68

### 3.7. Conclusiones del capítulo

- Se validó la aplicación correctamente creada en Matlab demostrando su fiabilidad en el análisis energético de redes hidráulicas.
- Las simulaciones hechas a los ejemplos anteriores demuestran como varía la potencia que se le demanda a la bomba cuando ocurriese alguna modificación de la red
- El coeficiente de rozamiento de las tuberías constituye uno de los factores principales a la hora de seleccionar la bomba de una red hidráulica.

## **CONCLUSIONES GENERALES**

- Se realizó el correcto enlace de las “dll” del EPAnet con el Matlab lográndose la correcta lectura de los datos del primero con el otro
- Se programó correctamente un GUI en Matlab capaz de mostrar los valores de caudal, presión, y pérdidas de carga que existen en una red hidráulica.
- Se logró que la aplicación calculara la potencia necesaria de una bomba centrífuga para poder suplir eficientemente el caudal que demanda la red hidráulica asociada a ella y mostrara el comportamiento de la potencia que demanda la red hidráulica al cambiar el coeficiente de rugosidad de las tuberías y el diámetro de los tramos para simular la estrangulación de una válvula.

## **RECOMENDACIONES**

1. Implementar algoritmos automáticos para resolver el problema de la variación de la potencia que demanda la bomba al variar el la topología de la red.
2. Comparar los resultados obtenidos en Matlab con otro software profesional para estimar el nivel de verdad del mismo.
3. Utilizar la aplicación en Matlab como una herramienta didáctica para docentes en pregrado y de investigación en posgrado en el ISMMM.
4. Que este trabajo investigativo sirva de base para futuras investigaciones en el este tema.

**Bibliografía**

1. Streeter, V., E. Benjamin, and K. Bedford, *Mecánica de Fluidos*. Novena Edición ed. 2000, Santafé de Bogotá, Colombia: McGraw-Hill, Best Seller International, S.A.
2. Martínez, V., Monteagudo, J. y Jáuregui, S. , *Mecánica de los Fluidos y Máquinas de Flujo*. 2007, Cienfuegos, Cuba: Universo Sur.
3. !!! INVALID CITATION !!!
4. Rossman, L.A., *EPANET 2.0 :Análisis hidráulico y de calidad en redes de distribución de agua*. 2002, Grupo IDMH. Departamento de Ingeniería Hidráulica y M.A. Universidad Politécnica de Valencia España. p. 206.
5. Hechavarría Hernández, J.R., *Optimización del diseño de redes hidráulicas bajo criterios técnicos - económicos*, in *Centro de Estudio CAD/CAM*. 2009, Universidad de Holguín: Holguín. p. 130.
6. Saldarriaga, J.G., *Hidráulica de tuberías*. 1998, Colombia: D'VINNIL TDA. 564.
7. Gerard Sanz, R.P., *BENCHMARK DE CONTROL Y SUPERVISI ´ ON DE REDES DE DISTRIBUCI ´ ON DE AGUA*. 2012.
8. Diego Moraleda, M.A.M., Juan Inacio Corcoles, Jose Tarjuelo, *Medidas de mejoras energeticas en las instalaciones de comunidades de regantes de Castilla- La Mancha*. 2006: España.
9. Hung, K.F., *USO DEL SOFTWARE EPANET 2.0 PARA EL DISEÑO DE REDES HIDRÁULICAS*, in *Facultad de Construcciones*

*Departamento de Ingeniería Hidráulica*. 2003, Universidad de Oriente. p. 10.

10. Pardo, M.A., et al. *Iniciación a la programación de un software de simulación hidráulica*. 2012. 18.
11. León Benitez, C., R. Arias Garcia, and S. Jáuragui Rigó. *Metodología para el análisis de empleo de variadores de velocidad en sistemas de bombeo*. in *Conferencia Internacional, FIE 2002*. 2002. Santiago de Cuba, Cuba.
12. Alcaraz, M.d.M.G., *Modelación y Simulación de Redes Hidráulicas a presión mediante herramientas informáticas.*, in *Ingeniería Técnica de Obras Públias*. 2006, Universidad Politécnica de cartagena: Cartgena.
13. Mario Kyriakou, D.E. *Epanet-Matlab Class*. 2014.
14. Marios Kyriakou, D.E. *EPANET-Matlab-Class*. Available from: <https://github.com/KIOS-Research/EPANET-Matlab-Class>.
15. <http://www.epanet.upv.es/>. Available from: <http://www.epanet.upv.es/>.
16. Haestad, "User's manual WaterCAD 8.0", *Water Distribution Modeling & Management Software*. 2009: USA.
17. MULTION, *Matlab para cómputo científico y técnico*. 2013.
18. Petitjean, R., *Equilibrado de los bucles de control*. 1999, Suecia: Tour & Andersson AB 52.
19. Petitjean, R., *Equilibrado de los sistemas de distribución*. 2000, Suecia: Tour & Andersson AB. 71.
20. Petitjean, R., *Equilibrado hidráulico con controladores de presión diferencial*. 2002, Suecia: Tour & Andersson AB 63.
21. Oficina Nacional de Normalización, *NC-45- 1-3 Bases del diseño para el turismo*. 1999.



22. Aguirre, A., *Ingeniería Hidráulica aplicada a los sistemas de distribución de agua* Vol. I. 1996, Valencia, España: Departamento de Mecánica de Fluidos, Universidad Politécnica de Valencia.
23. Espinosa, Y.V., *Eficiencia Frecuencia en Accionamiento con Bombas Centrifugas*, in *Ingeniería Eléctrica*. 2000, ISMM: Moa.
24. ATLÁNTICO, U.D., et al. *Ahorro de energía en sistemas de bombas centrifugas*. 30.
25. Company, M., *Tutorial de MATLAB*. 2013. p. 4.
26. Nekrasov, B., *Hidráulica*. 1990, Moscú, Rusia: Editorial Mir.
27. Laurencio, R.M., *PROCEDIMIENTO PARA LA OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE LA OPERACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CLIMATIZACIÓN CENTRALIZADOS TODO-AGUA EN HOTELES*, in *FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA CENTRO DE ESTUDIO DE ENERGÍA Y TECNOLOGÍA AVANZADA DE MOA*. 2013, INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA "DR. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ".
28. Schneider, *Variadores de velocidad para motores asíncronos Altivar 31: Guía de programación*. 2008. p. 75.
29. *THE MATHWORKS*. 2015; Available from: [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com).
30. FRIOCLIMA, *Enfriadoras de agua de condensación por aire con compresores alternativos y baterías de condensadores en W*. 2002.
31. AERMEC, *FAN COIL FCX*. 2008.

# ANEXOS

**ANEXO 1**

**EJEMPLO DE LA LITERATURA QUE SE RESUELVE CON LA APLICACIÓN HECHA EN EL GUI DEL MATLAB**

La red mostrada en la Figura 1 tiene una válvula en la tubería 2-3, la cual se encuentra parcialmente cerrada y produce una pérdida menor local de  $10.0 V^2/2g$ , la presión en el punto 1 es 100 mca. Se puede suponer que en todos los tubos, salvo en el tramo 2-3 las pérdidas menores son despreciables. Los demás datos se muestran en la Figura 1.

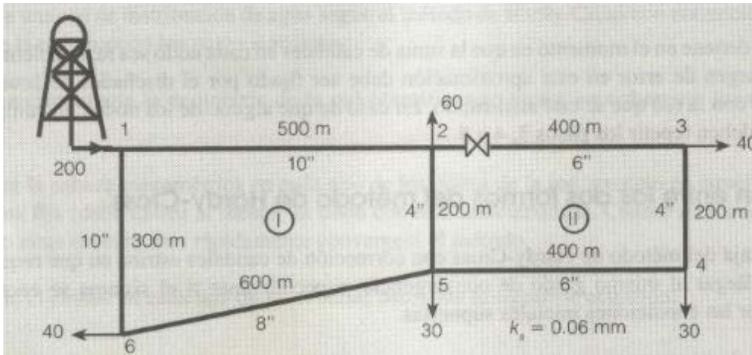


Figura 1. Red hidráulica para resolver mediante el Método del Gradiente [6].

#	ID Tuberías	Diametro millimeters	Flujo LPS	#	ID Nodos	Altura meters	Presión METERS
1	4	6	0,10665	1	3	-28568.6	92,914
2	5	4	0,0366	2	4	-46561.4	81,242
3	6	6	0,0034	3	5	-125529	81,667
4	7	4	0,0334	4	6	-30540.2	89,746
5	8	8	0,01005	5	7	-3791.73	96,705
6	2	10	0,05336	6	8	-28572.6	
7	3	10	0,09336	7	2	299,995	
8	9	300		8	1	300	
9	1	6.761		9			
10				10			
11				11			
12				12			
13				13			
14				14			
15				15			
16				16			
17				17			

Figura 2. Resultado del cálculo de la red en el GUI hecho en Matlab

**Anexo 1:** Propiedades físicas del agua expresada la temperatura en grados Celsius.



<b>Temperatura del agua.</b>	<b>Presión de Saturación.</b>	<b>Volumen específico.</b>	<b>Densidad</b>
t	p'	$V \times 10^3$	$\rho$
Grados centígrados.	Bar absoluto.	Decímetros cúbicos por kilogramo	Kilogramos por metros cúbicos.
0.01	0.006112	10.002	999.8
5	0.008719	10.001	999.9
10	0.012271	10.003	999.7
15	0.017041	10.010	999.0
20	0.023368	10.018	998.2
25	0.031663	10.030	997.0
30	0.042418	10.044	995.6
35	0.056217	10.060	994.0
40	0.073750	10.079	992.2
45	0.09582	10.099	990.2
50	0.12335	10.121	988.0
55	0.15740	10.145	985.7
60	0.19919	10.171	983.2
65	0.25008	10.199	980.5
70	0.31160	10.228	977.7
75	0.38547	10.258	974.8
80	0.47359	10.290	971.8
85	0.57803	10.324	968.6
90	0.70109	10.359	965.3
95	0.84526	10.396	961.9
100	101.325	10.435	958.3
110	14.326	10.515	951.0
120	19.853	10.603	943.1
130	27.012	10.697	934.8
140	36.136	10.798	926.1
150	47.597	10.906	916.9
160	61.805	11.021	907.4
170	79.203	11.144	897.3
180	100.271	11.275	886.9



### ANEXO 3

#### **CARACTERÍSTICAS OPERACIONALES Y PARÁMETROS DE LAS UNIDADES TERMINALES (FAN-COIL)**

Las unidades terminales más utilizadas en los SCCAH son los fan-coil. Estas unidades para las condiciones tropicales solo trabajan para climatizar, por lo que se le denomina de dos tubos. Estas unidades terminales pueden trabajar asociadas a sistemas a flujo constante (válvulas de control de tres vías) o en sistemas a flujo variable (válvulas de control de dos vías). En la Figura 1 aparece una vista general de los fan-coil básicos modelos FBHA de FRIOCLIMA. Estas unidades son las más utilizadas en Cuba en toda su variedad de capacidades.

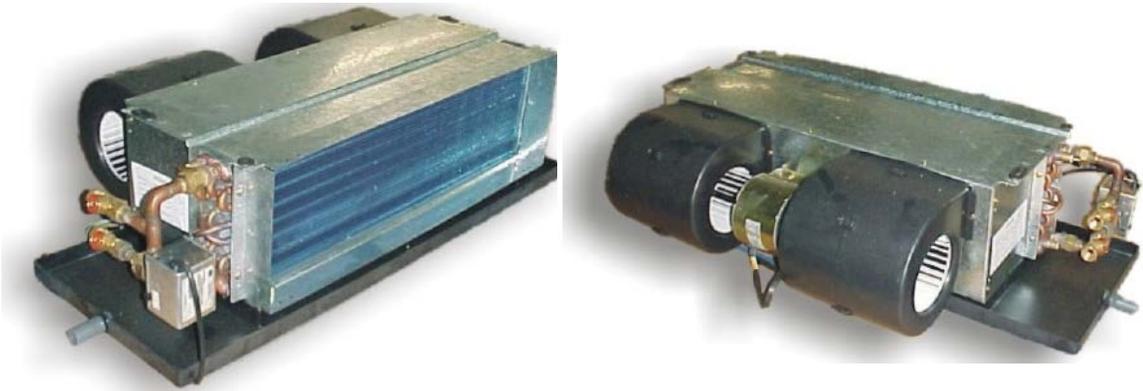


Figura 1. Unidades terminales básicas fan-coil modelos FBHA [30].

#### **Unidades terminales emplazadas en el hotel caso de estudio (FCX 42 y FCX 50)**



Figura 2. Unidades terminales de la familia FCX [31].

Tabla 1. Datos técnicos de las unidades terminales de diferentes capacidades [31].

**FCX A-AS-ACT-APC-ACB-U-P with 3-row coil**

Mod.		FCX 17	FCX 22	FCX 32	FCX 42	FCX 50	FCX 62	FCX 82	FCX 102
<b>Heating</b>									
Heating capacity	W (max.)	2490	3400	4975	7400	8620	12920	15140	17020
	W (med.)	2070	2700	4085	6415	7530	10940	13350	15240
	W (min.)	1610	1915	3380	5115	5420	8330	10770	12560
Heating capacity* (water inlet 50°C)	W (E)	1360	2100	3160	4240	4900	6460	7990	9670
Heating capacity (accessory RX)	W	700	950	1300	1650	1950	2200	2200	2200
Water flow rate	l/h	214	292	427	636	741	1110	1300	1464
Water pressure drop	kPa	2,8	6,3	14,2	14,1	14,2	14,8	19,8	16,6
<b>Cooling</b>									
Total cooling capacity	W (max.) (E)	1000	1500	2210	3400	4190	4860	7420	7620
	W (med.)	890	1330	2055	2800	3640	4660	5500	7140
	W (min.)	720	1055	1570	2310	2840	3950	4710	6270
Sensible cooling capacity	W (max.) (E)	830	1240	1750	2760	3000	3980	5680	5980
	W (med.)	710	1055	1540	2115	2750	3510	4250	4984
	W (min.)	540	755	1100	1635	2040	2825	3450	4263
Water flow rate	l/h	172	258	380	585	721	836	1276	1311
Water pressure drop	kPa (E)	2,6	5,8	16,6	14,3	19,3	11,6	13,5	19,2
Air flow rate	m <sup>3</sup> /h (max.)	200	290	450	600	720	920	1140	1300
	m <sup>3</sup> /h (med.)	160	220	350	460	600	720	930	1120
	m <sup>3</sup> /h (min.)	110	140	260	330	400	520	700	900
Fans	n.	1	1	2	2	2	3	3	3
Sound pressure	dB (A) (max.)	36,5	41,5	39,5	42,5	47,5	48,5	53,5	57,5
	dB (A) (med.)	29,5	34,5	32,5	35,5	42,5	42,5	48,5	52,5
	dB (A) (min.)	22,5	22,5	25,5	28,5	33,5	33,5	41,5	47,5
Sound power	dB (A) (max.) (E)	45	50	48	51	56	57	62	66
	dB (A) (med.) (E)	38	43	41	44	51	51	57	61
	dB (A) (min.) (E)	31	31	34	37	42	42	50	56
Water contents	l	0,58	0,79	1,11	1,48	1,48	2,52	2,52	2,52
Max. motor power	W (E)	35	25	44	57	67	82	106	131
Max. input current	A	0,16	0,12	0,21	0,28	0,35	0,40	0,49	0,58
Max. motor power with electric heater	W	735	975	1344	1707	2017	2282	2306	2331
Input current with electric heater	A	3,2	4,25	5,86	7,45	8,83	9,97	10,06	10,15
Coil connections 3R	ø	1/2"	1/2"	1/2"	3/4"	3/4"	3/4"	3/4"	3/4"
Coil connections 1R	ø	1/2"	1/2"	1/2"	1/2"	1/2"	1/2"	1/2"	1/2"



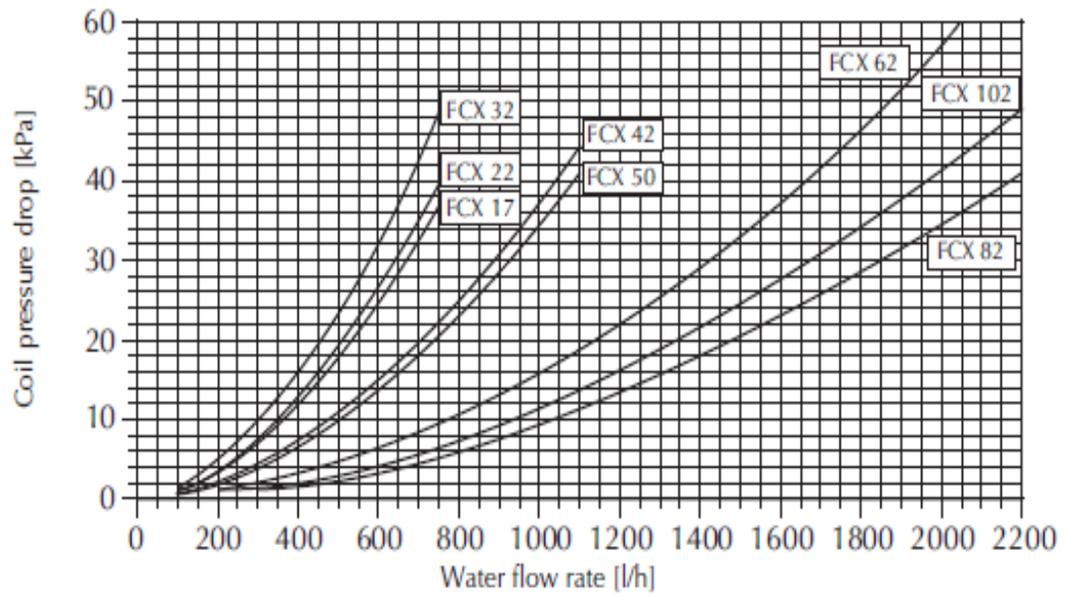


Figura 3. Caída de presión en las unidades terminales con relación al flujo [31].

ANEXO 4

ESPECIFICACIONES DE LAS VÁLVULAS PARA EL EQUILIBRADO DE LAS REDES HIDRÁULICAS

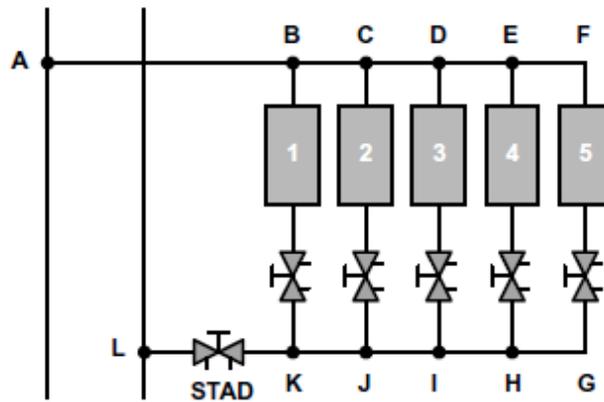


Figura 1. Módulo de equilibrado formado por un ramal con varios terminales [19].



Figura 2. Válvulas de equilibrado y reguladores de presión [18].

Tabla 1. Relación Kv y número de vueltas de las válvulas STA-DR DN 15, 20 y 25 [18].

**STA-DR**

Vueltas	DN 15, 20	DN 25
0.5	-	0.210
1	0.107	0.361
1.5	0.172	0.520
2	0.362	1.02
2.5	0.645	1.85
3	1.16	3.00
3.5	1.78	3.70
4	2.00	4.01

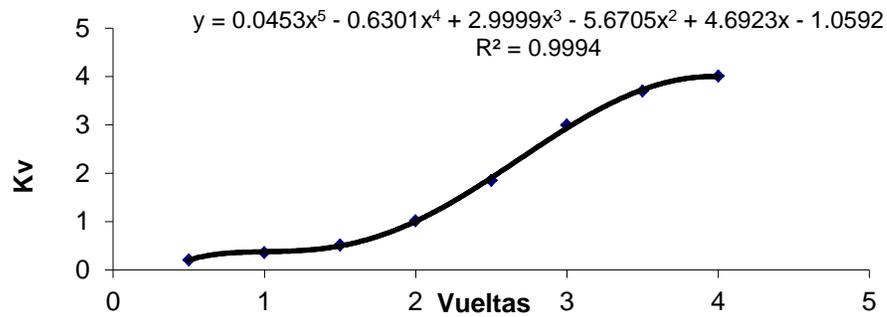


Figura 3. Relación Kv y número de vueltas de la válvula STA-DR DN 25.

Tabla 2. Relación Kv y número de vueltas de diferentes válvulas de equilibrado con diámetros nominales desde 10 hasta 50 mm [18].

**Valores Kv**

**STAD, STADA, STAD-C, STA**

Vueltas	DN 10/09	DN 15/14	DN 20	DN 25	DN 32	DN 40	DN 50
0.5	-	0.127	0.511	0.60	1.14	1.75	2.56
1	0.090	0.212	0.757	1.03	1.90	3.30	4.20
1.5	0.137	0.314	1.19	2.10	3.10	4.60	7.20
2	0.260	0.571	1.90	3.62	4.66	6.10	11.7
2.5	0.480	0.877	2.80	5.30	7.10	8.80	16.2
3	0.826	1.38	3.87	6.90	9.50	12.6	21.5
3.5	1.26	1.98	4.75	8.00	11.8	16.0	26.5
4	1.47	2.52	5.70	8.70	14.2	19.2	33.0

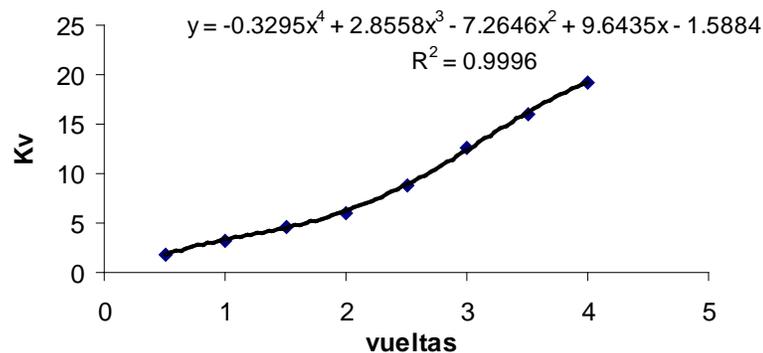


Figura 4. Relación Kv y número de vueltas de la válvula STAD DN 40.

Tabla 3. Relación Kv y número de vueltas de diferentes válvulas de equilibrado con diámetros nominales desde 20 hasta 80 mm [18].

Valores Kv							
Pos.	DN						
	20	25	32	40	50	65-2	80
0,5	0,511	0,60	1,14	1,75	2,56	1,8	2
1	0,757	1,03	1,90	3,30	4,2	3,4	4
1,5	1,19	2,10	3,10	4,60	7,2	4,9	6
2	1,90	3,62	4,66	6,10	11,7	6,5	8
2,5	2,80	5,30	7,10	8,80	16,2	9,3	11
3	3,87	6,90	9,50	12,6	21,5	16,3	14
3,5	4,75	8,00	11,8	16,0	26,5	25,6	19,5
4	5,70	8,70	14,2	19,2	33	35,3	29
4,5	-	-	-	-	-	44,5	41
5	-	-	-	-	-	52	55
5,5	-	-	-	-	-	60,5	68
6	-	-	-	-	-	68	80
6,5	-	-	-	-	-	73	92
7	-	-	-	-	-	77	103
7,5	-	-	-	-	-	80,5	113
8	-	-	-	-	-	85	120

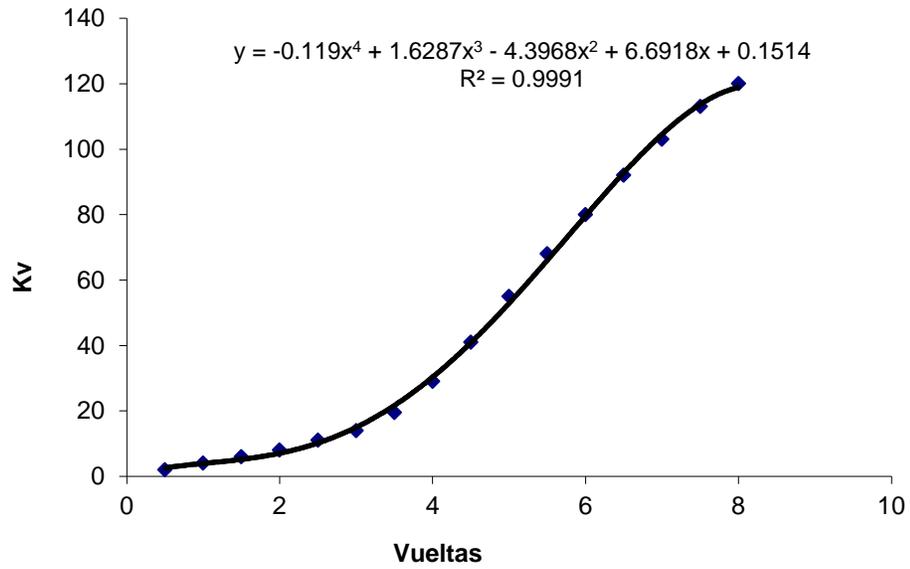


Figura 5. Relación Kv y número de vueltas de la válvula STAF DN 80.

**Anexo 5 Simulación en EPAnet de la red hidráulica cerrada**

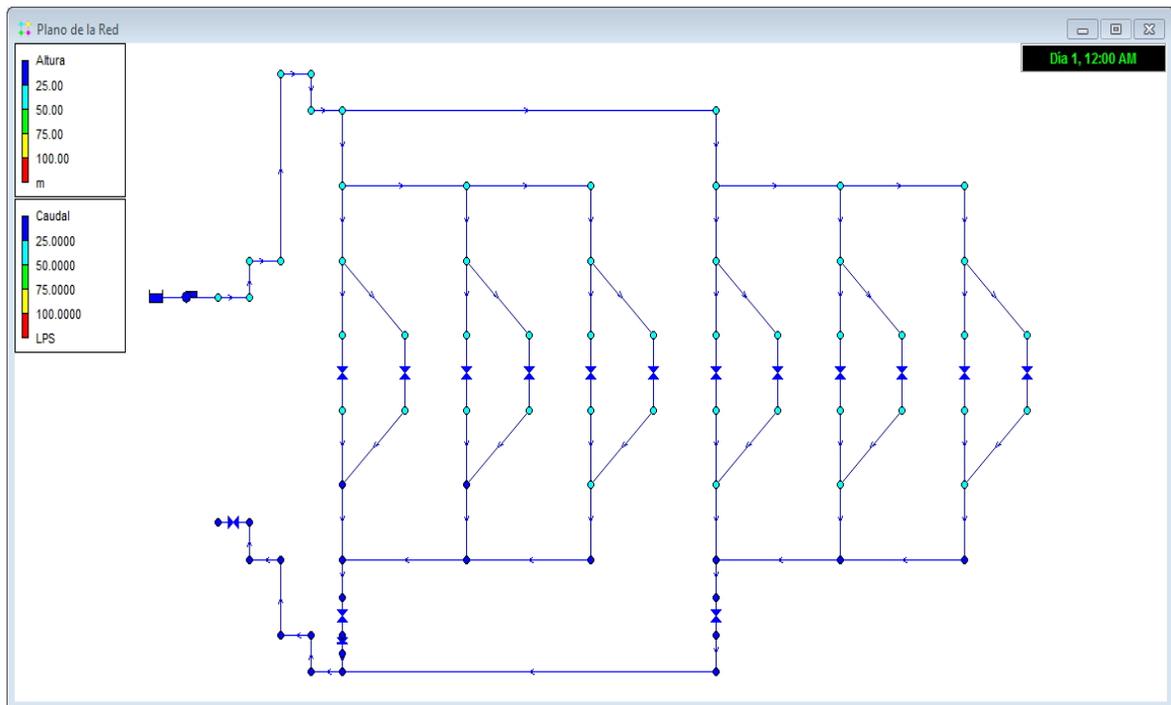
ID Línea	Nudo Inicial	Nudo Final	Longitud m	Diámetro mm
1	32	72	0.01	25.4
2	72	18	1.2	25.4
3	18	10	81	76.2
4	10	70	3.1	76.2
5	70	71	7	76.2
6	71	11	11.8	76.2
7	30	18	8	76.2
8	17	31	1.05	25.4
9	69	30	1.2	38
10	65	68	1.05	38
11	64	67	1.65	12.7
12	61	64	6.38	12.7
13	60	64	3.85	12.7
14	67	66	3.1	19.05
15	66	65	3.1	25.4
16	63	66	1.65	12.7
17	59	63	6.38	12.7
18	58	63	3.85	12.7
19	62	65	1.65	12.7
20	57	62	6.38	12.7
21	56	62	3.85	12.7
22	51	55	5.4	12.7
23	51	54	4.05	12.7
24	49	51	2.5	12.7
25	50	53	5.4	12.7
26	50	52	4.05	12.7
27	48	50	2.5	12.7
28	48	49	3.1	19.05
29	47	48	3.1	25.4
30	46	45	5.4	12.7
31	46	41	4.05	12.7
32	47	46	2.5	12.7
33	2	47	2.25	38



ID	Nudo	Nudo	Longitud	Diámetro
Línea	Inicial	Final	m	mm
34	1	2	8	76.2
35	44	22	1.65	12.7
36	39	44	6.38	12.7
37	38	44	3.85	12.7
38	43	21	1.65	12.7
39	36	43	6.38	12.7
40	35	43	3.85	12.7
41	42	17	1.65	12.7
42	34	42	6.38	12.7
43	33	42	3.85	12.7
44	25	40	5.4	12.7
45	25	37	4.05	12.7
46	20	25	2.5	12.7
47	24	29	5.4	12.7
48	24	28	4.05	12.7
49	19	24	2.5	12.7
50	23	26	4.05	12.7
51	23	27	5.4	12.7
52	16	23	2.5	12.7
53	22	21	3.1	19.05
54	21	17	3.1	25.4
55	19	20	3.1	19.05
56	16	19	3.1	25.4
57	1	16	2.25	25.4
58	11	12	98.9	76.2
59	12	13	2.35	76.2
60	3	1	81	76.2
61	4	3	3.1	76.2
62	5	4	7	76.2
63	6	5	11.8	76.2
64	8	7	2.35	76.2
65	7	6	98.9	76.2
66	9	8	0.65	76.2

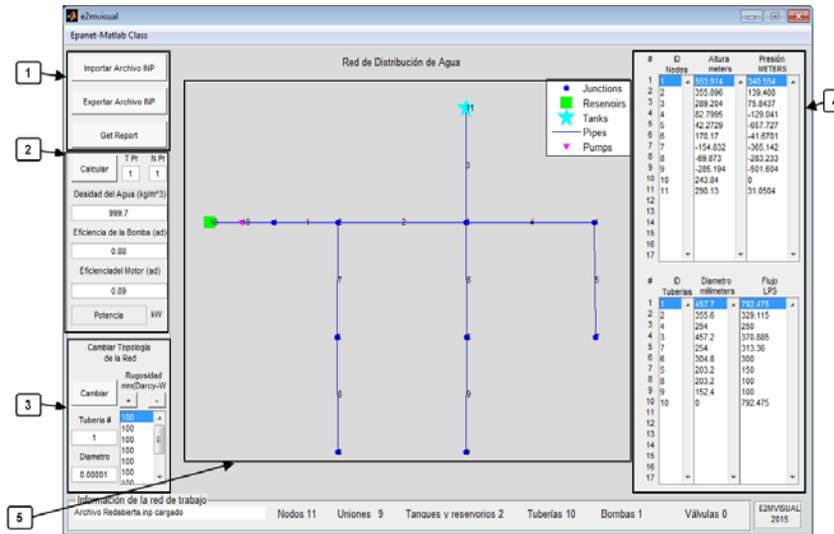


67	15	9	No Disponible	No Disponible Bomba
68	68	69	No Disponible	38 Válvula
69	31	32	No Disponible	25.4 Válvula
70	55	61	No Disponible	12.7 Válvula
71	54	60	No Disponible	12.7 Válvula
72	53	59	No Disponible	12.7 Válvula
73	52	58	No Disponible	12.7 Válvula
74	45	57	No Disponible	12.7 Válvula
75	41	56	No Disponible	12.7 Válvula
76	40	39	No Disponible	12.7 Válvula
77	37	38	No Disponible	12.7 Válvula
78	29	36	No Disponible	12.7 Válvula
79	28	35	No Disponible	12.7 Válvula
80	27	34	No Disponible	12.7 Válvula



**Figura Red ColWater diseñada en EPANet**

**Anexo 6 Aplicación creada en el GUI del Matlab**



**Figura 1 GUI de la aplicación: 1) botones de importar, exportar archivo y botón para guardar los resultados de la red, 2) área para introducir los valores del cálculo de potencia, 3) área para cambiar el diámetro de las tuberías y la rugosidad de las mismas, 4) área para mostrar los valores de presión y pérdidas en los nodos, caudal y diámetro de las tuberías, 5) área para mostrar el modelo de la red.**

**Script principales de la aplicación**

```

%% Funcion
function varargout = e2mvisual(varargin)
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
    'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
    'gui_OpeningFcn', @e2mvisual_OpeningFcn, ...
    'gui_OutputFcn',  @e2mvisual_OutputFcn, ...
    'gui_LayoutFcn',  [] , ...
    'gui_Callback',   []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end
if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{24});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{24});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT
%% Executes just before e2mvisual is made visible.
function e2mvisual_OpeningFcn(hObject, ~, handles, varargin)

```



```

%para inicializar sin coordenadas
axis off,hold on
% fin
% para centrar el GUI
scrsz = get(0, 'ScreenSize');
pos_act=get(gcf,'Position');
xr=scrsz(3) - pos_act(3);
xp=round(xr/2);
yr=scrsz(4) - pos_act(4);
yp=round(yr/2);
set(gcf,'Position',[xp yp pos_act(3) pos_act(4)]);
%fin
handles.output = hObject;
% Update handles structure
guidata(hObject, handles);
%% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = e2mvisual_OutputFcn( ~, ~, handles)
varargout{1} = handles.output;
%% Executes on button press in import_inp.
function import_inp_Callback(hObject, ~, handles)
global d; % declaracion de la variable global
global File_inp
[File_inp, Path_inp]=uigetfile({'*.inp'}, 'Cargar archivo con extensión
.inp');
if isequal(File_inp,0)
return
else
copyfile([Path_inp,File_inp],[pwd,'\NETWORKS\',File_inp], 'f')
%movefile('TestReport2.txt',[pwd,'\RESULTS\', 'TestReport2.txt']);
%winopen File_inp;
d=epanet(File_inp);
handles.File_inp = File_inp;
set(handles.status_inp_file, 'string', ['Archivo ',File_inp, '
cargado'])
set(handles.id_nodes, 'String', d.getNodeNameID);
set(handles.status_link, 'String', d.getLinkDiameter);
set(handles.link_id, 'String', d.getLinkNameID);
set(handles.rug, 'String', d.getLinkRoughnessCoeff);
%% barra de proseso
steps = 100;
h = waitbar(0,'1','Name','Abriendo archivo INP...',...
'CreateCancelBtn',...
'setappdata(gcf,'canceling',1)');
setappdata(h,'canceling',0)
denom = 1;
incremento = steps;
for step = 1:steps
% Check for Cancel button press

```



```

    if getappdata(h,'canceling')
        break
    end
    % Report current estimate in the waitbar's message field
    waitbar(step/steps,h,sprintf(['Abriendo archivo, por favor
esperere... ', '%f'], incremento))
    % Update the estimate
    incremento = denom;
    denom = denom +1;
end
delete(h) % DELETE the waitbar; don't try to CLOSE it.
% fin de barra de proceso
    %% Create plot in proper axes
    %falta poner la grafica en el plot_inp
    d.plot('nodes','yes','links','yes','fontsize',8),title 'Red de
Distribución de Agua';
    %% num de nodos
    numerosdenodos = d.getNodeCount;
    set(handles.count_nodes, 'String', numerosdenodos);
    %% num de tanques
    numerosdetanks = d.getNodeTankReservoirCount;
    set(handles.count_tanks, 'String', numerosdetanks);
    %% num de tuberías
    numerosdelinks = d.getLinkCount;
    set(handles.count_pipes, 'String', numerosdelinks);
    %% num de uniones
    numerosdejunctions = d.getNodeJunctionsCount;
    set(handles.count_junctions, 'String', numerosdejunctions);
    %% num de bombas
    numerosdepumps = d.getLinkPumpCount;
    set(handles.count_pumps, 'String', numerosdepumps);
    %% num de valvulas
    numerosdeValves = d.getLinkValveCount;
    set(handles.count_valves, 'String', numerosdeValves);
    %UNIDADES DE MEDIDAD
    %PRESIÓN
    u_p=d.NodePressureUnits;
    set(handles.u_p, 'String', u_p);
    %Flujo
    u_f=d.LinkFlowUnits;
    set(handles.u_f, 'String', u_f);
    %Diametro
    u_d=d.LinkPipeDiameterUnits;
    set(handles.u_d, 'String', u_d);
    %Altura
    u_a=d.NodeHeadUnits;
    set(handles.u_a, 'String', u_a);
    %Rugosidad
  
```



```

    r_u=d.LinkPipeRoughnessCoeffUnits;
    set(handles.r_u,'String', r_u)
    %Correr epanet-matlab Class
    d.solveCompleteHydraulics
    %muestra los valores actualizados
    set(handles.status_link, 'String', d.getLinkDiameter);
    set(handles.flujo, 'String', d.getLinkFlows);
    set(handles.link_id,'String', d.getLinkNameID);
    set(handles.presion_nodes, 'String', d.getNodePressure);
    set(handles.status_nodes, 'String', d.getNodeHydraulicHead);
end
guidata(hObject, handles);
%% --- Executes on button press in export_file_inp.
function export_file_inp_Callback(hObject, eventdata, handles)
global d;
[File_export_inp, Path_export_inp]=uinputfile({'*.inp'}, 'Exportar
archivo .inp');
if isequal(File_export_inp,0)
    return
else
    d.saveInputFile([Path_export_inp,File_export_inp]);
end
%% fin
% --- Executes on button press in report.
function report_Callback(hObject, eventdata, handles)
global d;
d.setReportFormatReset
d.setReport('NODES ALL')
d.setReport('LINKS ALL')
d.setReport('ENERGY YES')
d.setReport('DEMAND YES')
d.setReport('PRESSURE YES')
d.setReport('PRESSURE PRECISION 1')
d.setReport('FLOW YES')
d.saveInputFile([pwd, '\NETWORKS\', 'InputFileRep.inp']);
%open('InputFileRep.inp');
d=epanet('InputFileRep.inp');
copyfile([pwd, '\LIBRARIES\', 'epanet2d.exe'], [pwd, '\RESULTS\', 'epanet2d.
exe']);
fid = fopen('ReportEpanet.bat', 'w');
r = sprintf('cd RESULTS \nepanet2d %s %s', 'temp.inp', 'temp.txt');
fprintf(fid, '%s \n', r);fclose all;
!ReportEpanet.bat
movefile('ReportEpanet.bat', [pwd, '\RESULTS\', 'ReportEpanet.bat']);
copyfile([pwd, '\RESULTS\', 'temp.txt'], [pwd, '\RESULTS\', 'TestReport8.txt
']);
open('TestReport8.txt')
d.unload

```



```

guidata(hObject,handles); %Salvar datos de la aplicación
%Introducir densidad
function densidad_Callback(hObject, eventdata, handles)
NewStrVal=get(hObject,'String'); %Almacenar valor ingresado
NewVal = str2double(NewStrVal); %Transformar a formato double
handles.densidad=NewVal; %Almacenar en puntero
guidata(hObject,handles); %Salvar datos de la aplicación
%introducir eficiencia de la bomba
function n_bomba_Callback(hObject, eventdata, handles)
NewStrVal=get(hObject,'String'); %Almacenar valor ingresado
NewVal = str2double(NewStrVal); %Transformar a formato double
handles.n_bomba=NewVal; %Almacenar en puntero
guidata(hObject,handles); %Salvar datos de la aplicación
%Introducir eficiencia del motor
function n_motor_Callback(hObject, eventdata, handles)
NewStrVal=get(hObject,'String'); %Almacenar valor ingresado
NewVal = str2double(NewStrVal); %Transformar a formato double
handles.n_motor=NewVal; %Almacenar en puntero
guidata(hObject,handles); %Salvar datos de la aplicación
% --- Executes on button press in pushbutton8. Calculo de potencia
function pushbutton8_Callback(hObject, eventdata, handles)
global d;
Q=d.getLinkFlows;
n=handles.link_prinsipal; %tubería principal
w=handles.nodo_prinsipal;
H=d.getNodeHydraulicHead;
L=d.LinkNameID;
NP=d.getNodeNameID;
np=NP(1,w);
l=L(1,n);
q=Q(1,n);%caudal
h=H(1,w);%altura de carga en m
g=9.80665;
D=handles.densidad; %densidad del fluido
b=handles.n_bomba; %eficiencia de la bomba
m=handles.n_motor; %eficiencia del motor
% Calculo de Potencia
Potencia=(D*q*h*g*0.001)/(1000*b*m);
d.plot('nodes','yes','links','yes','highlightnode',{np},'highlightlink',
{1},'fontsize',8),title 'Red de Distribución de Agua';
set(handles.potencia,'String',Potencia);
function pipe_number_Callback(hObject, eventdata, handles)
NewStrVal=get(hObject,'String'); %Almacenar valor ingresado
NewVal = str2double(NewStrVal); %Transformar a formato double
handles.pipe_number=NewVal; %Almacenar en puntero
guidata(hObject,handles); %Salvar datos de la aplicación
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
Introducir id de tubería a cambiar el diametro

```



```

function diametro_node_number_Callback(hObject, eventdata, handles)
NewStrVal=get(hObject,'String'); %Almacenar valor ingresado
NewVal = str2double(NewStrVal); %Transformar a formato double
handles.diametro_node_number=NewVal; %Almacenar en puntero
guidata(hObject,handles); %Salvar datos de la aplicación
% --- Cambiar diámetro d las tuberías
function topologia_Callback(hObject, eventdata, handles)
global d;
    A=handles.pipe_number;
    B=handles.diametro_node_number;
    dmt=d.getLinkDiameter;
    dmt(A)=B;
    d.setLinkDiameter(dmt);
    d.getLinkDiameter;
    set(handles.status_link, 'String', d.getLinkDiameter);
    L=d.LinkNameID;
    l=L(1,A);
    NP=d.getNodeNameID;
    d.solveCompleteHydraulics
    set(handles.flujo, 'String', d.getLinkFlows);
    set(handles.presion_nodes, 'String', d.getNodePressure);
    set(handles.status_nodes, 'String', d.getNodeHydraulicHead);
    Q=d.getLinkFlows;
    H=d.getNodeHydraulicHead;
    n=handles.link_prinsipal;
    w=handles.nodo_prinsipal;
    np=NP(1,w);
    T=d.LinkNameID;
    t=T(1,n);
    q=Q(1,n);%caudal
    h=H(1,w);%alturaen m
    g=9.80665;
    D=handles.densidad; %densidad del fluido
    b=handles.n_bomba; %eficiencia de la bomba
    m=handles.n_motor; %eficiencia del motor
% Calculo de Potencia
    Potencia=(D*q*h*g*0.001)/(1000*b*m);
d.plot('nodes','yes','links','yes','highlightnode',{np},'highlightlink'
,{l,t},'fontsize',8),title 'Red de Distribución de Agua';
    set(handles.potencia,'String',Potencia)
%Introducir ID de tubería prinsipal
function link_prinsipal_Callback(hObject, eventdata, handles)
NewStrVal=get(hObject,'String'); %Almacenar valor ingresado
NewVal = str2double(NewStrVal); %Transformar a formato double
handles.link_prinsipal=NewVal; %Almacenar en puntero
guidata(hObject,handles); %Salvar datos de la aplicación
% --- Executes on button press in rest.
function rest_Callback(hObject, eventdata, handles)
  
```



```

global d;
    d.setLinkRoughnessCoeff(d.getLinkRoughnessCoeff-0.1);
    set(handles.rug, 'String', d.getLinkRoughnessCoeff);
    d.solveCompleteHydraulics
    set(handles.flujo, 'String', d.getLinkFlows);
    set(handles.presion_nodes, 'String', d.getNodePressure);
    set(handles.status_nodes, 'String', d.getNodeHydraulicHead);
    Q=d.getLinkFlows;
    H=d.getNodeHydraulicHead;
    n=handles.link_prinsipal;
    w=handles.nodo_prinsipal;
    q=Q(1,n);%caudal
    h=H(1,w);%alturaen m
    g=9.80665;
    D=handles.densidad; %densidad del fluido
    b=handles.n_bomba; %eficiencia de la bomba
    m=handles.n_motor; %eficiencia del motor
% Calculo de Potencia
    Potencia=(D*q*h*g*0.001)/(1000*b*m);
    set(handles.potencia, 'String', Potencia)
% --- Executes on button press in sum. Aumentar rugosidad
function sum_Callback(hObject, eventdata, handles)
global d;
    d.getLinkRoughnessCoeff;
    d.setLinkRoughnessCoeff(0.1+d.getLinkRoughnessCoeff);
    set(handles.rug, 'String', d.getLinkRoughnessCoeff);
    d.solveCompleteHydraulics
    set(handles.flujo, 'String', d.getLinkFlows);
    set(handles.presion_nodes, 'String', d.getNodePressure);
    set(handles.status_nodes, 'String', d.getNodeHydraulicHead);
    Q=d.getLinkFlows;
    H=d.getNodeHydraulicHead;
    n=handles.link_prinsipal;
    w=handles.nodo_prinsipal;
    q=Q(1,n);%caudal
    h=H(1,w);%alturaen m
    g=9.80665;
    D=handles.densidad; %densidad del fluido
    b=handles.n_bomba; %eficiencia de la bomba
    m=handles.n_motor; %eficiencia del motor
% Calculo de Potencia
    Potencia=(D*q*h*g*0.001)/(1000*b*m);
    set(handles.potencia, 'String', Potencia)
function nodo_prinsipal_Callback(hObject, eventdata, handles)
NewStrVal=get(hObject, 'String'); %Almacenar valor ingresado
NewVal = str2double(NewStrVal); %Transformar a formato double
handles.nodo_prinsipal=NewVal; %Almacenar en puntero
guidata(hObject,handles); %Salvar datos de la aplicación

```

