



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Dpto. de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

Desarrollo de un software para el análisis energético de
redes de agua a presión

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

AUTOR/A: Bravo Burbano, Darwin Javier

Tutor/a: Gómez Sellés, Elena

Cotutor/a: Del Teso March, Roberto

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022

Trabajo Fin de Máster

DESARROLLO DE UN SOFTWARE PARA EL ANÁLISIS ENERGÉTICO DE REDES DE AGUA A PRESIÓN

Intensificación: *HIDRÁULICA URBANA*

Autor:

DARWIN JAVIER BRAVO BURBANO

Tutor:

DRA. ELENA GÓMEZ SELLÉS

Cotutor/es:

DR. ROBERTO DEL TESO MARCH

SEPTIEMBRE, 2022



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma

Resumen del Trabajo de Fin de Máster

Datos del proyecto
Título del TFM en español: Desarrollo de un software para el análisis energético de redes de agua a presión
Título del TFM en inglés: Development of a software for the energy analysis of pressurized water networks
Título del TFM en Valenciano: -Desenvolupament d'un programa informàtic per a l'anàlisi energètic de xarxes d'aigua a
Alumno: DARWIN JAVIER BRAVO BURBANO.
Tutor: DRA. ELENA GÓMEZ SELLÉS
Cotutor/es: DR. ROBERTO DEL TESO MARCH
Fecha de Lectura: SEPTIEMBRE, 2022

Resumen
Resumen
Se propone desarrollar un programa informático en el lenguaje Visual Basic.net , con el objetivo que automatice los cálculos de la auditoría hídrica y energética de sistemas presurizados de agua, ya sean estos sistemas de agua potable o riego. Esta herramienta parte de cualquier configuración de modelo de la red, que debe estar previamente calibrada en EPANET. Los resultados entregados por el programa serán numéricos y gráficos estadísticos (gráficos de barras, gráficos de pastel, etc) permitiendo una visualización e interpretación fácil y sencilla de cómo se descompone la energía consumida

por la red. Además, el programa integrará una serie de indicadores que permitan entender el estado hídrico y energético de la red.

Por tanto, el presente trabajo, se centra en la programación y desarrollo de un programa informático que permita calcular a partir de un archivo de EPANET la auditoría energética propuesta en "Energy audits of water networks", de Cabrera et al., 2010 y los desarrollos posteriores que se han ido haciendo sobre ésta (Cabrera et al., 2015; del Teso et al., 2019). Este software pretende ser una herramienta que facilite al usuario el análisis energético de su sistema, de forma que a partir de los resultados arrojados por ésta pueda plantear mejoras que minimicen el gasto energético de la red. Esta herramienta se aplicará a una instalación real, para mostrar los resultados de la auditoría y los diferentes indicadores energéticos que muestra el software.

Resum

Es proposa desenvolupar un programa informàtic en el llenguatge Visual Basic.net , amb l'objectiu que automatitze els càlculs de l'auditoria hídrica i energètica de sistemes pressuritzats d'aigua, ja siguen aquests sistemes d'aigua potable o reg. Aquesta eina parteix de qualsevol configuració de model de la xarxa, que ha d'estar prèviament calibrada en *EPANET. Els resultats entregats pel programa seran numèrics i gràfics estadístics (gràfics de barres, gràfics de pastís, etc) permetent una visualització i interpretació fàcil i senzilla de com es descompon l'energia consumida per la xarxa. A més, el programa integrará una sèrie d'indicadors que permeten entendre l'estat hídric i energètic de la xarxa. Per tant, el present treball, se centra en la programació i desenvolupament d'un programa informàtic que permeta calcular a partir d'un arxiu de *EPANET l'auditoria energètica proposada en "*Energy *audits *of *water *networks", de Cabrera et al., 2010 i els desenvolupaments posteriors que s'han anat fent sobre aquesta (Cabrera et al., 2015; del *Teso et al., 2019).

Aquest programari pretén ser una eina que facilite a l'usuari l'anàlisi energètica del seu sistema, de manera que a partir dels resultats llançats per aquesta puga plantejar millores que minimitzen la despesa energètica de la xarxa.

Aquesta eina s'aplicarà a una instal·lació real, per a mostrar els resultats de l'auditoria i els diferents indicadors energètics que mostra el programari.

Abstract

It is proposed to develop a computer program in the Visual Basic.net language, with the aim of automating the calculations of the water and energy audit of pressurized water systems, whether they are drinking water or irrigation systems. This tool starts from any network model configuration, which must be previously calibrated in EPANET. The results delivered by the program will be numerical and statistical graphs (bar graphs, pie graphs, etc.) allowing an easy and simple visualization and interpretation of how the energy consumed by the network breaks down. In addition, the program will integrate a series of indicators that allow understanding the water and energy status of the network. Therefore, the present work focuses on the programming and development of a computer program that allows calculating, from an EPANET file, the energy audit proposed in "Energy audits of water networks", by Cabrera et al., 2010 and the subsequent developments that have been made on it (Cabrera et al., 2015; del Teso et al., 2019).

This software aims to be a tool that makes it easier for the user to analyze the energy of their system, so that, based on the results produced by it, they can propose improvements that minimize the energy consumption of the network. This tool will be applied to a real installation, to show the results of the audit and the different energy indicators shown by the software.

Palabras clave español (máximo 5): Auditoría energética, Auditoría hídrica, software, agua a presión

Palabras clave valenciano (máximo 5): Auditoria energètica, Auditoria hídrica, programari, aigua a pressió

Palabras clave inglés (máximo 5): Energy audit, water audit, software, pressurized wáter.

Índice de contenidos

<u>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN</u>	8
1.1. ANTECEDENTES	8
1.2. OBJETIVOS	9
<u>CAPÍTULO 2. INTRODUCCIÓN A LA CUESTIÓN</u>	10
2.1. AGUA Y ENERGÍA.	10
2.1.1. NEXO AGUA-ENERGÍA	10
2.1.2. AGUA Y ENERGÍA EN SISTEMAS PRESURIZADOS	12
2.2. AUDITORÍA ENERGETICA	13
2.3. EPANET	18
EPANET 2.2	19
<u>CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA PARA LA AUDITORIA ENERGETICA</u>	22
3.1. FUNDAMENTOS DE LA AUDITORÍA ENERGETICA	22
3.2. INDICADORES ENERGETICOS BÁSICOS	29
<u>CAPÍTULO 4. HERRAMIENTA INFORMÁTICA DESARROLLADA</u>	37
4.1. DATOS DE PARTIDA	37
CONSIDERACIONES AL INTERVALO DE CÁLCULO HIDRÁULICO	37
CONSIDERACIONES AL TIEMPO DE SIMULACIÓN	38
PRESIÓN DE SERVICIO	39
4.2. RESULTADOS DEL PROGRAMA	40
<u>CAPÍTULO 5. CASOS DE ESTUDIO</u>	43
5.1. DESCRIPCIÓN DE LOS CASOS	43
5.2. CONDICIONES DE CÁLCULO	49
5.3. RESULTADOS OBTENIDOS	50

BALANCE HÍDRICO	50
AUDITORÍA ENERGÉTICA	53
INDICADORES	60
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES	64
CAPÍTULO 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA	66

Índice Figuras

FIGURA 1. MODELO CONCEPTUAL DE LOS PROCESOS DEL SECTOR DEL AGUA QUE IMPLICAN EL USO DE LA ENERGÍA (FUENTE: (ROTHAUSEN & CONWAY, 2011)).....	10
FIGURA 2. BALANCE DE ENERGÍA PARA UNA FUENTE VARIABLE (A) Y UNA FUENTE RÍGIDA (B). FUENTE: DEL TESO ET AL. (2019).....	26
FIGURA 3. RED UTILIZADA COMO CASO DE ESTUDIO 1 CON LA NUMERACIÓN DE LOS NUDOS.	43
FIGURA 4. RED UTILIZADA COMO CASO DE ESTUDIO 1 CON LA NUMERACIÓN DE LAS LÍNEAS.....	44
FIGURA 5. MAPA DE CONTORNO DE COTAS DE NUDO.....	44
FIGURA 6. CURVA DE MODULACIÓN DIARIA EN LA RED DEL CASO DE ESTUDIO	46
FIGURA 7. RED UTILIZADA COMO CASO DE ESTUDIO 2 CON LA NUMERACIÓN DE LOS NUDOS.	47
FIGURA 8. PATRÓN DE VELOCIDAD DE LA BOMBA 23 DEL CASO 2.	48
FIGURA 9. PATRÓN DE VELOCIDAD DE LA BOMBA 24 DEL CASO 2.	49
FIGURA 10. PATRÓN DE VELOCIDAD DE LA BOMBA B25 DEL CASO 2.....	49
FIGURA 11. RESULTADOS QUE ENTREGA ITAENERGY2.0 SOBRE EL BALANCE HÍDRICO DEL CASO 1. ..	50
FIGURA 12. GRÁFICO DEL BALANCE HÍDRICO DEL CASO 1 QUE PRESENTA ITAENERGY2.0.....	51
FIGURA 13. RESULTADOS QUE ENTREGA ITAENERGY2.0 SOBRE LA ENERGÍA NATURAL DEL CASO 3... 53	53
FIGURA 14. RESULTADOS QUE ENTREGA ITAENERGY2.0 SOBRE LA ENERGÍA APORTADA POR LAS BOMBAS DEL CASO 3.	53
FIGURA 15. RESULTADOS QUE ENTREGA ITAENERGY2.0 SOBRE LA ENERGÍA CONSUMIDA DEL CASO 3.	54
FIGURA 16. GRÁFICO DE ENERGÍAS ENTREGA ITAENERGY2.0 PARA EL CASO 1 (IZQ.) Y EL CASO 2 (DCHA.).....	59
FIGURA 17. GRÁFICO DE ENERGÍAS ENTREGA ITAENERGY2.0 PARA EL CASO 3.	59
FIGURA 18. INDICADORES DE CONTEXTO Y DE GESTIÓN DEL CASO 1 QUE PRESENTA ITAENERGY2.0. 60	60
FIGURA 19. INDICADORES DE DIAGNÓSTICO DEL CASO 1 QUE PRESENTA ITAENERGY2.0.	63

Índice Tablas

TABLA 1. INTENSIDADES ENERGÉTICAS ASOCIADAS A LOS SISTEMAS DE AGUA (FUENTE: (PULEO ET AL., 2015))	11
TABLA 2. PROPIEDADES DE LAS LÍNEAS QUE SE USAN EN LA FUNCIÓN ENGETLINKVALUE DE EPANET TOOLKIT 2.0	20
TABLA 3. NUEVAS PROPIEDADES DE LAS LÍNEAS QUE SE USAN EN LA FUNCIÓN EN_GETLINKVALUE DE EPANET TOOLKIT 2.2.....	20
TABLA 4. CARACTERÍSTICAS MÁS DESTACADOS DE ALGUNOS ÍNDICES DE RENDIMIENTO ENERGÉTICO Y SU APLICABILIDAD. FUENTE: (ZAMAN ET AL., 2021).....	31
TABLA 5. INDICADORES PROPUESTOS EN ITAENERGY 2.0	42
TABLA 6. CARACTERÍSTICAS PROPIAS DE LOS NUDOS Y LÍNEAS DE LA RED.	45
TABLA 7. CURVAS DE RENDIMIENTO DE LAS BOMBAS DEL CASO 2.	46
TABLA 8. DATOS DE LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LAS BOMBAS DEL CASO 2.....	48
TABLA 9. COMPARACIÓN DE LOS VOLÚMENES DEL SISTEMA PARA LOS 3 CASOS DE ESTUDIO.	52
TABLA 10. COMPARACIÓN DE LOS INDICADORES DEL SISTEMA PARA LOS 3 CASOS DE ESTUDIO.	52
TABLA 11. RESULTADOS DESGLOSADOS QUE ENTREGA ITAENERGY 2.0 SOBRE LA ENERGÍA TOTAL APORTADA PARA EL CASO 1.....	54
TABLA 12. DATOS POR ELEMENTO DE LA ENERGÍA APORTADA DEL CASO 1 QUE PRESENTA ITAENERGY2.0.	55
TABLA 13. COMPARACIÓN DE LA ENERGÍA APORTADA POR LAS BOMBAS DEL CASO 2 Y CASO 3.....	55
TABLA 14. DATOS POR ELEMENTO DE LA ENERGÍA APORTADA DEL CASO 2 QUE PRESENTA ITAENERGY2.0.	56
TABLA 15. DATOS POR ELEMENTO DE LA ENERGÍA APORTADA DEL CASO 3 QUE PRESENTA ITAENERGY2.0.	56
TABLA 16. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DESGLOSADOS QUE ENTREGA ITAENERGY 2.0 SOBRE LA ENERGÍA TOTAL CONSUMIDA PARA LOS CASOS DE ESTUDIO.....	58
TABLA 17. COMPARACIÓN DEL INDICADOR DE CONTEXTO PARA LOS CASOS DE ESTUDIO.....	60
TABLA 18. COMPARACIÓN DE LOS INDICADORES DE GESTIÓN PARA LOS CASOS DE ESTUDIO.	61
TABLA 19. COMPARACIÓN DE LOS INDICADORES DE GESTIÓN PARA LOS CASOS DE ESTUDIO.	62

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

El abastecimiento de agua potable a la población a través de sistemas presurizados es cada vez el mecanismo más extendido a nivel mundial, para tal cometido se hace necesario aportar al sistema energía, ya sea que esta provenga de forma natural debido a la altura geográfica de las fuentes, la transformación de la energía mecánica y eléctrica en hidráulica a través de bombas, o una mezcla de las dos; que haga que el líquido vital llegue a los usuarios.

En otras palabras, un sistema presurizado de agua requiere de energía para entregar agua a los usuarios, de tal manera que garantice estándares mínimos de servicio de caudales y presiones. Una parte de la energía aportada se destina a vencer las condiciones topográficas de terreno. Otra cantidad se pierde por el mismo funcionamiento de la red y se localizan en las estaciones de bombeo, en las válvulas del sistema y en las tuberías. Las bombas necesitan energía para su funcionamiento, aunque hay una parte que se pierde en su rendimiento. En las tuberías y válvulas se disipa energía como consecuencia de la fricción. Por otro lado, parte de la energía invertida para garantizar los estándares de calidad se pierde en las fugas de agua.

Por lo expuesto anteriormente, cualquier sistema de agua presurizado puede verse sometido a una auditoría energética que conlleve a concluir sobre el funcionamiento del sistema y plantear una posible optimización de este con los beneficios que pueden resultar de esto, tales como:

- Reducir la cantidad de agua que se pierde en formas de fugas del sistema, proponiendo optimizar la gestión dinámica de la presión, evitando así excesos de energía y presiones.
- Identificar sitios en la red donde existen excesos de energía que se puede transformar la energía hidráulica en eléctrica mediante dispositivos de recuperación energética.

1.2. OBJETIVOS

Con estos antecedentes, en este trabajo fin de máster (TFM) se desarrolla una herramienta informática basada en el lenguaje de programación Visual Basic.net, que automatice los cálculos de los componentes energéticos y realice la auditoría energética de sistemas presurizados de agua, ya sea para sistemas de agua potable o riego. Esta herramienta parte de cualquier configuración de modelo de la red, que debe estar previamente calibrada en EPANET, los resultados entregados son numéricos y gráficos estadísticos (gráficos barras, gráficos pasteles, etc.) que permiten una visualización e interpretación de manera más fácil de cómo se compone la parte energética de la red.

Los objetivos específicos de este trabajo son:

- Realizar una introducción a la cuestión nexo Agua-Energía en los sistemas de agua a presión.
- Realizar el estudio del estado del arte de la Auditoría Energética en los sistemas de agua a presión.
- Profundizar en la metodología sobre Auditoría Energética desarrollada por el Grupo de ingeniería y tecnología del agua (ITA).
- Realizar el balance hídrico sencillo de un sistema.
- Calcular las energías presentes en la auditoría energética.
- Calcular los indicadores de contexto, de gestión y de diagnóstico de un sistema.
- Comprobar el funcionamiento de la herramienta informática mediante un caso práctico.

CAPÍTULO 2. INTRODUCCIÓN A LA CUESTIÓN

2.1. AGUA Y ENERGÍA.

2.1.1. Nexo agua-energía

El agua y la energía están íntimamente relacionados. Por un lado, la producción de energía necesita agua directa o indirectamente. Directamente, para la obtención de energía hidroeléctrica, la cual suministra el 20% de la electricidad mundial desde la década de los 90 (ONU-DAES, 2014). Indirectamente, se utiliza agua en la conversión y la producción de biocombustibles, así como para la refrigeración de las centrales térmicas y nucleares (Macharia et al., 2020) (Sun et al., 2018).

Por otro lado, la energía es necesaria desde la captación del agua hasta su vertido al medio natural. En la figura 1 se ilustran un ejemplo de los procesos que requieren energía en los sistemas de agua. La energía utilizada para la distribución de agua es necesaria para elevar el agua a cotas altas, así como para compensar las pérdidas en el sistema. Sólo una parte de la energía que entra en el sistema de suministro de agua llega a los consumidores. (Ćipranić et al., 2021)

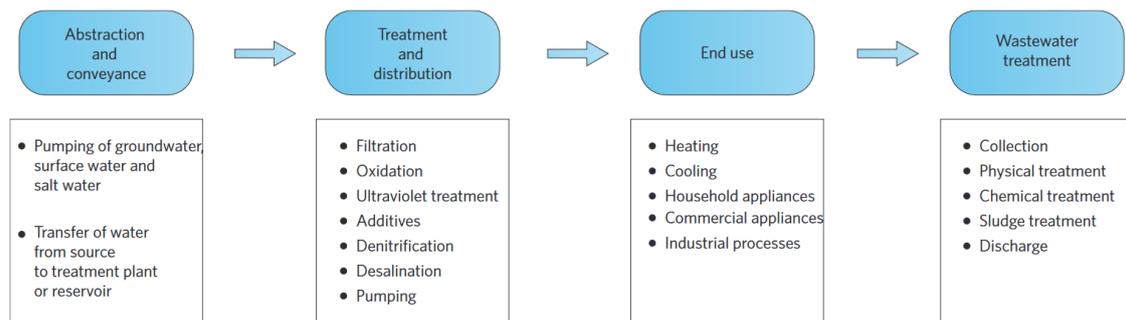


Figura 1. Modelo conceptual de los procesos del sector del agua que implican el uso de la energía (Fuente: (Rothausen & Conway, 2011)).

El consumo de energía en un sistema de agua depende de la disponibilidad y la calidad del recurso en origen, la topología de la red, la topografía de la zona y del tratamiento utilizado para las aguas residuales. La energía usada por metro cúbico de agua está ligada estrechamente al tipo de fuente como se muestra en la Tabla 1 (Puleo et al., 2015).

Tabla 1. Intensidades energéticas asociadas a los sistemas de agua (fuente: (Puleo et al., 2015))

Tipo de fuente	Intensidad energética (kWh/m ³)
Aguas superficiales o subterráneas	0,25 a 4,5
Desalinización	15

En 2015 se estimó que el consumo de electricidad en el sector del agua fue alrededor del 4% del consumo mundial de electricidad. En Estados Unidos y la Unión Europea, el sector del agua supone el 3% del consumo total de electricidad. En Oriente Medio, en cambio, este porcentaje aumenta al 9% (IEA, 2016).

El crecimiento de la población a nivel mundial que actualmente se estima en 7.9 billones de habitantes con una tasa de crecimiento 1.10%, hace que se tenga proyecciones que para el año 2050 la población sea 9.3 billones de habitantes. El incremento de la población implica un aumento de la demanda de agua, así como de energía. Se prevé que especialmente las zonas urbanas de los países en desarrollo absorban este aumento de la población. Por lo que aumentará la demanda del suministro de agua y electricidad para uso doméstico. De la misma manera impulsa una mayor demanda de alimentos y otros bienes, cuya producción puede requerir importantes cantidades de agua (WWAP, 2014).

Ambos recursos tienen una demanda creciente como consecuencia del crecimiento económico y demográfico en muchas regiones y también como consecuencia del cambio climático. Asimismo, la interdependencia entre el agua y la energía se intensificará en los próximos años (IEA, 2016). El Foro Económico Mundial de 2011 anunció un aumento del 20 al 50% para las próximas dos décadas por encima del nivel de entonces de uso de agua y energía (Mosalam & El-Barad, 2020).

La escasez de agua y la eficiencia energéticas son algunos de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) para 2030. En concreto los ODS número 6 y 7 que plantean “Garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y

saneamiento para todos” y “Garantizar el acceso a una energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todos” (United Nations, 2016).

El marco del nexo agua-energía ha permitido abordar de forma coordinada el papel de los recursos hídricos y energéticos para el desarrollo sostenible, teniendo en cuenta las complejas necesidades, interacciones, sinergias, conflictos y contrapartidas entre ambos recursos (Macharia et al., 2020).

2.1.2. Agua y Energía en sistemas presurizados

Muchos sistemas de agua transportan el fluido a través de conductos cerrados presurizados, tanto en sistemas de agua potable como en sistemas de riego. Este tipo de transporte por conductos cerrados tiene algunas ventajas como menores pérdidas de agua, menores riesgos de contaminación o mayor flexibilidad en el trazado de la tubería, entre otros. Para movilizar los volúmenes de agua requeridos de un lugar a otro, como por ejemplo desde la fuente hasta el punto del consumidor final, los sistemas presurizados requieren consumir energía.

El consumo de energía en el suministro municipal de agua, en algunos casos, puede representar hasta el 44% o más de los costes operativos totales. Los costes energéticos son el mayor gasto controlable dentro de los límites internos de las empresas de suministro de agua. En algunos casos, el 90% del uso de energía en el suministro de agua se consume en bombas y motores. La optimización de estos equipos supondría un potencial de ahorro de hasta el 40% de la inversión con cortos períodos de recuperación (Macharia et al., 2020).

La relación entre el coste energético y las pérdidas de agua también se ha investigado en la literatura. Las pérdidas de agua pueden afectar a la cantidad de energía necesaria para suministrar agua a los usuarios. Por ejemplo, las pérdidas de agua hacen que las bombas estén sobredimensionadas, lo cual supone un desperdicio de energía. Otro ejemplo, con un alto nivel de pérdidas hace que el volumen de agua captado, tratado y transportado sea mayor al que necesitan los consumidores, lo que además conlleva un mayor consumo de energía. Las pérdidas de agua dentro de un sistema de suministro de agua es

un problema importante al que se enfrentan todas las empresas de suministro de agua (Puleo et al., 2015) (Ćipranić et al., 2021).

Con el fin de reducir el consumo de energía en la etapa de distribución del ciclo urbano del agua, se han propuesto algunos enfoques para la definición de indicadores de rendimiento. Estos indicadores están pensados para apoyar a los responsables en la toma de decisiones en: rehabilitación de las tuberías, cuantificación de la recuperación potencial de energía y localización de microturbinas. En este contexto, la auditoría energética en sistemas de agua a presión identifica la energía que entra en el sistema y también sus usos finales (Pardo Picazo et al., 2019).

2.2. AUDITORÍA ENEGÉTICA

La auditoría energética detalla los componentes de la energía y la intensidad de participación de estos componentes en un sistema de agua. Como se ha mencionado antes, en la auditoría se identifica la energía que entra en el sistema, es decir, la energía suministrada por los depósitos y las bombas o por fuentes naturales (embalses, ríos, etc.). También la energía consumida por las fugas, la energía disipada en las tuberías y en las válvulas, y la energía en forma de presión que llega a los usuarios del sistema.

Realizar una auditoría energética de un sistema presurizado de agua ayuda a visualizar e identificar ineficiencias energéticas en el sistema, y por lo tanto implementar estrategias de corrección y optimización de los sistemas. La auditoría energética puede conducir a una gestión de los sistemas de suministro de agua que proporcione un servicio socialmente responsable, ambientalmente sustentable y rentable económicamente (da Silveira & Mata-Lima, 2020).

Antes de aplicar cualquier medida enfocada en la reducción del consumo de energía y agua, debe realizarse una evaluación del uso de la energía o de los flujos de energía del sistema de agua y determinar la cantidad de agua que se pierde (Puleo et al., 2015).

Una de las medidas es la optimización de los sistemas de suministro de agua para satisfacer la creciente demanda de agua y, al mismo tiempo, gestionar las

cuestiones medioambientales relacionadas con la energía (Vakilifard et al., 2018). Las medidas centradas exclusivamente en la reducción de las pérdidas de agua en el sistema de distribución, o sólo en el ahorro de la energía, no alcanzarán su objetivo si no se tiene en cuenta la compleja conexión entre el consumo de energía y las fugas de agua en el sistema (Puleo et al., 2015).

Ćipranić et al., (2021) proponen un método para estimar el ahorro de energía en un sistema de suministro de agua, en el cual se realiza un cálculo de la energía total necesaria en el sistema a partir de datos básicos del mismo. Su método de cálculo se basa en un modelo hidráulico del sistema del cual se conoce su configuración, consumo de agua y las pérdidas de agua en el sistema. En un sistema ficticio se obtuvo un ahorro de energía del 22% gracias a la disminución de hasta el 60% de la presión en ciertas partes del sistema. Con la ayuda de la metodología concluyen que las posiciones de las válvulas reductoras de presión dan como resultado una disminución de la presión, ahorro de energía y reducción de fugas. Esto determina claramente que una auditoría energética de una red de agua presurizada puede conllevar a una mejor gestión del sistema, dando como resultados ahorros económicos y ambientales a los prestadores de los servicios de agua potable.

Da Silveira & Mata-Lima (2020) proponen un procedimiento integrado para identificar y clasificar la eficiencia energética de la red, todo esto por medio de una auditoría energética que permita tomar las decisiones y acciones necesarias de mejora a la gestión de los sistemas de agua potable. Este procedimiento se divide en 7 pasos que van desde la integración del equipo auditor, pasando por etapas como descripción del sistema y balance de energía, obtención de datos, visitas de campo, planes de trabajo, cálculo métrico de las energías e indicadores, ejecución de plan e informe final. Concluyen que el procedimiento de auditorías energéticas puede estimular la innovación verde de las empresas de servicios públicos, además de obtener incentivos gubernamentales y certificaciones internacionales de gestión de la energía.

Pardo Picazo et al. (2019) presentaron un software para realizar auditorías energéticas en redes de agua a presión, el UAenergy. Este programa fue

desarrollado en Matlab con la integración de la herramienta de toolkit de EPANET. Dentro de los resultados muestra los valores de participación de las energías de cada elemento (bombas, tuberías, válvulas, etc.), así como la influencia de las fugas. El programa calcula las diversas energías que intervienen: energía suministrada por los embalses, energía suministrada por las estaciones de bombeo incluyendo el rendimiento del equipo de bombeo, energía entregada a los usuarios en los nudos de consumo, energía perdida a través de fugas, energía disipada por el rozamiento del agua en las tuberías, energía disipada en válvulas hidráulicas y la compensación energética por depósitos. Tras realizar la auditoría energética con este software de cinco casos de estudios, los resultados destacan que las pérdidas de energía no solo se deben a la energía que sale del sistema a través de fugas, sino también a la energía necesaria para trasladar grandes volúmenes de agua en tuberías. Además, la energía disipada por fricción calculada puede mostrar el sobredimensionamiento de las redes si el valor es bajo.

Gómez et al. (2018) mostraron aplicaciones informáticas enfocadas en la mejora de la eficiencia de redes presurizadas. Estas aplicaciones fueron desarrolladas a partir de la integración de la herramienta de Toolkit de EPANET con Microsoft Excel. Los autores proponen clasificar las pérdidas de energía en estructurales y operativas. Las pérdidas estructurales corresponden a la energía topográfica, la cual solo se puede reducir modificando el diseño del sistema, puede disiparse por medio de válvulas reductoras o recuperar energía por medio de turbinas. Las pérdidas operativas se pueden reducir a través de la gestión y auditorías de agua y energía de la red. Las herramientas informáticas desarrolladas son capaces de calcular valores e indicadores, que permiten describir el estado de la red que se está estudiando, a partir de su archivo INP de EPANET.

Las herramientas desarrolladas fueron:

1. Evaluación energética global de ITA: El objetivo de esta herramienta es el cálculo del diagnóstico energético de la red, cuyos resultados facilitan la toma de decisiones encaminadas a la mejora de la eficiencia energética. Presenta como resultado tres indicadores. El primero corresponde a la

eficiencia ideal, que depende de las características específicas del sistema, y cuyo valor es inalcanzable por que en su cálculo supone que no existe ningún tipo de pérdida energética en la red. El segundo indicador corresponde al estado real y actual de la red. Si se compara el indicador ideal versus el indicador real se puede determinar cuan bien o mal está el sistema dependiendo su proximidad o no en valores. El tercer indicador que aporta la herramienta informática es el desempeño objetivo al que la red puede llegar.

2. Auditoría hídrica ITA: Esta herramienta fue diseñada para poder ingresar los valores de las fugas en el modelo matemático de EPANET en periodo extendido, a partir del archivo INP y de los datos del volumen inyectado mensual a la red y el volumen mensual facturado.
3. Auditoría energética ITA: Esta herramienta realiza la auditoría energética de una red de agua presurizada. El dato de entrada también es el archivo INP de EPANET debidamente calibrado y validado que incluya el modelado de las fugas. Agrupa las energías en dos grupos, el primer grupo corresponde a la energía total suministrada, que es la suma de la energía consumida por las estaciones de bombeo y la energía natural disponible en los embalses. El segundo grupo de energías corresponde a la energía total consumida por la red la cual puede considerarse como útil cuando se entrega a los usuarios en forma de caudal y presión o energía perdida como fugas, disipada en tuberías y válvulas, energía perdida por ineficiencias en estaciones de bombeo. Adicionalmente la herramienta calcula indicadores de contexto y rendimiento.
4. Evaluación energética topográfica ITA: Esta herramienta calcula los términos de la energía topográfica, y la proporción que representa de la energía total. Los términos de la energía topográfica son energía topográfica gestionable que se puede reducir de alguna manera (PATs, VRP, etc.) y la energía topográfica inherente que se relaciona con el desnivel del terreno y que no puede cambiar sin modificar el trazado de la red.
5. Etiquetado de redes energéticas ITA: Es una herramienta informática calcula las eficiencias operativas de la red. Estas ineficiencias provienen

del bombeo, pérdidas por fugas y pérdidas por fricción. La herramienta compara los valores obtenidos con niveles de referencia. Además, calcula una calificación final a partir de la combinación de las eficiencias parciales.

Los autores determinan que las herramientas informáticas desarrolladas se convierten en un soporte para planes de estudios específicos de redes presurizadas de agua, que ayuden a mejorar la gestión de estas. También que EPANET es una herramienta fundamental en la gestión eficiente de los sistemas de agua a presión.

Ramos et al. (2021) plantean la instalación de centrales hidroeléctricas a pequeña escala para recuperar el exceso de energía en los sistemas de presión. Para ello, proponen la sustitución de las válvulas reductoras de presión (VRP) por bombas como turbinas (PATs) o acoplándolas. El objetivo principal de las VRP es controlar la presión, para lo cual provocan una disipación de energía que podría recuperarse con turbinas. De esta forma se puede mejorar la sostenibilidad y la eficiencia del sistema. Se desarrolla un modelo del nexo agua-energía para caracterizar todas las variables interesantes para el estudio partiendo de indicadores de rendimiento aplicados recientemente en Portugal. Los resultados del caso de estudio, en Mozambique, indican que el proyecto proporcionará una reducción real de las pérdidas de agua de 10.023 m³/año, basándose en el volumen de fugas estimado para una caída de presión de 16,4 m. Además, el sistema puede producir 22.878 kWh/año, que se utilizarán directamente para el funcionamiento del sistema. Esto supondrá unos ingresos que conducen a un beneficio total de 7.605 euros/año, si se tiene en cuenta la interacción entre el agua y la energía.

En este TFM se presenta el programa ITAEnergy2.0 que es la evolución de la Auditoria energética ITA. Por un lado, ofrece el balance hídrico de la red junto con unos indicadores del sistema. Al mismo tiempo, muestra la energía total aportada al sistema con la particularidad de cuantificar la aportación de cada elemento, ya sean embalses, depósitos o bombas. Realiza algo parecido con la energía total consumida, donde se puede ver la energía perdida por bomba y la energía almacenada por depósito. Otro rasgo del software presentado es la

incorporación de la energía topográfica real dentro de la autoría energética. También cabe señalar que se proponen unos indicadores de diagnóstico con las energías calculadas por el programa. En definitiva, ITAEnergy2.0 presenta una serie de ventajas respecto a los programas o herramientas descritas en los párrafos anteriores. Principalmente por el enfoque individualizado en el cálculo de las energías para bombas, embalses y depósitos, resultados que se muestran en forma numérica y gráfica. Como consecuencia, permite centrar el foco de atención en los elementos del sistema que realmente desfavorecen la eficiencia energética, contribuyendo con información relevante para una toma de decisiones.

2.3. EPANET

EPANET es un software de libre distribución, desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), fue concebido para el análisis de la calidad del agua en redes de distribución lo cual requiere el análisis hidráulico en períodos de simulación prolongados. EPANET está compuesto por un módulo de análisis hidráulico que permite simular el comportamiento dinámico de la red y por un módulo de calidad que permite modelar reacciones y transporte de masa. Este programa permite ver la evolución del flujo del agua en las conducciones, obtener la presión en los nudos, conocer el nivel de agua en los depósitos y de la concentración de cualquier sustancia a través del sistema. Los elementos de la red que puede simular el programa son tuberías, nudos, depósitos, reservorios, válvulas y bombas (Rossman et al., 2002).

La versión original del software fue desarrollada en inglés y ha sido traducida a varios idiomas. La popularidad de este programa se debe, no solo a su difusión gratuita, si no a su potencia de cálculo y a la sencillez de su interfaz.

El módulo de Herramientas para programadores (Toolkit) de EPANET permite conectar la librería de cálculo del programa con cualquier aplicación externa como Microsoft Excel, QGIS o Autocad. Asimismo, permite operar de forma más rápida y eficiente mediante las funciones disponibles dentro de su librería.

EPANET 2.2

La última versión de este software es EPANET 2.2 y fue lanzado en 2019. Esta nueva versión incluyó notables mejoras respecto a la versión anterior, como por ejemplo (Rossman et al., 2021):

- Capacidad para usar demandas dependientes de la presión en los análisis hidráulicos.
- Posibilidad de permitir el desbordamiento de tanques llenos.
- Opciones que garantizan la realización de un análisis hidráulico más preciso.
- Manejo más robusto de las condiciones hidráulicas de flujo bajo y flujo cero.
- Tiempos de solución más rápidos en análisis hidráulicos de un solo período.
- Mejores resultados de equilibrio de masa en los análisis de calidad del agua.
- Una biblioteca de funciones mejoradas de API para personalizar EPANET

Este lanzamiento además incluyó nuevas funciones de la Toolkit que permiten realizar nuevas operaciones como la eliminación directa de nudos y líneas. En algunas funciones existentes también se han añadido valores de salida. Este es el caso de la función `EN_getlinkvalue`, que recupera el valor de la propiedad de una línea (tubería, válvula o bomba). En la versión 2.2 se pueden recuperar las 13 propiedades de las líneas que ya estaban disponibles en la versión 2.0 (Tabla 2. Propiedades de las líneas que se usan en la función `ENgetlinkvalue` de EPANET Toolkit 2.0) y 11 nuevas propiedades disponibles (Tabla 3. Nuevas propiedades de las líneas que se usan en la función `EN_getlinkvalue` de EPANET Toolkit 2.2).

Tabla 2. Propiedades de las líneas que se usan en la función ENgetlinkvalue de EPANET Toolkit 2.0

PROPIEDAD	DESCRIPCIÓN
EN_DIAMETER	Diámetro
EN_LENGTH	Longitud
EN_ROUGHNESS	Coef. de rugosidad
EN_MINORLOSS	Coef. de Pérdidas menores
EN_INITSTATUS	Estado inicial de la línea (0 = cerrada, 1 = abierta)
EN_INITSETTING	Rugosidad inicial de la tubería Velocidad inicial de la bomba Consigna inicial de la válvula
EN_KBULK	Coef. de reacción en el medio
EN_KWALL	Coef. de reacción en la pared
EN_FLOW	Caudal
EN_VELOCITY	Velocidad de flujo
EN_HEADLOSS	Pérdida de Carga
EN_STATUS	Estado actual de la línea (0 = cerrada, 1 = abierta)
EN_SETTING	Rugosidad de la tubería Velocidad actual de la bomba Consigna actual de válvula
EN_ENERGY	Potencia suministrada, en kw

Tabla 3. Nuevas propiedades de las líneas que se usan en la función EN_getlinkvalue de EPANET Toolkit 2.2.

PROPIEDAD	DESCRIPCIÓN
EN_LINKQUAL	Current computed link quality (read only)
EN_LINKPATTERN	Pump speed time pattern index.
EN_PUMP_STATE	Current computed pump state (read only)
EN_PUMP_EFFIC	Current computed pump efficiency (read only)
EN_PUMP_POWER	Pump constant power rating.
EN_PUMP_HCURVE	Pump head v. flow curve index.
EN_PUMP_ECURVE	Pump efficiency v. flow curve index.
EN_PUMP_ECOST	Pump average energy price.
EN_PUMP_EPAT	Pump energy price time pattern index.
EN_LINK_INCONTROL	Is present in any simple or rule-based control (= 1) or not (= 0)
EN_GPV_CURVE	GPV head loss v. flow curve index.

Entre las nuevas propiedades disponibles destaca EN_PUMP_EFFIC, que recupera el valor de la eficiencia de las bombas para cada punto de funcionamiento. Esta propiedad de la función no se puede obtener con EPANET visual solo está disponible en la nueva versión de Toolkit

El programa desarrollado en este TFM saca partido a las mejoras de la versión 2.2 de la Toolkit de EPANET. Una de las ventajas de ITAEnergy2.0, por las que se diferencia del resto de programas de auditoría energética, es su capacidad de obtener la energía consumida por las bombas, que solo es posible obtenerla por programación y gracias a las mejoras de la versión 2.2.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA PARA LA AUDITORIA ENERGÉTICA

3.1. Fundamentos de la auditoría energética

La metodología aplicada en este TFM sigue los principios fundamentales de la auditoría energética presentada por Cabrera et al. (2010) y ampliada por Gómez Sellés (2016).

El proceso de la auditoría energética necesita primeramente tener el modelo matemático de la red a estudiar debidamente calibrada, es decir, un modelo matemático con una buena exactitud que represente en cada instante caudales, presiones, pérdidas unitarias de carga, etc. Así como tener resuelto el balance hídrico del sistema. El balance hídrico es la relación existente entre el volumen de agua entregado al sistema de cada una de las fuentes con los volúmenes de agua consumidos y perdidos del sistema.

La ecuación de balance de la potencia que se refiere a todo el sistema viene dada por la Ecuación 1.

$$P_N + P_p = P_u + P_l + P_F \pm \Delta P_c$$

Ecuación 1

De donde los términos de la izquierda de la Ecuación 1 representan la potencia de entrada al sistema y los de la derecha la potencia consumida, y sus siglas corresponden a:

- P_N : Potencia Natural,
- P_p : Potencia Aportada por las Bombas,
- P_u : Potencia Útil entregada a los usuarios
- P_l : Potencia perdida por fugas en la red
- P_F : Potencia necesaria para vencer la Fricción tuberías
- ΔP_c : Variación de Potencia debido a los niveles de los depósitos

Si la ecuación anterior se la integra con relación al tiempo de simulación en periodo extendido entonces tendremos la ecuación general de la energía cuyos términos o componentes se procede a detallar a continuación.

❖ **Energías entregadas al Sistema:** Es la energía externa al sistema que es entregada al mismo para su funcionamiento, matemáticamente es calculada como la suma de la Energía Natural Suministrada más la Energía aportada por el sistema de bombeo.

➤ **Energía Natural Suministrada:** Se refiere a la energía Natural externa que se proporciona al sistema, está relacionado con las cotas de donde se encuentran los embalses o depósitos de cabecera, su ecuación de cálculo:

$$E_N(t) = \gamma \sum_i^{n_N} \left(\sum_K Q_{Ni}(t_k) \cdot H_{Ni}(t_k) \cdot \Delta t_k \right)$$

Ecuación 2

Donde:

- $E_N(t)$: Energía Natural en kWh en el periodo total de simulación t .
- γ : Peso Específico del Agua en KN/m³.
- $Q_{Ni}(t_k)$: Caudal aportado por la fuente o embalse en el instante t_k en m³/s.
- $H_{Ni}(t_k)$: Altura piezométrica de la fuente o embalse en el instante t_k en m.c.a.
- Δt_k : Intervalo de tiempo considerado en s.

Analizando la Ecuación 2 el factor $Q_{Ni}(t_k) \cdot \Delta t_k$ viene siendo el Volumen de agua en m³ aportada por la fuente en el instante t_k .

➤ **Energía Suministrada por el Equipo de Bombeo:** Es la energía proveniente del trabajo del eje de cada una de las bombas (n_p) en una estación de bombeo, su ecuación se define:

$$E_P(t) = \gamma \sum_K \left(\sum_{i=1}^{n_p} \left(\frac{Q_{Pi}(t_k) \cdot H_{Pi}(t_k)}{\eta_{Pi}(t_k)} \right) \right) \cdot \Delta t_k$$

Ecuación 3

Donde,

- $E_p(t)$: Energía Suministrada por el Equipo de Bombeo en kWh en el periodo total de simulación t .
- $Q_{Pi}(t_k)$: Caudal aportado por el equipo de Bombeo en el instante t_k en m³/s.
- $H_{Ni}(t_k)$: Altura piezométrica aportado por el equipo de Bombeo en el instante t_k en m.c.a.
- Δt_k : Intervalo de tiempo considerado en s.
- $\eta_{Pi}(t_k)$: Rendimiento del equipo de Bombeo en el instante t_k .

❖ **Energía consumida en la Red:** Es la suma de los valores numéricos que representan a las energías: Energía Útil, Energía Disipada por Fricción, Energía Disipada por válvulas, Energía Perdida por Fugas, Energía perdida por la ineficiencia del sistema de bombeo.

➤ **Energía Útil (E_u):** Es la energía entregada a los usuarios en los nudos de consumo, su ecuación se define:

$$E_u(t) = \gamma \sum_K \left(\sum_{i=1}^n q_{ui}(t_k) \cdot H_i(t_k) \right) \cdot \Delta t_k$$

Ecuación 4

Donde,

- $E_u(t)$: Energía Útil en kWh en el periodo total de simulación t .
- $q_{ui}(t_k)$: Caudal demandado por los usuarios en el nudo n instante t_k en m³/s.
- $H_i(t_k)$: Altura piezométrica en el nudo n en el instante t_k en m.c.a.
- Δt_k : Intervalo de tiempo considerado en s.

Adicionalmente, Gómez Sellés (2016) indica que la energía útil contiene tres componentes: Energía mínima requerida por los usuarios (E_{uo}), Energía Topográfica Real (E_{tr}) y la Energía en Exceso Real (E_{er}). Una manera adicional de obtener el valor matemático de la energía útil, la cual sirve de comprobación de la suma algebraica de los valores de las energías de los componentes, es la que se muestra en la siguiente ecuación:

$$E_u(t_k) = E_{uo}(t_k) + E_{tr}(t_k) + E_{er}(t_k)$$

Ecuación 5

Los términos de la Ecuación 5 se desglosan a continuación:

- **Energía Mínima Requerida por los Usuarios (E_{uo}):** Es la energía mínima que se requiere para cubrir las necesidades de la población en condiciones de caudal y presión. Está definida por la ecuación

$$E_{uo} = \gamma \sum V_j \left[(z_j - z_l) + \frac{p_0}{\gamma} \right]$$

Ecuación 6

Donde,

- E_{uo} : Energía Mínima Requerida por los Usuarios en kWh.
 - γ : Peso Específico del Agua en KN/m³.
 - V_j : Caudal demandado por los usuarios en el nudo j en m³.
 - Z_j : Cota del terreno del nudo j en m.
 - Z_l : Cota del terreno del nudo crítico en m.
- **Energía Topografía Real (E_{tr}):** Esta energía está relacionada con los desniveles del terreno donde se encuentra la red y su trazado, su cálculo viene dado por la siguiente ecuación (del Teso et al., 2019):

$$E_{tr} = \gamma \sum V_j [P_j - (Z_j + P_o)] - E_e$$

Ecuación 7

Donde,

- E_{tr} : Energía Topografía Real en kWh.
- γ : Peso Específico del Agua en KN/m³.
- V_j : Caudal demandado por los usuarios en el nudo j en m³.
- P_j : Presión del nudo j de estudio en m.c.a.
- Z_j : Cota del terreno del nudo j de estudio en m.
- P_o : Presión de Servicio Requerida en m.c.a.
- E_e : Energía de Exceso en el Nudo de Estudio.

La energía topográfica no es en sí una pérdida de energía, pero no deja de ser una ineficiencia ya que supone aportar más energía de la estrictamente necesaria. Por lo cual, debe tenerse en cuenta en la auditoría energética para subsanarla en la medida de lo posible.

Como consideración adicional, si el exceso de presión viene dado por una fuente rígida (embalse o depósito) se considera inevitable y se incluye dentro de la energía topográfica real y no como energía de exceso. Esto se toma así porque la altura de suministro en este tipo de fuentes es casi constante, lo cual no permite regular la presión dentro de la red, dando lugar a una ineficiencia. Por tanto, en el cálculo de E_{tr} de una fuente rígida el término E_e será igual a cero.

Por el contrario, si el exceso de presión proviene de una fuente variable (bombas con variador de frecuencia), es una energía de exceso real. Este exceso tiene origen en la regulación deficiente de las estaciones de bombeo que no se ajusta a las necesidades nudo crítico. La diferencia entre fuentes rígidas y variables reside en la forma de entender el exceso de presión y como se puede evitar o reducir. En el caso de las fuentes rígidas, el exceso puede ser reducido mediante VRP o recuperado mediante turbinas, pero no se puede evitar. En contraste, el exceso de energía en las fuentes variables se puede evitar regulando las estaciones de bombeo, de forma que se igualen en lo posible la energía suministrada y la energía requerida en el nudo crítico.

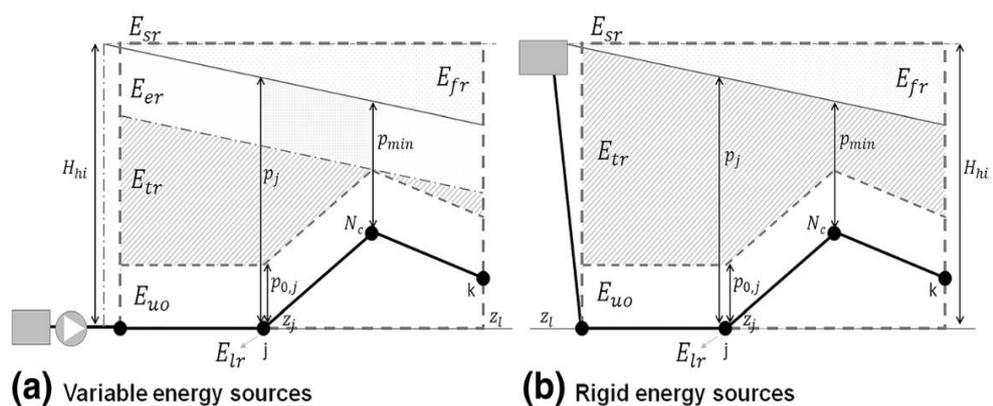


Figura 2. Balance de energía para una fuente variable (a) y una fuente rígida (b).
Fuente: del Teso et al. (2019).

- **Energía de Exceso Real (E_{er}):** Representa la energía relacionada con la presión en los nudos mayor a la presión de servicio, su expresión matemática viene dada por (del Teso et al., 2019):

$$E_{er} = V_j [P_c - P_o]$$

Ecuación 8

Donde,

- E_{er} : Energía de Exceso Real en kWh.
 - V_j : Caudal demandado por los usuarios en el nudo j en m³.
 - P_c : Presión del nudo crítico o más desfavorable de estudio en m.c.a.
 - P_o : Presión de Servicio Requerida en m.c.a.
- **Energía Disipada por Fricción (E_{rf}):** Esta energía es consumida básicamente por la fricción del líquido circulante y las paredes de la tubería que la transporta, su cálculo está determinado por la siguiente ecuación:

$$E_{rf}(t) = \gamma \sum_K \left(\sum_{i=1}^n (q_{uj}(t_k) + q_{lj}(t_k)) \cdot \Delta h_j(t_k) \right) \cdot \Delta t_k$$

Ecuación 9

Donde,

- $E_{rf}(t)$: Energía Disipada por Fricción en kWh.
- γ : Peso Específico del Agua en KN/m³.
- $\Delta h_j(t_k)$: Pérdida de carga de la tubería j en el instante t_k en m.c.a.
- $q_{uj}(t_k)$: Caudal circulante por la tubería j necesario para atender la demanda de los usuarios en m³/s.
- $q_{lj}(t_k)$: Caudal circulante por la tubería j que se perderá por fugas en m³/s.
- Δt_k : Periodo de tiempo considerado en s.

- **Energía Perdida través de Fugas (E_{rl}):** Se refiere a la energía que se consume por el transporte del agua que se pierde en agua no contabilizada (agua de fugas), cuyo caudal perdido es dependiente de la presión, y que es reflejado en el modelo matemático del sistema previamente calibrado, para el cálculo de esta energía se utiliza la siguiente ecuación:

$$E_{rl}(t) = \gamma \sum_K \left(\sum_{i=1}^n (q_{li}(t_k) \cdot H_i(t_k)) \right) \cdot \Delta t_k$$

Ecuación 10

- Donde,
- $E_{rl}(t)$: Energía Perdida través de Fugas en kWh.
 - γ : Peso Específico del Agua en KN/m³.
 - $H_i(t_k)$: Altura Piezométrica en el instante t_k en m.c.a.
 - $q_{li}(t_k)$: Caudal fugado en las tuberías adyacentes al nudo i en m³/s.
 - Δt_k : Periodo de tiempo considerado en s.
- **Energía Perdida en las Bombas (E_{rp}):** Este término se refiere a la energía perdida debido a la ineficiencia de los equipos de bombeos, por lo que el término de rendimiento de las bombas es un parámetro que tomar en cuenta el momento de analizar los resultados de esta energía, su cálculo está determinado por la siguiente ecuación:

$$E_p(t) = \gamma \sum_K \left(\sum_{i=1}^{n_p} \left(Q_{Pi}(t_k) \cdot H_{Pi}(t_k) \cdot \left(\frac{1}{\eta_{Pi}(t_k)} - 1 \right) \right) \right) \cdot \Delta t_k$$

Ecuación 11

Donde,

- $E_p(t)$: Energía Perdida en las Bombas en kWh.
- γ : Peso Específico del Agua en KN/m³.
- $Q_{Pi}(t_k)$: Caudal aportado por el equipo de Bombeo en el instante t_k en m³/s.
- $H_{Ni}(t_k)$: Altura piezométrica aportado por el equipo de Bombeo en el instante t_k en m.c.a.

- Δt_k : Intervalo de tiempo considerado en s.
 - $\eta_{Pi}(t_k)$: Rendimiento del equipo de Bombeo en el instante t_k .
- **Energía Acumula en Depósitos:** En muchas redes se cuentan con depósitos de agua generalmente utilizados para la gestión del sistema entregando el líquido en las horas valles desde los depósitos. Se considera únicamente la diferencia entre la energía existente entre el inicio de la simulación y la final del mismo puesto que el flujo neto circulante a lo largo de la simulación en tiempos largos es igual a cero. Adicionalmente se puede manifestar que un valor positivo de la diferencia de los niveles del depósito indica un término sumidero de energía, su cálculo viene determinado por la siguiente ecuación:

$$\Delta E_c = E_{cf} - E_{ci} = \frac{\gamma \cdot A}{2} (Z^2(t_f) - Z^2(t_i))$$

Ecuación 12

Donde,

- ΔE_c : Energía Acumula en Depósitos en kWh.
- γ : Peso Específico del Agua en KN/m³.
- A : Área del depósito en m².
- $Z^2(t_f)$: Cota final del depósito en el tiempo final de la modelación en m².
- $Z^2(t_i)$: Cota inicial del depósito en el tiempo final de la modelación en m².

3.2. Indicadores energéticos básicos

Los indicadores son medidas de la eficiencia y efectividad de los servicios prestados, que permiten evaluar el estado actual del sistema (Cabrera Rochera, 2021). Por lo que los indicadores se convierten en una herramienta para visualizar de mejor manera deficiencias y fijar metas para una mejor gestión de los sistemas de agua presurizados. Son una herramienta de comunicación fácil de entender en los niveles de actores que tiene que ver con un determinado sistema.

En la literatura se pueden encontrar una gran variedad de indicadores. Zaman et al. (2021) realizaron una revisión exhaustiva sobre el análisis y la gestión de la energía en las redes de distribución de agua, donde recopilaron los indicadores/índices de rendimiento energético que se detallan a continuación.

Un indicador energético muy utilizado es la intensidad energética (IE), que mide la eficacia con la que la energía se convierte en una producción rentable. El IE no es un indicador ideal para representar la eficiencia energética de la red ya que no facilita la comparación entre diferentes sistemas. Los primeros indicadores para el análisis de la eficiencia energética de las redes de distribución de agua los propusieron Pelli y Hitz (2000): el Indicador de Estructura (I_l) y el Indicador de Calidad (Q_l).

Dentro de los indicadores de desempeño de la IWA (International Water Association), se proponen dos índices básicos para representar los rasgos permanentes de las redes: la naturaleza de la energía (C_1) y la necesidad de energía de la red (C_2). Los valores de estos índices permanecen más o menos constantes para una red específica, por tanto, no pueden utilizarse para informar sobre el rendimiento continuo del sistema.

Otros indicadores se han propuesto en los últimos años y algunos de ellos se recogen en la Tabla 4. En esta tabla, los autores analizaron el tipo de indicador, diferenciando entre índice (I_x), con valor dentro un rango definido, e indicador (I_n), que no tiene un rango específico. Además, se analizó la relación con la eficiencia energética (correlación directa, +ve, o correlación indirecta, -ve) y la especificidad del sistema (específico del sistema, S, o no específico del sistema, NS). De esta forma se tiene una visión general de los indicadores, permitiendo compararlos entre sí.

Tabla 4. Características más destacadas de algunos índices de rendimiento energético y su aplicabilidad. Fuente: (Zaman et al., 2021).

Theoretical basis of EPIs	Name	Symbol	Mathematical formulation	Unit	Range	Type [®]	Specificity*	Correlation to efficiency [#]	Applicability/Remarks
Ratio of input energy to economic growth incurred	Energy Intensity	EI	E_{INPUT}/P	kWh/Rs	—	I_N	S	-ve, I	Used as a macro-economic energy indicator
Ratio of minimal energy to normalised water delivered	Structure Indicator	I_f	E_{MIN}/Q_v	kWh/ m^3	—	I_N	NS	-ve, D	Normalized Q_v to be used
Ratio of energy pumped to minimal energy	Quality Indicator	Q_t	E_p/E_{MIN}	—	>1	I_x	NS	-ve, D	Inverse of efficiency
Ratio of natural energy to input energy	Energy nature	C_1	E_N/E_{INPUT}	—	0–1	I_x	S	+ve; I	Describes the natural <i>EE</i> of the system
Ratio of minimal useful energy at each node to ideal energy	Network energy requirement	C_2	$E_{U,min}/E_{IDEAL}$	—	0–1	I_x	S	+ve, I	Higher C_2 signifies a near flat network

Theoretical basis of EPIS	Name	Symbol	Mathematical formulation	Unit	Range	Type [®]	Specificity*	Correlation to efficiency [#]	Applicability/Remarks
Input energy to provide 1 m ³ (Q _v) against 100 m elevation (H)	Normalized Energy Consumption	NEC	$E_{INPUT}/(Q_v \times H)$	kWh/ m ³ / 100m	—	I _N	S	-ve, I	
Ratio of reactive energy consumption to input energy	Reactive Energy Consumption	REC	$(E_{reactive}/E_{INPUT}) \times 100$	%	0–100	I _x	S	-ve, I	Energy spent in inductive equipment of networks
Ratio of energy recovered from the system to input energy	Energy Recovery	ER	$(E_{RECOVERED}/E_{INPUT}) \times 100$	%	0–100	I _x	S	+ve, I	Depends on topographic energy
Ratio of the hydraulic power supplied to the power absorbed by pumping station (PS)	Pumping EE	PEE	$(P_{INPUT}/P_{absorbed}) \times 100$	%	0–100	I _x	S	+ve, I	It signifies the design efficiency of the PS
Ratio of the water head balance to the supply head of pumping system	Supply EE	SEE	$(H_{source} - H_C/H_{pump}) \times 100$	%	0–100	I _x	S	+ve, I	It is the ratio of energy supplied to energy consumed
Ratio of minimal energy required to the actual energy consumed	Global EE	GEE	$PEE \times SEE$	%	0–100	I _x	S	+ve, I	It is the ratio of energy required to energy consumed
Ratio of power at minimum service pressure to actual power used	Water Network EE	WNEE	$(P_{min}/P_{TOTAL}) \times 100$	%	0–100	I _x	NS	+ve, D	Inverse of I ₂ in terms of power
Ratio of minimal energy to the pump energy of a leak-free network	Natural energy efficiency	NEE	E_{MIN}/E_{FO}	—	0–1	I _x	NS	+ve, D	Each energy component is assessed individually to identify inconsistencies affecting its energy
Ratio of pump energy in a leak-free network to that of the actual network	Leakage energy efficiency	LEE	E_{FO}/E_P	—	0–1	I _x	S	+ve, I	
Ratio of pump energy in actual network to electrical energy consumed by pumps	Pumping energy efficiency	PEE	E_P/E_{PC}	—	0–1	I _x	S	+ve, I	
Ratio of minimal energy to the electrical energy consumed by pumps	Water supply energy efficiency	WSEE	$NEE \times LEE \times PEE$	—	0–1	I _x	S	+ve, I	WSEE can be used for inter-comparisons of different networks

Theoretical basis of EPis	Name	Symbol	Mathematical formulation	Unit	Range	Type [®]	Specificity*	Correlation to efficiency [#]	Applicability/Remarks
Ratio of input energy to minimal useful energy, in an ideal network	Excess of energy supplied	I_1	$E_{INPUT}/E_{U,ideal}$	—	>1	I_x	NS	-ve, D	Signifies theoretical excess energy supplied
Ratio of useful energy at consumer nodes to input energy	Network Energy efficiency	I_2	E_U/E_{INPUT}	—	0–1	I_x	S	+ve, I	
Ratio of energy dissipated by friction to input energy	Frictional energy	I_3	E_F/E_{INPUT}	—	0–1	I_x	S	-ve, I	Does not segregate pump efficiency
Ratio of energy wasted due to leakage and additional frictional energy to input energy	Leakage energy	I_4	$\frac{E_L + E_F - E_{F,leakfree}}{E_{INPUT}}$	—	0–1	I_x	NS	-ve, D	
Ratio of useful energy to the minimal useful energy of the system	Standards compliance	I_5	$E_U/E_{U,min}$	—	>1	I_x	NS	+ve, D	Signifies the excess energy at consumer end
Ratio of unavoidable minimum energy (UME) at pump to the actual energy consumption	Energy efficiency indicator	EEI	UME/E_{INPUT}	—	0–1	I_x	NS	+ve, D	Can be reasonably decreased to achieve efficiency
Ratio of minimal energy to the input energy in an ideal system	Ideal Efficiency	η_{ai}	$E_{MIN,ideal}/E_{INPUT,ideal}$	—	0–1	I_x	NS	+ve, D	Signifies the energy recovery potential of an ideal network
Ratio of minimal energy to the input energy in a real system	Real Efficiency	η_{ar}	$E_{MIN,real}/E_{INPUT,real}$	—	0–1	I_x	NS	+ve, D	Signifies the energy recovery potential of a real network
Ratio of minimal energy to target energy to be supplied	Energy Performance Target	$\eta_{ar,o}$	$\eta_{ai}(E_{MIN,ideal}/E_{INPUT})$	—	0– η_{ai}	I_x	NS	+ve, D	It signifies how close a system is to its ideal nature
Ratio of input energy to the number of consumers, N	Energy consumption per Consumer	EPC	E_{INPUT}/N	$kWh/no.$	—	I_N	S	-ve, I	
Ratio of cost of input energy to the number of consumers, N	Energy Cost per Consumer	CPC	C_{INPUT}/N	$Rs./no.$	—	I_N	S	-ve, I	It is EPC expressed in monetary value
Ratio of total input energy costs to the total municipal expenses	Energy Costs per municipal Expenses	GPE	$(C_{INPUT}/C_{TOTAL}) \times 100$	%	0–100	I_x	S	-ve, I	Signifies financial burden of energy
Ratio of consumption per energy source to the total energy consumption	Percentage of Energy Source	ES	$(E_{INPUT}/E_{TOTAL}) \times 100$	%	0–100	I_x	S	-ve, I	Contribution of each energy source in a multi-source system
Ratio of renewable energy consumption to the total energy consumption	Percentage of Renewable Energy Source	RES	$(E_{RE}/E_{TOTAL}) \times 100$	%	0–100	I_x	S	+ve, I	Contribution of renewable energy in multi-source system

En el presente trabajo se proponen un sistema de indicadores, la mayoría se recogen en la Tabla 4 y otros son de otros autores. Los indicadores se han asociado en tres grupos: Indicadores de Contexto (Cabrera Rochera, 2021), Indicadores de Gestión (Cabrera et al., 2010) e Indicadores de Diagnóstico (Cabrera et al., 2010)(Cabrera Marcet et al., 2014)(del Teso et al., 2019). A continuación, se hará una descripción de los grupos y los indicadores que los integran:

- ❖ **Indicadores de Contexto:** Dentro de este grupo se puede encontrar el indicador “Procedencia de la Energía”, el cual relaciona la Energía Natural con la Energía Total de Entrada. Alcanza el valor máximo cuando toda la energía inyectada es gravitacional.

$$\text{Procedencia de Energía: } C1 = \frac{E. \text{ Natural.}}{E. \text{ Entrada.}}$$

Ecuación 13

- ❖ **Indicadores de Gestión:** Se agrupan en esta clasificación cuatro indicadores:

- **Indicador Exceso de Energía Suministrada:** Relaciona la Energía de entrada Total con la Energía Mínima Requerida por los Usuarios (E_{uo}). Este indicador representa las veces que excede la energía entrante a la energía mínima requerida por los usuarios.

$$\text{Exceso de Energía Suministrada: } I1 = \frac{E. \text{ Entrada.}}{E_{uo}}$$

Ecuación 14

- **Indicador Eficiencia de la Red:** Relaciona la Energía Útil con la Energía de Entrada al sistema. Cuanto mayor sea este indicador, mayor será la eficiencia energética.

$$\text{Eficiencia de la Red: } I2 = \frac{E. \text{ Útil.}}{E. \text{ Entrada.}}$$

Ecuación 15

- **Indicador de Energía de Fricción:** Relaciona perdida por fricción en las paredes de la Tubería con la Energía de Entrada al Sistema. Este indicador debe mantenerse en cifras razonables de 0.2 y 0.4, según indica Gómez Sellés (2016). Valores superiores indican que las pérdidas de

carga son excesivas, lo cual supone un malgasto de energía. Por el contrario, valores muy bajos pueden indicar que el dimensionamiento de las conducciones no es correcto.

$$\text{Energía de Fricción: } I3 = \frac{E. \text{Fricción.}}{E. \text{Entrada.}}$$

Ecuación 16

- **Indicador de Suficiencia en el Cumplimiento de Estándares:** Relaciona la Energía Útil con la Energía Mínima Requerida por los Usuarios (E_{uo}). Si toma un valor inferior a 1 indica que la red tiene un nivel insuficiente de presiones. Si por el contrario toma un valor superior a la unidad, indica que la red mantiene presiones por encima de los mínimos necesarios. Mientras más se acerque este indicador a la unidad, mayor será la eficiencia en la gestión de presiones.

$$\text{Energía de Fricción: } I4 = \frac{E. \text{Útil.}}{E_{uo.}}$$

Ecuación 17

- ❖ **Indicadores de Diagnóstico:** En esta agrupación se consideró para el presente trabajo los indicadores:

- **Indicador Rendimiento Real:** Este indicador relaciona la Energía Mínima Requerida por los Usuarios (E_{uo}) con la Energía de Entrada al Sistema.

$$\text{Rendimiento Real: } \eta_r = \frac{E_{uo.}}{E. \text{Entrada.}}$$

Ecuación 18

- **Indicador Rendimiento Ideal:** Este indicador relaciona la Energía Mínima Requerida por los Usuarios (E_{uo}) con la Energía Ideal mínima requerida por el sistema. Representa el valor más alto de eficiencia energética del sistema por sus características. Este valor no puede alcanzarse ya que se obtiene en condiciones ideales sin ningún tipo de pérdidas, pero sirve como referencia para tener una referencia de mejora del rendimiento.

$$\text{Rendimiento Real: } \eta_i = \frac{E_{uo.}}{E. \text{Ideal.}}$$

Ecuación 19

- **Indicador Topografía Real:** Este indicador relaciona la Energía Topográfica con la Energía de Entrada. Representa el porcentaje de energía de entrada que viene dada por la topografía. Si se obtienen valores muy altos indica que el terreno es muy irregular o que las fuentes de suministro están ubicados a mayor altura de la necesaria. En cambio, tomará valores próximos a 0 en redes planas con diseños eficientes energéticamente.

$$\text{Topografía Real: } \theta_{tr} = \frac{E. \text{Topográfica.}}{E. \text{Entrada.}}$$

Ecuación 20

- **Indicador de Exceso:** Considera la relación entre la Energía en Exceso con la Energía de Entrada.

$$\text{Exceso: } \theta_{er} = \frac{E. \text{Exceso.}}{E. \text{Entrada.}}$$

Ecuación 21

- **Indicador Intensidad Energética Real:** Este indicador es la relación matemática de la Energía de Entrada con el Volumen de agua demandado sin considerar las fugas. Representa la energía por m³ de agua suministrado a los consumidores en la red real.

$$\text{Intensidad Energética Real: } I_{er} = \frac{E. \text{Entrada.}}{V. \text{Demandado sin Fugas.}}$$

Ecuación 22

- **Indicador Intensidad Energética Ideal:** Se refiere a la relación matemática entre la Energía Ideal de Entrada y el Volumen demandado por el sistema sin considerar las fugas. Representa la energía por m³ de agua suministrado a los consumidores en la red ideal sin ningún tipo de pérdida. Sirve como referencia para conocer el margen de mejora de la intensidad energética de la red.

$$\text{Intensidad Energética Ideal: } I_{ei} = \frac{E. \text{Ideal Entrada.}}{V. \text{Demandado sin Fugas.}}$$

Ecuación 23

CAPÍTULO 4. HERRAMIENTA INFORMÁTICA DESARROLLADA

Como resultado de este TFM se ha desarrollado la herramienta informática ITAEnergy2.0, que permite realizar la auditoría energética a redes de abastecimiento presurizadas. Este programa fue desarrollado en el lenguaje de programación Visual Basic .NET, lo cual automatiza el cálculo de las energías e indicadores y a la vez posibilita el aumento de la capacidad de procesamiento de la aplicación “Auditoría energética ITA”. De esta forma se convierte en una herramienta más robusta de análisis para los ingenieros y gestores de los sistemas de agua presurizados.

4.1. Datos de Partida

Como se ha mencionado anteriormente, para realizar la auditoría energética se debe tener el modelo hidráulico calibrado del sistema de agua presurizado que se quiere estudiar.

El programa trabaja con la Toolkit de EPANET por lo que es imprescindible utilizar el archivo de texto con extensión .INP del modelo para que se efectúen los cálculos con el motor de cálculo de EPANET.

Antes de iniciar la auditoría se debe fijar dos parámetros del tiempo de cálculo: el intervalo de cálculo hidráulico y el tiempo de simulación.

Consideraciones al intervalo de cálculo hidráulico

El intervalo de cálculo hidráulico es el tiempo que transcurre entre cada uno de los cálculos hidráulicos realizados en el sistema. El programa desarrollado ofrece 4 opciones: 5, 15, 30 y 60 minutos. Es importante definir este parámetro en función del tamaño de la red y la presencia de depósitos. A medida que se reduce el intervalo de cálculo aumenta la cantidad de valores almacenados en la matriz de resultados, lo cual puede ralentizar el programa, pero a la vez obtendrán resultados más precisos. Cuando existen depósitos la elección del intervalo de cálculo es complicada porque no necesariamente coincidirá con el instante de llenado y de vaciado total del depósito.

Durante la auditoría se puede apreciar un error en la energía que entra y la energía que sale, sobre todo en el caso del suministro con depósitos debido a que el paso hidráulico no coincide con el intervalo de cálculo. Cuando esto sucede, los valores de caudales que quedan entre intervalos de cálculo se desprecian y, por tanto, se desvirtúa el resultado. Para que esto no pase, el instante en el que el depósito alcance su nivel máximo o su nivel mínimo en un momento debe coincidir con la finalización del intervalo de cálculo seleccionado. El error que se produce se puede minimizar reduciendo el intervalo de cálculo hidráulico.

El intervalo de cálculo más corto son 5 minutos porque se ha observado que un intervalo más corto ralentiza excesivamente el programa, además que el motor de cálculo de EPANET avisa que el sistema es inestable. Tampoco se recomienda un intervalo de cálculo superior a los 60 min ya que el error cometido aumenta.

Consideraciones al tiempo de simulación

Por otro lado, el tiempo de simulación es la duración total de la simulación en horas. Cuando existen depósitos el tiempo de simulación debe ser extenso para que la energía de compensación del depósito sea menor con respecto al resto de energías y así la influencia del depósito sea despreciable. Esto se debe a que el ciclo de llenado y de vaciado del depósito no necesariamente coincidirá con el tiempo de simulación. Cabrera et al. (2010), cuantifica con la Ecuación 24 el tiempo de simulación (t_p) a partir del cual la influencia del depósito es despreciable. Donde $\Delta E_{c,max}$ es la energía de compensación de los depósitos del sistema.

$$t_p(\text{días}) = \frac{\Delta E_{c,max}}{\frac{1}{100} \cdot E_{entrada}(\text{diario})}$$

Ecuación 24

En el resto de los casos, el tiempo total de simulación no es crítico. Al contrario de lo que ocurre con el intervalo de cálculo, cuanto mayor es el tiempo de simulación más valores se almacenan en la matriz de resultados.

Presión de Servicio

Por último, se debe introducir la presión mínima de servicio requerida. Esta es la presión mínima que se debe garantizar en todos los nudos de consumo en todo momento. Esta presión se toma como referencia para determinar si los nudos de consumo cumplen con los criterios mínimos de funcionamiento o, por si el contrario, existen sobrepresiones.

Este parámetro viene determinado fundamentalmente por el ente regulador que supervisa el correcto funcionamiento de la red de distribución. En algunos países este parámetro se establece desde una normativa nacional como es el caso de Brasil, que mediante la norma técnica “NBR 12218 – Proyecto de red de distribución de agua para el servicio público” precisa que la presión mínima en las tuberías debe ser de 100 kPa (10,20 mca). En el caso del Reino Unido, el Sistema de Normas Garantizadas (GSS, por sus siglas en inglés) establece que la presión mínima que se debe asegurar en la acometida es de 0,7 bar (7,14 mca). En España no existe una normativa a nivel nacional, pero si a nivel regional o de abastecimiento. Por ejemplo, en el término municipal de Palma de Mallorca las “Normas técnicas para el proyecto y ejecución de obras de abastecimiento de agua potable”, determina que el conjunto del abastecimiento debe garantizar una presión mínima de 20 mca. En cambio, el “Reglamento del Servicio de Abastecimiento de Agua Potable de la Ciudad de Valencia” especifica que la presión nunca de ser inferior a 2,5 kp/cm² (25 mca). Las “Normas para redes de abastecimiento” del Canal de Isabel II señalan que la presión de funcionamiento no debe ser inferior a 0,25 MPa (25,49 mca) en la red de distribución. Por tanto, el mínimo valor que puede tomar este parámetro dependerá de la localización de la red y la normativa a la cual esté sujeta.

Si la presión en la red está por debajo del mínimo requerido se pueden generar problemas como por ejemplo (Vela et al., 1994):

- No satisfacer adecuadamente la demanda de ciertos usuarios.
- Dar lugar a la cavitación.
- Intrusión de contaminantes a la red.
- Roturas por aplastamiento.

4.2. Resultados del programa

ITAEnergy 2.0 detalla:

- Balance hídrico:
 - Volúmenes del sistema: Tanto el volumen inyectado total como el volumen inyectado por cada fuente de suministro. También el volumen consumido por los nudos, que se calcula con la demanda base y la curva de modulación. Por último, el volumen fugado en caso de que el caudal fugado sea representado en el modelo matemático mediante emisores.
 - Indicadores del sistema: Se calculan dos indicadores de rendimiento tradicionales básicos, por su simplicidad a pesar de que ofrezcan una visión limitada de la red.
 - Rendimiento volumétrico: Es la relación entre el volumen consumido y el volumen inyectado al sistema en un mismo periodo de referencia. Cuanto mayor es el valor, mejor es el estado de la red ya que indica que gran parte del volumen inyectado está llegando a los consumidores y no se pierde en fugas. Un valor superior al 15% puede considerarse aceptable según Vela et al. (1994). El complementario del rendimiento volumétrico es el indicador “Fi46- Volumen de agua no facturada (ANF) (%)” de la IWA, que relaciona el agua no facturada con el volumen de entrada. El uso de este último indicador es más extendido y se ha observado que puede tomar diferentes valores dependiendo de región, moviéndose en un rango del 15% 35%. Expresar el volumen de consumido o el volumen de fugas como un porcentaje del volumen de entrada, no tiene en cuenta otros factores clave del funcionamiento de la red como la longitud de la red, el número de conexiones o la presión media de servicio. Este indicador debe complementar con otros ratios para valorar adecuadamente una red (Lambert et al., 1999).



- Fugas por unidad de longitud: Es la distribución del volumen fugados durante el tiempo de simulación, en la longitud total de las tuberías del modelo (en km). Es un ratio representativo del estado de conservación. Un valor guía orientativo puede ser $0,71 \text{ m}^3/\text{km}/\text{h}$. Es el indicador “Op24 - Pérdidas por longitud de tubería ($\text{m}^3/\text{km}/\text{día}$)” propuesto por la IWA. Sin embargo, este indicador tampoco tiene en cuenta el número de conexiones o la presión media de servicio. Un indicador más ambicioso, es el Indicador de Fugas Estructurales (IFE), que compara las pérdidas de agua reales con una estimación de las pérdidas de un sistema bien construido y mantenido. Aunque el IFE también presenta limitaciones por los parámetros fijos que se utilizan en su cálculo.

- Auditoría Energética: Calcula las energías tal y como se detalla en el apartado 3.1, diferenciando entre energía total aportada y energía total consumida. Una ventaja de este programa es el desglose de la energía consumida o entregada por elementos. Por ejemplo, en el caso de una red con más de una bomba el programa dará como resultado el valor total del sistema y la implicación de cada bomba. Además de la energía perdida, el programa también informa sobre el rendimiento y las horas de funcionamiento para cada bomba. Este desglose permite valorar en que elementos centrar la atención, no solo teniendo en cuenta que equipo pierde más energía sino también el que mayor participación tiene en la red durante el período de tiempo analizado.

- Indicadores: Calcula los indicadores que se muestran en la siguiente tabla y que están detallados en el apartado 3.2.

Tabla 5. Indicadores propuestos en ITAEnergy 2.0

Indicador de contexto
Procedencia de la energía (C ₁)
Indicador de gestión
Exceso de energía suministrada (I ₁)
Indicador Eficiencia de la Red (I ₂)
Indicador de Energía de Fricción (I ₃)
Indicador de Suficiencia en el Cumplimiento de Estándares (I ₅)
Indicador de Gestión
Indicador Rendimiento Real (η_r)
Indicador Rendimiento Ideal (η_i)
Indicador Topografía Real (θ_{tr})
Indicador de Exceso (θ_{er})
Indicador Intensidad Energética Real (I _{er})
Indicador Intensidad Energética Ideal (I _{ei})

CAPÍTULO 5. CASOS DE ESTUDIO

Para ilustrar el proceso que realiza el programa desarrollado en este TFM e interpretar los resultados obtenidos, a continuación, se presentan tres ejemplos de aplicación.

5.1. Descripción de los casos

Caso 1. Sistema abastecido por gravedad

El primer caso de estudio es una red que se utilizó por primera vez en un artículo de Germanopoulos & Jowitt (1989), pero se dio a conocer con el artículo de Jowitt & Xu (1990). Posteriormente, se ha usado en diversas poblaciones como caso de estudio. La red en cuestión abastece desde 3 embalses a un conjunto de 22 nudos, como se muestra en la Figura 3. Este sistema tiene un caudal medio inyectado de 175,11 l/s y un caudal medio registrado de 150 l/s, lo cual indica que el caudal de fugas son 25.11 l/s. El caudal fugado se representa en el modelo mediante un coeficiente emisor diferente para cada nudo.

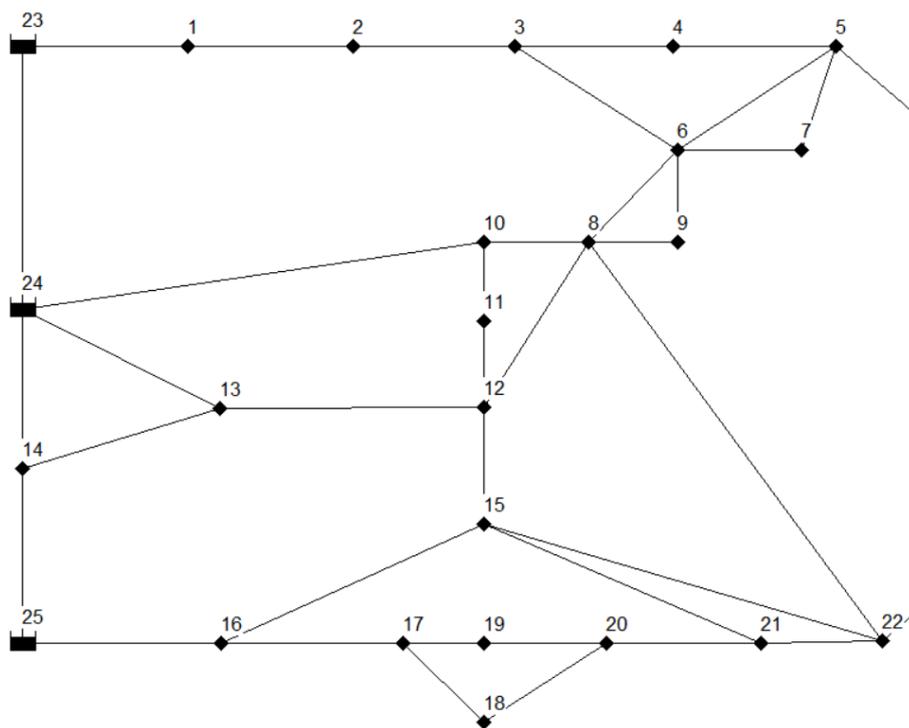


Figura 3. Red utilizada como caso de estudio 1 con la numeración de los nudos.

Los embalses desde los que se abastece la red tienen una altura total de 48.13 m para el embalse 23, 54.3 m para el embalse 24 y 54.2 m para el embalse 25. Ninguno de ellos sigue un patrón de modulación.

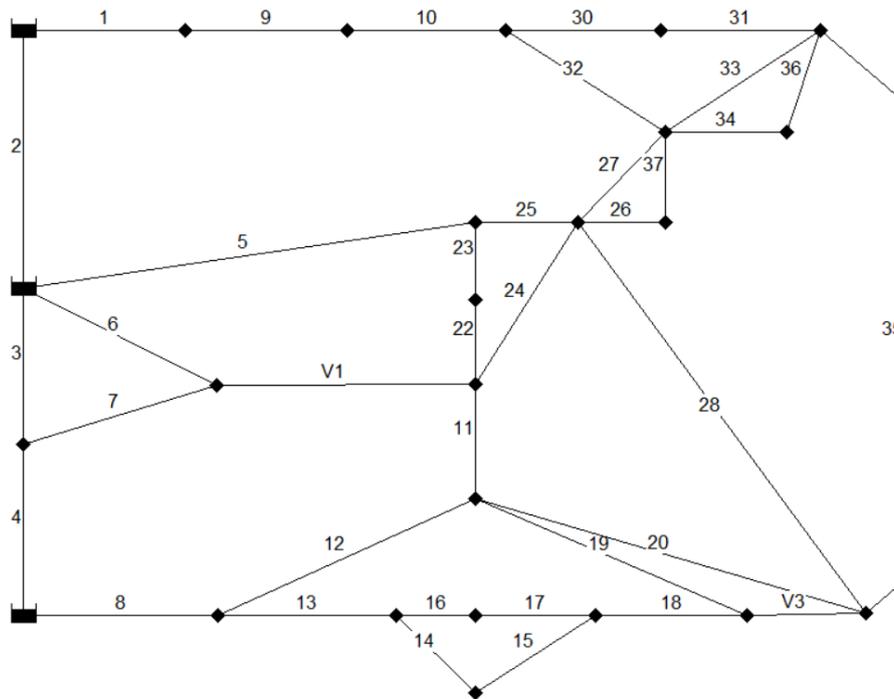


Figura 4. Red utilizada como caso de estudio 1 con la numeración de las líneas.

Se presenta, además, en la Figura 5, el mapa de cotas de los nudos de la red que permite apreciar su altimetría.

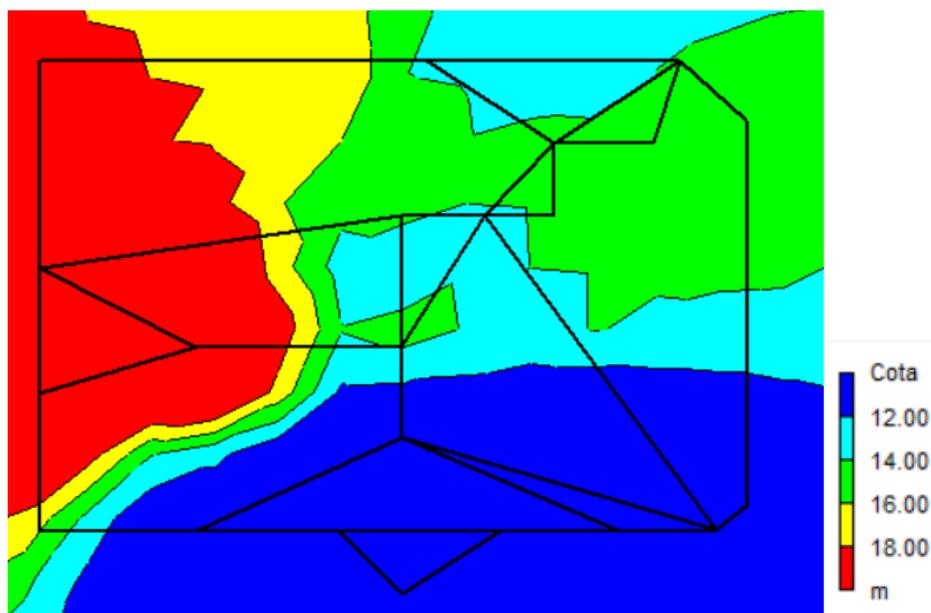


Figura 5. Mapa de contorno de cotas de nudo.

Las características de cada línea y nudo de la red se recogen en la Tabla 6. Cabe mencionar que la ecuación de pérdidas utilizada es la Hazen-Williams.

Tabla 6. Características propias de los nudos y líneas de la red.

Línea	Longitud (m)	Diámetro (mm)	Rugosidad	Nudo	Demanda Base (l/s)	Cota (m)	Emisor
1	606	457	110	1	5	18	0.012680
2	454	457	110	2	10	18	0.035400
3	2782	229	105	3	0	14	0.033750
4	304	381	135	4	5	12	0.005850
5	3383	305	100	5	30	14	0.019335
6	1767	475	110	6	10	15	0.020235
7	1014	381	135	7	0	14.5	0.005575
8	1097	381	6	8	20	14	0.018890
9	1930	457	110	9	0	14	0.003715
10	5150	305	10	10	5	15	0.020870
11	1996	229	95	11	10	12	0.006595
12	914	229	125	12	0	15	0.025675
13	822	305	140	13	0	23	0.017715
14	411	152	100	14	5	20	0.020500
15	701	229	110	15	20	8	0.030380
16	1072	229	135	16	0	10	0.014165
17	864	152	90	17	0	7	0.011525
18	711	152	90	18	5	8	0.005560
19	832	152	90	19	5	10	0.009680
20	2334	152	100	20	0	7	0.011380
22	777	229	90	21	0	10	0.021160
23	542	229	90	22	20	15	0.036810
24	1600	457	110				
25	249	305	105				
26	443	229	90				
27	743	381	110				
28	931	229	125				
30	326	152	100				
31	844	229	100				
32	1274	152	100				
33	1115	229	90				
34	615	381	110				
35	1408	152	100				
36	500	381	110				
37	300	229	90				
V1	762	457	110				
V3	2689	152	100				

Los nudos de consumo siguen una curva modulación horaria que es la misma para todos los nudos del modelo y se representa en la Figura 66.

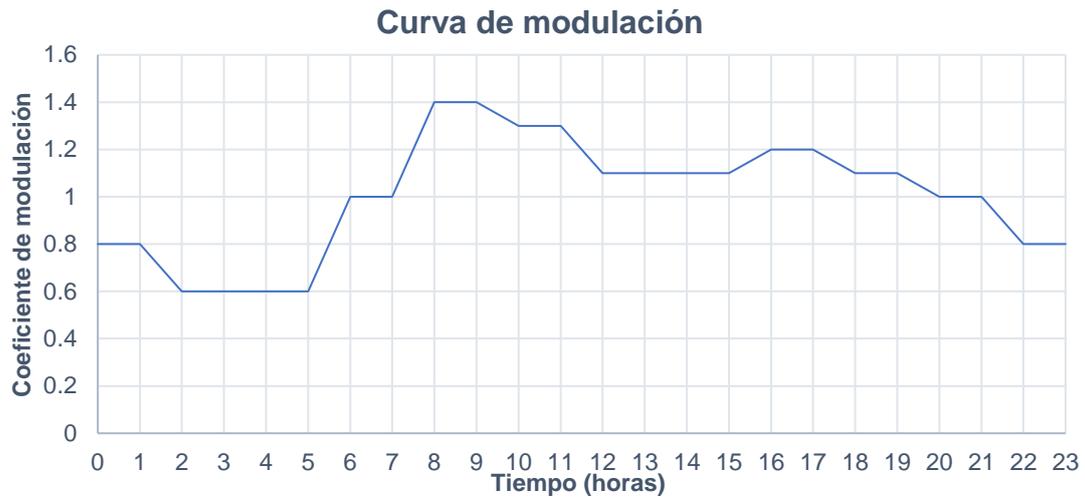


Figura 6. Curva de modulación diaria en la red del caso de estudio

Con el fin de mostrar otra utilidad del programa desarrollado, se ha impuesto a las bombas una curva de rendimiento, que considera las pérdidas mecánicas en la bomba misma, así como las pérdidas eléctricas en el motor de la bomba.

Tabla 7. Curvas de rendimiento de las bombas del caso 2.

Bomba B23		Bomba B24		Bomba B25	
Q	Rto.	Q	Rto.	Q	Rto.
lt/seg	%	lt/seg	%	lt/seg	%
0.0	0	0.0	0	0.0	0
2.8	22	27.8	20	11.1	35
5.6	35	55.6	35	22.2	55
8.3	48	83.3	48	33.3	68
11.1	55	111.1	58	44.4	75
13.9	62	138.9	70	55.6	78
16.7	68	166.7	75	66.7	79
19.4	70	194.4	80	77.8	77
22.2	69	222.2	83	88.9	76
25.0	65	250.0	85	100.0	70
27.8	60	277.8	86	130.0	0
40.0	0	305.6	87		
		333.3	85		
		361.1	83		
		388.9	80		
		416.7	78		
		600.0	0		

Caso 2. Sistema abastecido con bomba de velocidad fija

Este segundo caso se trata de la misma red que el caso 1, con dos diferencias. Las fuentes de suministro se encuentran a menor cota es necesario disponer de equipos de bombeo para impulsar el agua desde los embalses a la red de abastecimiento.

En este caso los embalses 23, 24 y 25 tienen la misma altura total de 7 m. Para la inclusión de las bombas en el modelo se han añadido 3 nudos de apoyo a la misma cota que los embalses, lo cuales no tienen demanda base ni coeficiente emisor.

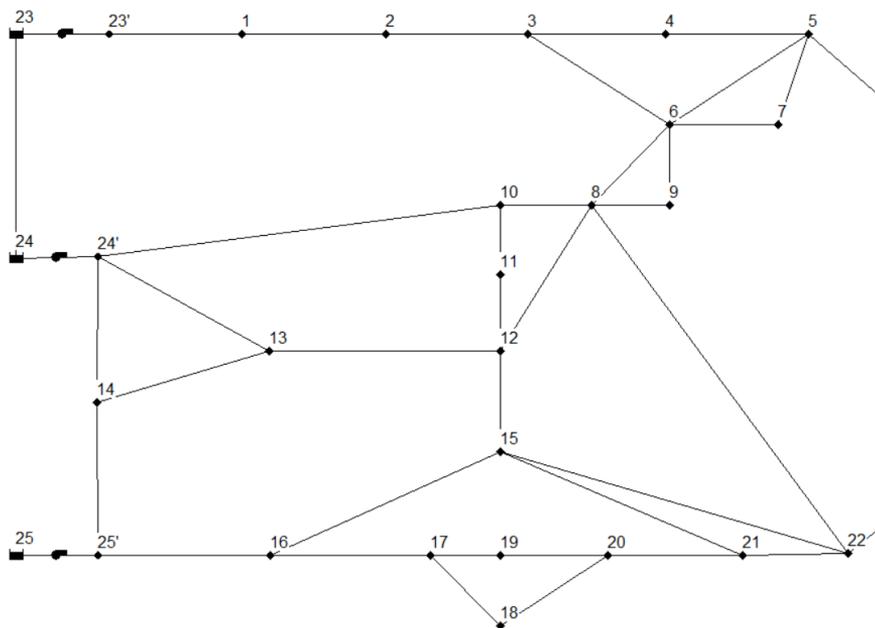


Figura 7. Red utilizada como caso de estudio 2 con la numeración de los nudos.

Las bombas se denominan igual que los embalses a los que están conectados pero cada una tiene una curva característica diferente. En la Tabla 8 se recogen los datos de las curvas características de las bombas, donde los parámetros A y C se refieren a la Ecuación 25 que calcula automáticamente EPANET a partir de un punto de funcionamiento de la bomba.

$$H = A - C \cdot Q^2$$

Ecuación 25

Tabla 8. Datos de las curvas características de las bombas del Caso 2.

ID bomba	Caudal nominal (l/s)	Altura nominal (m)	Parámetros ecuación	
			A	C
B23	25	40	53.33	0.02134
B24	130	60	80	0.001184
B25	60	33	44	0.003056

Caso 3. Sistema abastecido con bomba de velocidad variable

Este tercer caso se trata de la misma red que el caso 2, excepto en el variador de frecuencia que tiene cada bomba del sistema. Esto permitirá ajustar el caudal suministrado al caudal que demandan los usuarios.

El variador de frecuencia se representa en el modelo con un patrón que ajusta la velocidad de giro de la bomba. Cada bomba tiene su propio patrón de ajuste de velocidad que se muestran en la Figura 8, Figura 9 y Figura 10.

Patrón de velocidad- Bomba B23



Figura 8. Patrón de velocidad de la bomba 23 del caso 2.

Patrón de velocidad - Bomba B24

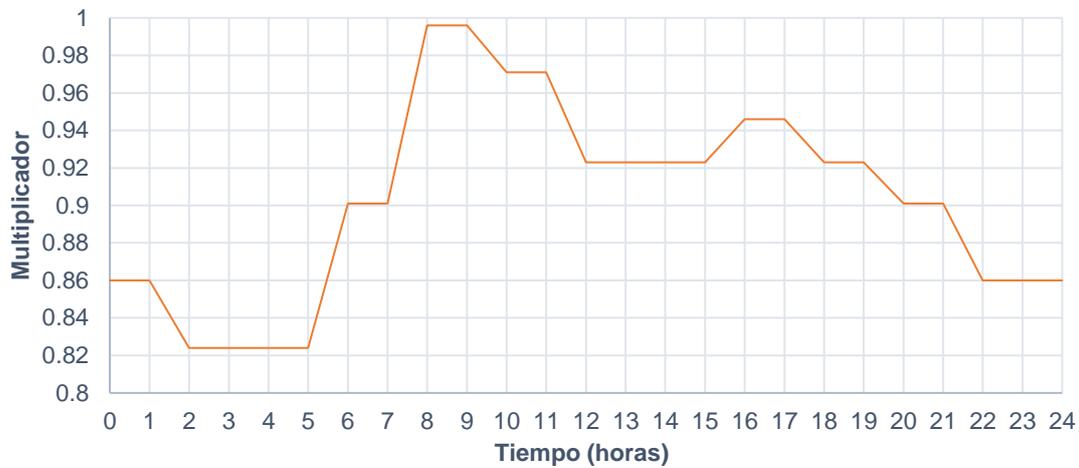


Figura 9. Patrón de velocidad de la bomba 24 del caso 2.

Curva de modulación - Bomba B25

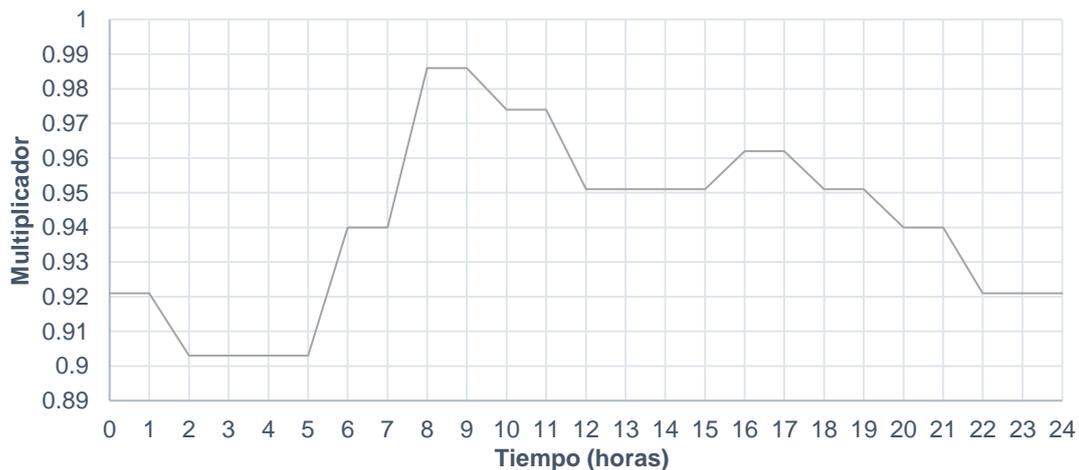


Figura 10. Patrón de velocidad de la bomba B25 del caso 2.

5.2. Condiciones de cálculo

Para la auditoría energética se establece para los tres casos de estudio las mismas condiciones de cálculo:

- Intervalo de cálculo hidráulico: 60 min
- Tiempo de simulación: 23 horas
- Presión mínima de servicio: 30 mca.

Se decide tomar este intervalo de cálculo porque el único cambio que se tendrá lugar en el sistema es el producido por la curva de modulación de consumo y

este cambio es hora a hora. No existen depósitos en el sistema en ninguno de los casos, por tanto, no habrá cambios durante el transcurso de una hora a hora.

La elección del tiempo de simulación también se debe a la curva de modulación del consumo y a la ausencia de depósitos. Como se observa en la Figura 6, existe un coeficiente de modulación para cada hora del día y este se repitará de la misma forma día tras días. Por tanto, realizar un estudio de más de 23 horas no aporta información adicional sobre la red estudiada. Esto es igual en los tres casos analizados.

5.3. Resultados obtenidos

Balance Hídrico

En primer lugar, se realiza el balance hídrico de la red (Figura 12). Por un lado, se obtienen el volumen inyectado al sistema, tanto el valor global como el valor para cada uno de los embalses. Con la información anterior, se calculan los indicadores del sistema (Figura 11).

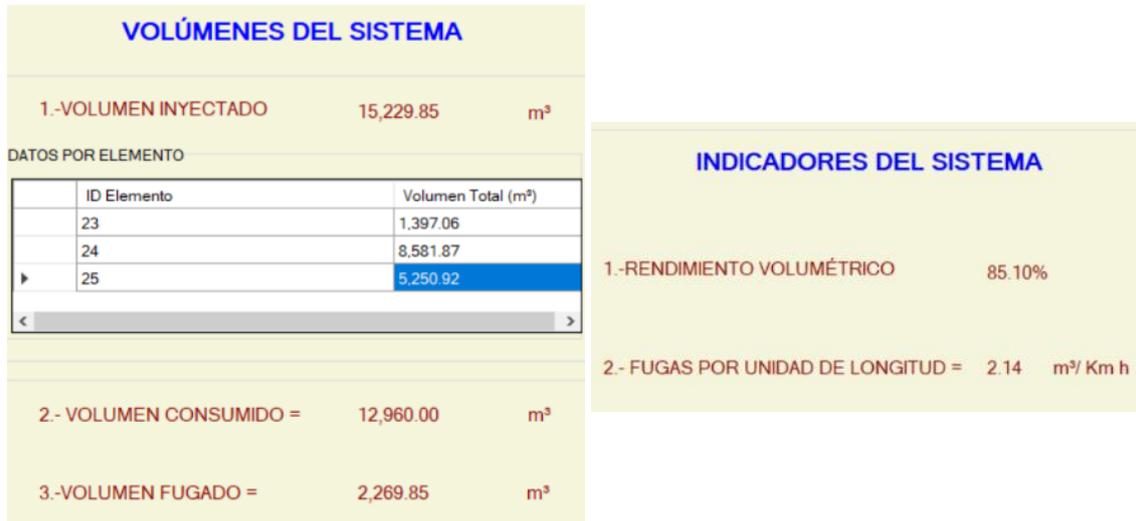


Figura 11. Resultados que entrega ITAEnergy2.0 sobre el balance hídrico del caso 1.

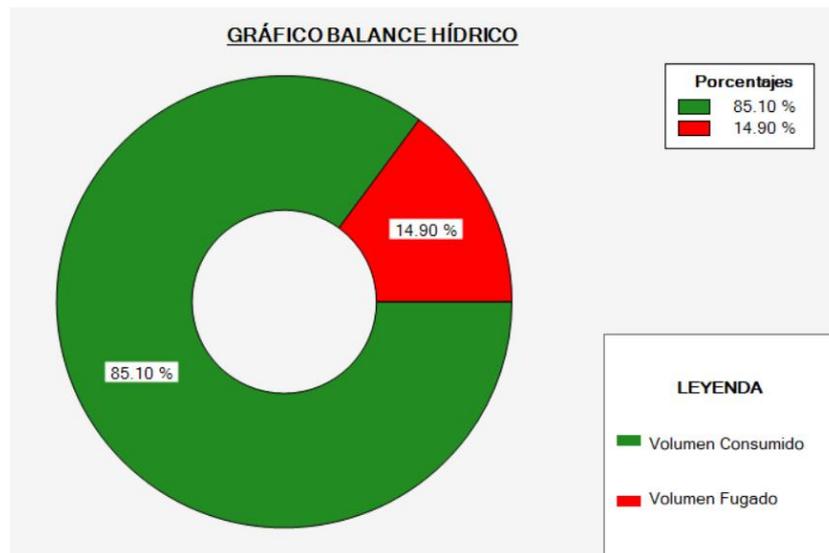


Figura 12. Gráfico del balance hídrico del caso 1 que presenta ITAEnergy2.0.

En la Tabla 9, además de mostrar el volumen total inyectado, se puede identificar cual es el embalse que aporta mayor o menor volumen al sistema. Esto aporta información valiosa si hay fuentes sobreexplotadas o, por el contrario, están aportando menor volumen del deseado. En todos los casos, el embalse 24 es el principal suministrador y el embalse 23 es el que menor volumen aporta al sistema. El volumen consumido es el mismo en los tres casos, porque la demanda es el mismo para todos y no se ve influido por la forma de suministrar el agua a la red.

Comparando el volumen inyectado, se observa que en el caso 2 se inyecta mayor volumen que en el resto de los casos. Esto puede estar ocasionado porque las bombas a velocidad fija aportan mayor presión que los embalses del caso 1. Como hay emisores, al aumentar la presión aumenta el caudal fugado, siendo el volumen consumido el mismo en todos los casos. Por el contrario, con las bombas de velocidad variable (caso 3) se obtiene el menor volumen inyectado. En este caso, las bombas se ajustan a los requerimientos de la red, aportando menor presión que en el caso 1 y caso 2. En este caso también influye la presencia de los emisores, pero con el efecto contrario que en el caso 2.

Tabla 9. Comparación de los volúmenes del sistema para los 3 casos de estudio.

Volúmenes del sistema	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Volumen inyectado total	15,229.85 m ³	15,840.68 m ³	15,121.84 m ³
Volumen inyectado embalse 23	1,397.07 m ³	1,571.56 m ³	1,529.90 m ³
Volumen inyectado embalse 24	8,581.86 m ³	11,047.99 m ³	10,464.13 m ³
Volumen inyectado embalse 25	5,250.92 m ³	3,221.12 m ³	3,127.81 m ³
Volumen consumido	12,960.00 m ³	12,960.00 m ³	12,960.00 m ³
Volumen fugado	2,269.83 m ³	2,880.68 m ³	2,161.84 m ³

En la Tabla 10 se comparan los indicadores del sistema. En rendimiento volumétrico en los 3 casos es alto, lo cual indica que la mayor parte del agua inyectada llega finalmente a los consumidores. Siendo mayor en el caso con bombas de velocidad variables y menor con las bombas de velocidad fija. El rendimiento volumétrico tiene dos componentes en el denominador, el volumen consumido y el volumen fugado. El primero se mantiene constante para los 3 casos, pero el segundo si cambia de un caso a otro debido a la variación de presión ocasionado por la forma de suministro.

Por lo que respecta a las fugas por unidad de longitud, el valor en los 3 casos es superior al valor de referencia (0,71 m³/km h). Esto indica que el volumen de fugas es abundante para el tamaño de la red y que contrasta la información aportada por el rendimiento volumétrico. A pesar de tener un rendimiento volumétrico elevado, el volumen de fugas puesto en contexto no es tan bajo. Claramente se evidencia la necesidad de contar con un indicador adicional al rendimiento volumétrico para conocer la situación del sistema.

Tabla 10. Comparación de los indicadores del sistema para los 3 casos de estudio.

Indicadores del sistema	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Rendimiento volumétrico	85.1 %	81.81 %	85.7 %
Fugas por unidad de longitud	2.137 m ³ /km h	2.71 m ³ /km h	2.04 m ³ /km h

Auditoría Energética

En segundo lugar, el programa muestra la auditoría energética diferenciando la energía aportada y la energía consumida, con ayuda de gráfico (Figura 13).

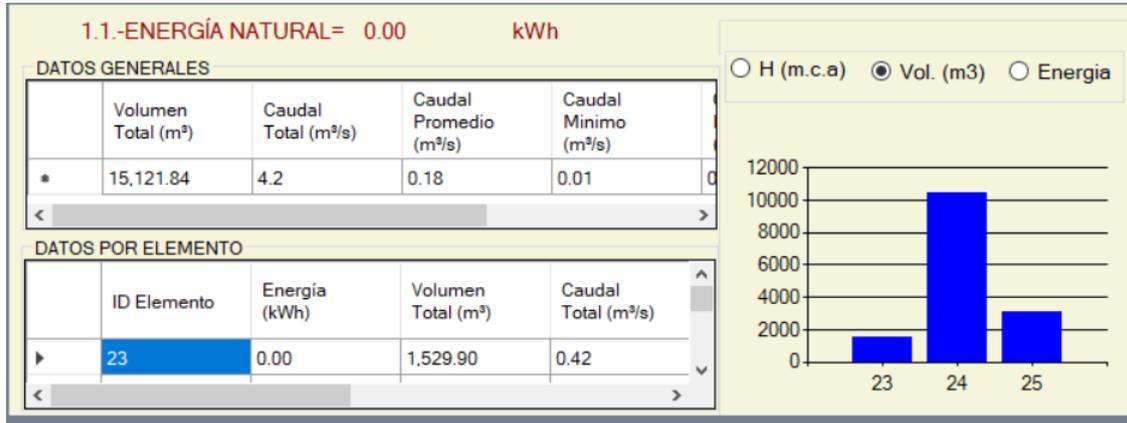


Figura 13. Resultados que entrega ITAEnergy2.0 sobre la energía natural del caso 3.

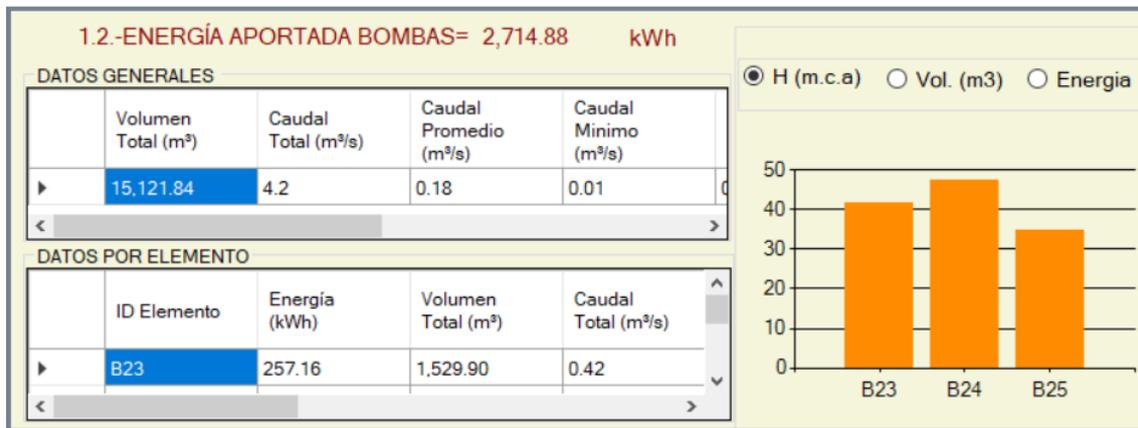


Figura 14. Resultados que entrega ITAEnergy2.0 sobre la energía aportada por las bombas del caso 3.

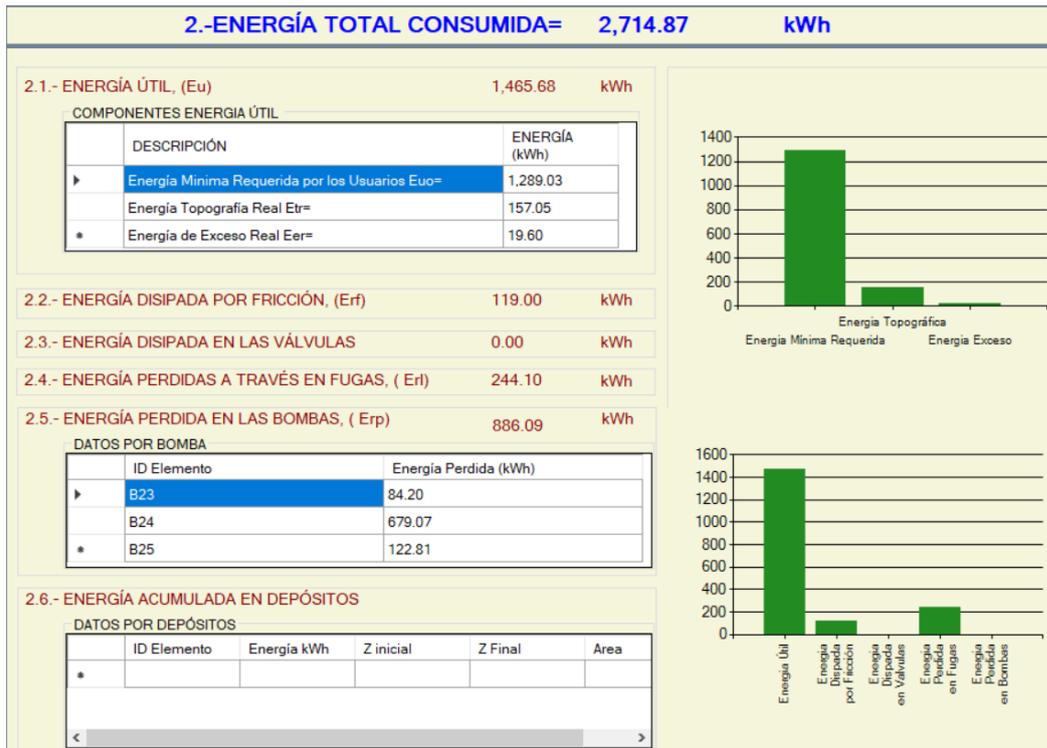


Figura 15. Resultados que entrega ITAEnergy2.0 sobre la energía consumida del caso 3.

Energía aportada al sistema

En el caso 1, no existen bombas en la red, por lo que solo habrá energía natural. Como se muestra en la Tabla 11, se desglosa la energía aportada por cada uno de los embalses que abastece el sistema.

Tabla 11. Resultados desglosados que entrega ITAEnergy 2.0 sobre la energía total aportada para el caso 1.

Energía total aportada	1,938.09 kWh
Energía natural	1,938.09 kWh
Energía del embalse 23	156.58 kWh
Energía del embalse 24	1,106.13 kWh
Energía del embalse 25	675.37 kWh

El programa también calcula otros datos de interés sobre las fuentes como se muestra en la Tabla 12. Al igual que gráficas de altura, volumen y energía por elemento.

Tabla 12. Datos por elemento de la energía aportada del caso 1 que presenta ITAEnergy2.0.

ID elemento	Energía (kWh)	Volumen total (m ³)	Caudal total (m ³)	Caudal promedio (m ³ /s)	Caudal mínimo (m ³ /s)	Caudal máximo (m ³ /s)	H media (m)
23	156.58	1,397.06	0.39	0.02	0.01	0.02	41.13
24	1,106.14	8,581.87	2.38	0.1	0.07	0.13	47.3
25	675.37	5,250.92	1.46	0.06	0.04	0.08	47.2

Esta información adicional que aporta el programa resulta útil porque da una visión general del comportamiento de cada embalse. No solo facilita el valor total o promedio, sino también el valor mínimo y máximo del caudal. Permitiendo así conocer el rango en el caudal se mueve cada embalse. Cabe mencionar que el volumen total y el caudal total son valores horarios.

En el caso 2 y el caso 3, se suministra agua desde los embalses con la ayuda de las bombas porque tienen altura de 7 metros (el punto más bajo del todo el sistema), por lo que la energía natural será nula y toda la energía será aportada por las bombas. Si los embalses hubiesen tenido mayor altura, aunque estuviesen las bombas, si habría energía natural en la red.

La Tabla 13 comparan para los casos 2 y 3, la energía aportada por cada una de las bombas. Se puede observar que la bomba B24 es la que mayor energía aporta al sistema, con diferencia, en ambos casos. Además, en el caso 2 aporta mayor energía que en el caso 23, siendo el elemento que marca la diferencia entre los dos casos. Eso puede deberse a la variación de la velocidad de giro, que permite ajustarse a los requerimientos de la red, tanto en caudal como en altura, lo cual influye directamente en la energía aportada por las bombas.

Tabla 13. Comparación de la energía aportada por las bombas del Caso 2 y Caso 3.

	Caso 2	Caso 3
Energía total aportada	3,552.85 kWh	2,714.88 kWh
Energía aportada por bombas	3,552.85 kWh	2,714.88 kWh
Energía de la bomba B23	290.98 kWh	257.16 kWh
Energía de la bomba B24	2,768.23 kWh	2,036.65 kWh
Energía de la bomba B25	493.64 kWh	421.07 kWh

Comparando la energía total aportada del caso 2 (3,552.85 kWh) con el caso 1 (1,938.09kWh), se observa las bombas están impulsando el agua a mayor altura que los embalses. Comprando la energía total del caso 1 con el caso 3 (2,714.88 kWh), se puede observar que la presencia de los variadores de frecuencia no se consigue aportar menos energía que los embalses. Una posible explicación a este suceso es que el patrón de velocidad de las bombas no sea el más adecuado para la red.

En la Tabla 14 y Tabla 15 se muestran los datos adicionales que entrega ITAEnergy2.0 para las bombas para los casos 2 y 3. Los valores del caudal total, promedio, mínimo y máximo son similares en ambos casos. Se puede observar una clara diferencia (≈ 13 mca) en la altura media de la bomba B24, que puede explicar el mayor aporte de energía de esta bomba en el caso 2. Una particularidad del programa es el rendimiento de las bombas, que es posible rescatar gracias a la versión 2.2 de Toolkit EPANET. El rendimiento medio es ligeramente superior en las bombas de velocidad variable. Cabe mencionar, que cuando varía la velocidad de giro el rendimiento se ve afectado.

Tabla 14. Datos por elemento de la energía aportada del caso 2 que presenta ITAEnergy2.0.

ID elemento	Energía (kWh)	Volumen total (m ³)	Caudal total (m ³)	Caudal promedio (m ³ /s)	Caudal mínimo (m ³ /s)	Caudal máximo (m ³ /s)	H media (m)	Rto. Medio (%)	Horas func.
B23	290.98	1,571.56	0.44	0.02	0.01	0.02	46.03	66.79	24
B24	2,768.23	11,047.99	3.07	0.13	0.09	0.16	60.1	64.6	24
B25	493.64	3,221.12	0.89	0.04	0.03	0.05	39.61	69.52	24

Tabla 15. Datos por elemento de la energía aportada del caso 3 que presenta ITAEnergy2.0.

ID elemento	Energía (kWh)	Volumen total (m ³)	Caudal total (m ³)	Caudal promedio (m ³ /s)	Caudal mínimo (m ³ /s)	Caudal máximo (m ³ /s)	H media (m)	Rto. Medio (%)	Horas func.
B23	257.16	1,529.90	0.42	0.02	0.01	0.02	41.51	66.83	24
B24	2,036.65	10,464.13	2.91	0.12	0.08	0.16	47.52	65.86	24
B25	421.07	3,127.81	0.87	0.04	0.02	0.05	34.9	70.08	24

Otro dato interesante que muestra el programa son las horas de funcionamiento de las bombas. En los casos estudiados las bombas trabajan las 24 horas del día, pero resultaría interesante en un caso donde una bomba tiene un rendimiento muy bajito pero participa muy poco en la red. En otras palabras, es importante el desglose porque permite centrar la atención en los elementos que más consumen y aportan a la red.

Energía consumida

En la Tabla 16 se muestran los resultados para los 3 casos. Como es de esperar la energía mínima requerida por los usuarios (E_{uo}) no cambia si se modifica la forma de suministro de agua. La energía topográfica real (E_{tr}) es más baja en el caso 3, lo cual señala que la bomba de velocidad está permitiendo que la energía aportada se aproxime más a la requerida, disminuyendo así el exceso de energía ligado a la topografía. Por el contrario, la E_{tr} en el caso 2 es mucho más alta, lo cual indica que las bombas de velocidad variable no están ayudando a disminuir el exceso de energía debido a la topografía, sino que lo aumentan. Con respecto a la energía de exceso real (E_{er}), en el caso 1 es nula porque el sistema se abastece a través de fuentes rígidas (los embalses) y, por tanto, la energía de exceso se debe a la topografía del terreno. En los casos 2 y 3, se puede observar que la energía de exceso real (E_{er}) ya no es nula, esto se debe a que el sistema ya no se abastece a través de una fuente rígida sino variable y también porque en el nudo crítico se está dando una presión superior a la presión de servicio. Si en el nudo crítico siempre existiera la presión de servicio, no habría exceso de energía. Resalta la diferencia que existe entre la E_{er} de los casos 2 (254.24 kWh) y el caso 3 (19.6 kWh), y evidencia que el exceso de presión que entregan las bombas de velocidad fija. Esta información resulta valiosa en un estudio donde se esté planteando la regulación de las bombas del sistema, tanto si se quiere mantener un bombeo con velocidad fija como si se quiere pasar a una de velocidad variable. Al final, la suma de las energías comentadas hasta ahora (E_{uo} , E_{tr} y E_{er}) es la energía finalmente entregada al usuario (E_u). El caso 2 entrega mayor E_u , por el contrario los casos 1 y 3 entregan una cantidad similar.

La energía disipada por fricción (E_{rf}) es mayor en el caso 1. Teniendo en cuenta que el caudal consumido es el mismo en todos los casos y que solo varía el volumen de fugas de un caso a otro, presentando el caso 2 el mayor volumen de fugas (Tabla 9), todo indica que las pérdidas de carga en el caso 1 son mayores que en el resto de casos. Por lo que respecta a la energía perdida a través de las fugas (E_{rl}), es mayor en el caso 2 ya que presenta mayor volumen de fugas. Por último, la energía disipada en las válvulas es nula porque no existen válvulas en ninguno de los casos.

Finalmente se comparará la energía perdida en las bombas (E_{rp}) de los casos 2 y 3, donde el factor determinante es el rendimiento. En general, las bombas del caso 3 pierden menos energía que las bombas del caso 2 pero sin deferencias notables ya que los caudales y alturas de bombeo son parecidos, al igual que los rendimientos medios. Además, es de esperar que la bomba B24, en ambos casos, sea la que mayores pérdidas produzca, teniendo en cuenta que es el que peor rendimiento medio tiene (Tabla 14 y Tabla 15) y porque es el que mayor caudal trasiega con diferencia. Con esta información los gestores de la red podrían plantearse estudiar con más detalle el funcionamiento de esta bomba.

Tabla 16. Comparación de los resultados desglosados que entrega ITAenergy 2.0 sobre la energía total consumida para los casos de estudio.

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Energía total consumida	1,938.09 kWh	3552.85 kWh	2714.87 kWh
Energía útil (E_u)	1,491.61 kWh	1,772.20 kWh	1,465.68 kWh
Energía mínima requerida por los usuarios (E_{uo})	1,289.03 kWh	1,289.03 kWh	1,289.03 kWh
Energía topográfica real (E_{tr})	202.58 kWh	228.92 kWh	157.05 kWh
Energía de exceso real (E_{er})	0.00 kWh	254.24 kWh	19.6 kWh
Energía disipada por fricción (E_{rf})	182.72 kWh	131.64 kWh	119.00 kWh
Energía disipada en las válvulas	0.00 kWh	0.00 kWh	0.00 kWh
Energía perdida en las fugas (E_{rl})	263.76 kWh	413.29 kWh	244.10 kWh
Energía perdida en las bombas (E_{rp})	0.00 kWh	1235.72 kWh	889.09 kWh
B23	0.00 kWh	95.91 kWh	84.20 kWh
B24	0.00 kWh	991.34 kWh	679.07 kWh
B25	0.00 kWh	148.47 kWh	122.81 kWh

La información de las energías del también se puede consultar en porcentajes mediante el gráfico de Energías. Es un gráfico de donut que está dividido en dos partes: la mitad inferior, donde se representa los tipos de energía aportada al sistema, y la mitad superior, donde se representa los componentes de la energía consumida. En la leyenda se detalla el porcentaje que supone una energía respecto la energía aportada o consumida, según sea el caso.

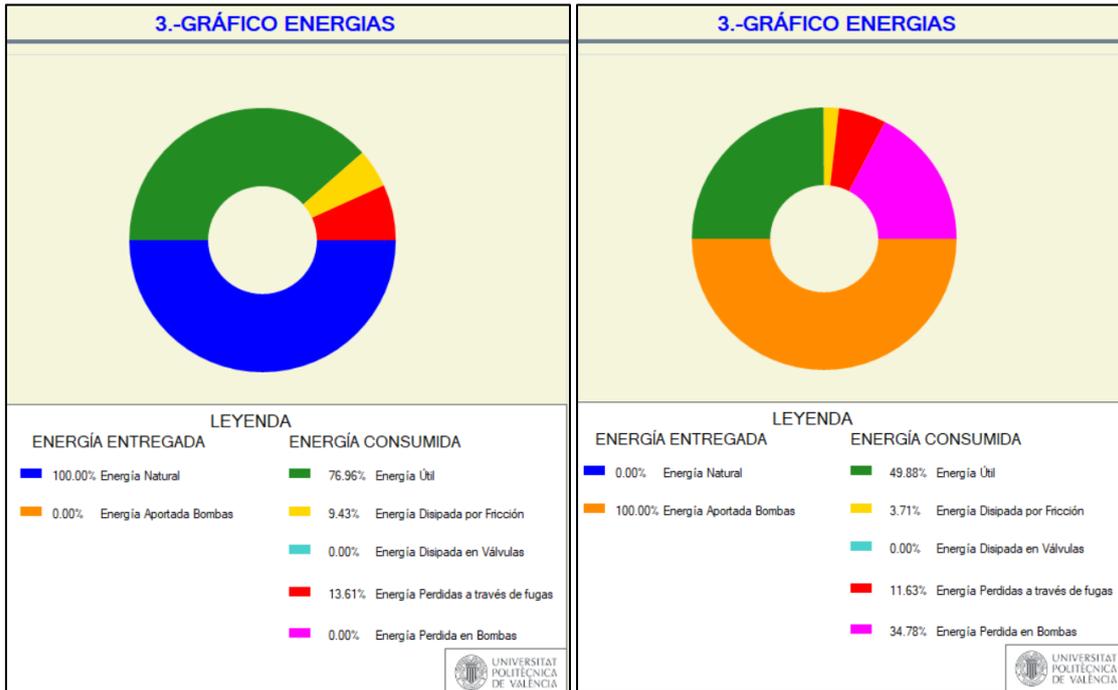


Figura 16. Gráfico de energías entrega ITAEnergy2.0 para el caso 1 (izq.) y el caso 2 (dcha.).

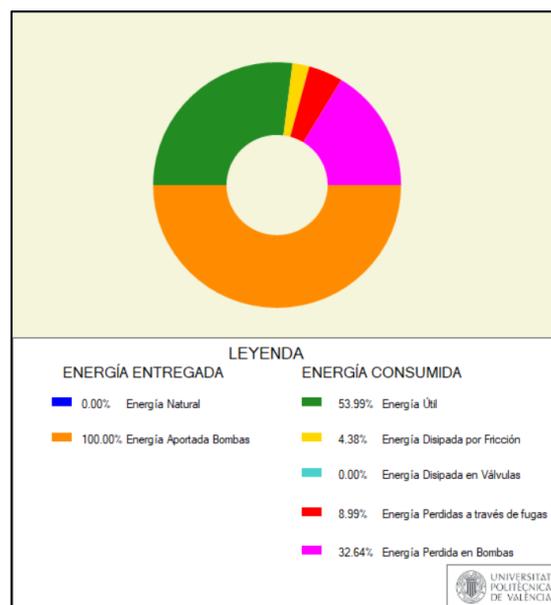


Figura 17. Gráfico de energías entrega ITAEnergy2.0 para el caso 3.

Indicadores

Por último, con los resultados de la auditoría energética se calculan 11 de indicadores divididos en 3 grupos. En primer lugar se muestra el único indicador de contexto propuesto, el de procedencia de energía. En el caso 1 este indicador toma el valor de 1 porque solo toda la energía aportada proviene de fuentes naturales. Por el contrario, en los casos 2 y 3 tienen un valor nulo porque toda la energía es aportada por las bombas.

Tabla 17. Comparación del indicador de contexto para los casos de estudio.

Indicador de contexto	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Procedencia de la energía (C ₁)	1	0	0

En la siguiente Figura 18 se puede observar como ITAEnergy2.0 muestra los resultados para los indicadores de contexto y de gestión.



Figura 18. Indicadores de contexto y de gestión del caso 1 que presenta ITAEnergy2.0.

A continuación, se exponen los indicadores de gestión (Tabla 18). El indicador de exceso de energía suministrada (I_1) es más bajo en el caso 1, lo cual señala que la energía aportada al sistema es aproximadamente 1.5 veces mayor a la energía mínima requerida por los usuarios. Los casos 2 y 3 se aportan más del doble de la energía que requieren los usuarios como mínimo. Con el indicador eficiencia de la Red (I_2) se puede saber el porcentaje de la energía inyectada en la red es realmente útil. Aquí también el Caso 1 sale mejor valorado que los otros restantes, con un 77% de eficiencia. En cambio el caso 2 roza el 50% de eficiencia y el caso 3 a penas lo supera. El indicador de Energía de Fricción (I_3) en los 3 casos presenta un valor bajo, muy debajo del rango de referencia (entre 0.2 y 0.4), lo cual puede alertar el sobredimensionamiento de los conductos de la red. El último indicador de gestión, el de Suficiencia en el Cumplimiento de Estándares (I_5) es mayor a la unidad en los tres casos, lo cual indica que las presiones se mantienen por encima de los mínimos necesarios. El I_5 para el caso 2 es el más alto confirma que, entre los tres casos estudiados, es el que tiene presiones muy por encima del mínimo requerido.

Tabla 18. Comparación de los indicadores de gestión para los casos de estudio.

Indicador de gestión	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Exceso de energía suministrada (I_1)	1.504	2.756	2.106
Indicador Eficiencia de la Red (I_2)	0.77	0.499	0.54
Indicador de Energía de Fricción (I_3)	0.094	0.037	0.044
Indicador de Suficiencia en el Cumplimiento de Estándares (I_5)	1.157	1.375	1.137

Prosiguiendo con la interpretación de los indicadores, se presentan 6 indicadores de diagnóstico.

Tabla 19. Comparación de los indicadores de gestión para los casos de estudio.

Indicador de Diagnóstico	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Indicador Rendimiento Real (η_r)	0.665	0.363	0.475
Indicador Rendimiento Ideal (η_i)	0.73	0.73	0.73
Indicador Topografía Real (θ_{tr})	0.105	0.064	0.058
Indicador de Exceso (θ_{er})	0	0.072	0.007
Indicador Intensidad Energética Real (I_{er})	0.15	0.274	0.209
Indicador Intensidad Energética Ideal (I_{ei})	0.136	0.136	0.136

Se puede observar que en el caso 1 solo el 66.5% de la energía que entra al sistema es la que teóricamente necesitan los consumidores. Sin embargo, los casos 2 y 3 presentan valores más bajos aún. El rendimiento ideal no varía de un caso a otro, ya que la red es la misma y solo cambia la forma de suministro del agua. Si el rendimiento real se compara con el rendimiento Ideal (η_i), los dos últimos casos están lejos del rendimiento ideal. Por el contrario, el caso 1 tienen un rendimiento real que se acerca al valor ideal. Se puede extraer que el margen de mejora del rendimiento es más amplio en los casos 2 y 3 que en el caso 1. El indicador de topografía real (θ_{tr}) indica el porcentaje de la energía de entrada al sistema que provienen de la energía topográfica. Los tres casos presentan un valor bajo, lo cual indica que las fuentes de agua no se encuentran a una altura mayor de la necesaria. El caso 3 presenta el valor más bajo para el θ_{tr} y es debido a que a las bombas de velocidad variable permiten reducir la energía topográfica, y al mismo tiempo toma un valor menos significativo respecto a la energía de entrada. Los dos últimos indicadores se pueden valorar de forma conjunta porque la intensidad energética ideal no varía de un caso a otro, ya que la red es la misma, y se puede tomar como referenciar para valorar la intensidad energética real. Al igual que ocurre con el rendimiento, el caso 1 está más próximo al valor ideal que el resto de casos.

En la Figura 19 se puede observar cómo ITAEnergy2.0 muestra los resultados para los indicadores de diagnóstico.

INDICADORES DE DIAGNÓSTICO		
RENDIMIENTO REAL:	$\eta_r = \frac{E.UO}{E.ENTRADA}$	0.665
RENDIMIENTO IDEAL:	$\eta_i = \frac{E.UO}{E.IDEAL}$	0.730
TOPOGRÁFICA REAL:	$\theta_{tr} = \frac{E.TOPOGRÁFICA}{E.ENTRADA}$	0.105
EXCESO:	$\theta_{er} = \frac{E.EXCESO}{E.ENTRADA}$	0.000
INTENSIDAD ENERGÉTICA REAL:	$ler = \frac{E.ENTRAD}{V.DEMANDADO SIN FUGAS}$	0.150
INTENSIDAD ENERGÉTICA IDEAL:	$lei = \frac{E.IDEAL ENTRADA}{V.DEMANDADO SIN FUGAS}$	0.136

Figura 19. Indicadores de diagnóstico del caso 1 que presenta ITAEnergy2.0.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

La relación que existe entre el agua y la energía es una cuestión que a día de hoy está ampliamente aceptada por la comunidad científica, pues no son pocos los estudios que muestran la interdependencia de un recurso con el otro. En el sector de las redes presurizadas resulta fundamental valorar no solo las pérdidas reales de agua para cuantificar la eficiencia volumétrica de un sistema, sino que también es primordial el estudio de la energía que entra y sale de los sistemas, para así también cuantificar la eficiencia energética del sistema.

En este sentido, las auditorias energéticas de las redes presurizadas permiten conocer el flujo de la energía dentro del sistema. Existen diferentes alcances de una auditoria energética dependiendo de la metodología que se decida seguir. El ITA ha desarrollado una metodología que ha ido puliendo a lo largo de la última década con la ayuda de diversos autores. Prueba de este avance son los diversos programas desarrollados bajo el amparo del ITA, que muestran la evolución hacia una única herramienta que permita realizar la auditoría energética de un sistema.

La culminación esta evolución es el programa ITAEnergy2.0, el cual es una herramienta que recoge la metodología desarrollada de los últimos años incluyendo conceptos más recientes. Considera la energía topográfica en la energía de entrada del sistema para una valoración de la topología que tiene el sistema. Incluye el concepto de la red ideal como un referente al cual aspirar en la mejora de la eficiencia del sistema. En sí, entrega una serie de indicadores que permite entender mejor los sistemas y valor su estado. Además de diferenciarse del resto de programas por ofrecer el desglose de las energías por elementos, ya sean bombas, embalses o depósitos. Mostrando una interfaz sencilla de comprender e interpretar para los usuarios, con el añadido de mostrar los resultados gráficamente.

Los casos de estudio presentados han permitido mostrar el potencial que tiene ITAEnergy2.0. Sobre todo, la rapidez con la que se puede llevar a cabo la auditoria energética de diferentes alternativas de suministro para una misma red,

que se pueden valorar fácilmente con los indicadores incorpora el programa. Así mismo, ha resalta las ventajas que ofrece conocer el rendimiento de las bombas, así como la energía aportada y perdidas por cada una de las bomba. Esta última característica, hoy en día, es exclusiva de ITAEnergy2.0.

CAPÍTULO 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA

Cabrera, E., Pardo Picazo, M. Á., Cobacho, R., & Cabrera Jr, E. (2010). *Energy audit of water networks*.

Cabrera Marcet, E., Gomez Selles, E., Cabrera Rochera, E., Soriano Olivares, J., & Espert Alemany, V. B. (2014). Energy Assessment of Pressurized Water Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141(8), 1-12. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000494](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000494)

Cabrera Rochera, E. (2021). Indicadores de desempeño para servicios de abastecimiento de agua. *Colección Monografías Instituto Tecnológico del Agua, UPV*.

Ćipranić, I., Jevrić, M., Radulović, M., & Sekulić, G. (2021). The energy–pressure nexus in the water supply system. *Water Supply*, 21(1), 344-355.

da Silveira, A. P. P., & Mata-Lima, H. (2020). Energy audit in water supply systems: A proposal of integrated approach towards energy efficiency. *Water Policy*, 22(6), 1126-1141.

del Teso, R., Gómez, E., Estruch-Juan, E., & Cabrera, E. (2019). Topographic Energy Management in Water Distribution Systems. *Water Resources Management*, 33(12), 4385-4400. <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02375-9>

Germanopoulos, G., & Jowitt, P. W. (1989). LEAKAGE REDUCTION BY EXCESS PRESSURE MINIMIZATION IN A WATER SUPPLY NETWORK. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 87(2), 195-214.

Gómez, E., del Teso, R., & Cabrera, E. (2018). Improving energy efficiencies in WDN with EPANET based tools. *WDSA/CCWI Joint Conference Proceedings*, 1.

Gómez Sellés, E. (2016). *Caracterización y mejora de la eficiencia energética del transporte de agua a presión* [Tesis doctoral, Universitat Politècnica de València]. <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/72637>

IEA. (2016). *Water Energy Nexus; Excerpt from the World Energy Outlook*. IEA. <https://www.iea.org/reports/water-energy-nexus>

Jowitt, P. W., & Xu, C. (1990). Optimal Valve Control in Water-Distribution Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 116(4), 455-472. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1990\)116:4\(455\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1990)116:4(455))

Lambert, A. O., Brown, T. G., Takizawa, M., & Weimer, D. (1999). A review of performance indicators for real losses from water supply systems. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 48(6), 227-237. <https://doi.org/10.2166/aqua.1999.0025>

Macharia, P., Kreuzinger, N., & Kitaka, N. (2020). Applying the Water-Energy Nexus for Water Supply—A Diagnostic Review on Energy Use for Water Provision in Africa. *Water*, 12(9), 2560. <https://doi.org/10.3390/w12092560>

Mosalam, H. A., & El-Barad, M. (2020). Design of an integration platform between the water-energy nexus and a business model applied for sustainable development. *Water Science and Technology*, 81(7), 1398-1405. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.212>

ONU-DAES. (2014). *Decenio Internacional para la Acción «El agua, fuente de vida» 2005-2015. Área temática: Agua y energía*. https://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/water_and_energy.shtml

Pardo Picazo, M. Á., Riquelme, A., & Melgarejo, J. (2019). *A tool for calculating energy audits in water pressurized networks*.

Puleo, V., Sambito, M., & Freni, G. (2015). An Environmental Analysis of the Effect of Energy Saving, Production and Recovery Measures on Water

- Supply Systems under Scarcity Conditions. *Energies*, 8(6), 5937-5951.
<https://doi.org/10.3390/en8065937>
- Ramos, H. M., Morillo, J. G., Diaz, J. A. R., Carravetta, A., & McNabola, A. (2021). Sustainable Water-Energy Nexus towards Developing Countries' Water Sector Efficiency. *Energies*, 14(12), 3525.
<https://doi.org/10.3390/en14123525>
- Rossman, L., Woo, H., Tryby, M., Shang, F., Janke, R., & Haxton, T. (2002). Manual del Usuario EPANET 2.0. *US Environmental Protection Agency EPA. USA. 214p.*
- Rossman, L., Woo, H., Tryby, M., Shang, F., Janke, R., & Haxton, T. (2021). Manual del usuario de EPANET 2.2. *US Environmental Protection Agency EPA. USA. 214p, 202.*
- Rothausen, S. G., & Conway, D. (2011). Greenhouse-gas emissions from energy use in the water sector. *Nature Climate Change*, 1(4), 210-219.
- Sun, Y., Shen, L., Zhong, S., Liu, L., & Wu, N. (2018). Water–energy nexus in Shaanxi province of China. *Water Supply*, 18(6), 2170-2179.
<https://doi.org/10.2166/ws.2018.043>
- United Nations. (2016). *Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development.*
- Vakilifard, N., Anda, M., A. Bahri, P., & Ho, G. (2018). The role of water-energy nexus in optimising water supply systems – Review of techniques and approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 1424-1432. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.125>
- Vela, A., Martínez, F., García-Serra, J., & Pérez, R. (1994). Estrategias óptimas para la reducción de pérdidas de agua en sistemas de abastecimiento. *Ingeniería del agua*, 1(1). <https://doi.org/10.4995/ia.1994.2630>

WWAP (Ed.). (2014). *The United Nations world water development report 2014: Water and Energy*. UNESCO.

Zaman, D., Tiwari, M. K., Gupta, A. K., & Sen, D. (2021). Performance indicators-based energy sustainability in urban water distribution networks: A state-of-art review and conceptual framework. *Sustainable Cities and Society*, 72, 103036. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103036>