

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

ESTUDIO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA PRESURIZADA:

CASO DE ESTUDIO - RED DE RIEGO DE CAP DE TERME

INTENSIFICACIÓN: HIDRÁULICA URBANA

Autor:

SUZETE TATIANA ANTÓNIO AMELA

Director:

DR. ENRIQUE CABRERA MARCET



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

JULIO, 2015

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma



Resumen del Trabajo de Fin de Máster

Datos del proyecto

Título: Estudio de la eficiencia energética de una red de distribución de agua presurizada: Caso de estudio - Red de riego de Cap de Terme

Alumno: Suzete Tatiana António Amela

Director: DR. Enrique Cabrera Marcet

Fecha de Lectura:

Resumen

En castellano (máximo 2000 palabras)

La modernización de las redes de distribución de agua, tanto en redes urbanas como en los regadíos, es un proceso que tuvo y sigue teniendo lugar en la actualidad en varios países del mundo. Uno de los grandes éxitos logrados con la modernización de las redes de distribución de agua a presión en los sistemas de regadío fue el aumento en la productividad de los cultivos y de las superficies regadas y la reducción de los volúmenes de agua asociados a este proceso; mientras que en las redes urbanas, este avance permitió un mejor control y gestión de los volúmenes inyectados en las redes una vez introducida la automatización en estos sistemas. Asimismo la modernización y automatización del suministro de agua a las redes urbanas ha contribuido a la entrada en desuso de los aljibes situados en las viviendas. En particular el proceso de modernización de regadíos no solamente estuvo acompañado de éxitos sino también de aspectos no tan positivos, ya que se llevaba a cabo sin considerar qué impactos supondrían en la naturaleza y consecuentemente en la salud.

Uno de los cambios que se originó en todo este proceso fue el empleo de la energía eléctrica para transportar el agua, dado que en el riego tradicional el agua circulaba por gravedad. Hace años, la relación agua-energía se restringía a la generación de energía por medio del agua, sin embargo, la interdependencia que existe entre los dos recursos y la necesidad de conocer la cantidad de energía que se consume para realizar dicho transporte (así como en otros muchos procesos, particularmente la depuración) no se había analizado. Debido al cambio climático, las sequías se han vuelto cada vez más



frecuentes y la preocupación por gestionar de modo eficiente los recursos hídricos ha exigido mayores niveles de control del mismo, es decir, ha exigido la modernización de los sistemas. El aumento imparable de la población (con la consiguiente necesidad de producir más alimentos) es el otro factor que contribuye a aumentar la presión sobre los recursos naturales.

La modernización de las redes de agua a presión trae asociada un consumo de energía necesaria para su funcionamiento. Este aumento en el consumo de energía genera un aumento de los gases de efecto invernadero emitidos a la atmósfera debido al quemado de los combustibles fósiles utilizados para generar dicha energía. En el año 1997 varios países del mundo, entre ellos España, se adhirieron al protocolo de Kyoto. Este protocolo tenía por objetivo reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero que causan el calentamiento global y sirvió para impulsar la adopción de medidas para reducir dichas emisiones, entre otras mejorar la eficiencia energética de las redes de distribución de agua a presión, uso de energías alternativas y la implantación sistemática de evaluaciones regulares de los sistemas mediante la elaboración de auditorías energéticas.

En la presente tesis se aborda la problemática de los elevados consumos de energía eléctrica que se producen en algunas redes de distribución de agua, en particular las de perfil irregular (importantes diferencias de cotas entre sus nudos), proponiéndose una nueva metodología para evaluar el desempeño de dichas redes y planteando posibles soluciones.

Como ejemplo, se aplica la metodología propuesta a un caso de estudio real, en particular una red de riego modernizada hace una década. Inicialmente, se pretendía aplicar la metodología a un caso real de una red de distribución de agua a presión de Mozambique, pero por la falta de información referente al sistema elegido y dificultades para obtener datos de otros sistemas, en conversaciones mantenidas con el director de tesis, se optó por elegir un caso real de España y, mediante pequeñas modificaciones en el modelo, realizar el estudio sobre este caso modificado. La metodología aquí presentada, tiene como finalidad servir de herramienta de apoyo a los gestores de los sistemas de distribución de agua a presión, permitiendo un mejor



control de los consumos de energía eléctrica que se demandan.

El monitoreo del funcionamiento de las redes de distribución de agua presurizada juega un papel importante en la gestión de los sistemas porque permite conocer su rendimiento, identificar posibles problemas y sus causas, tomar medidas para mejorar su desempeño y obtener ahorros, tanto a nivel energético como de agua. Con la adopción de las medidas propuestas, los márgenes medios de ahorro de energía eléctrica en las redes urbanas no son inferiores al 30% y puede llegar al 50% en las redes de riego modernizadas.

En valenciano (máximo 2000 palabras)

La modernització de les xarxes de distribució d'aigua, tant en xarxes urbanes com en els regadius, és un procés que va tenir i segueix tenint lloc en l'actualitat en diversos països del món. Un dels grans èxits assolits amb la modernització de les xarxes de distribució d'aigua a pressió en els sistemes de regadiu va ser l'augment en la productivitat dels cultius i de les superfícies regades, i la reducció dels volums d'aigua associats a aquest procés; mentre que en les xarxes urbanes, aquest avanç va permetre un millor control i gestió dels volums injectats en les xarxes una vegada introduïda l'automatització en aquests sistemes. Un altre dels avanços aconseguits gràcies a la modernització i automatització del subministrament d'aigua a les xarxes urbanes ha sigut l'entrada en desús dels aljubs situats en els habitatges. El procés de modernització no solament va estar acompanyat d'èxits sinó també d'aspectes negatius, ja que es duia a terme sense considerar quins impactes suposarien en la naturalesa i conseqüentment en la salut.

Un dels majors canvis que es va originar en tot aquest procés va ser l'ús de l'energia elèctrica per a transportar l'aigua. Fa anys, la relació aigua-energia es restringia a la generació d'energia per mitjà de l'aigua, no obstant açò, la interdependència que existeix entre els dos recursos i la necessitat de conèixer la quantitat d'energia que es consumeix per a realitzar aquest transport no s'havia analitzat. A causa del canvi climàtic, les sequeres s'han tornat cada vegada més freqüents i la preocupació per gestionar de manera eficient els recursos hídrics ha exigit majors nivells de control del



mateix, és a dir, ha exigint la modernització dels sistemes. La modernització de les xarxes d'aigua a pressió porta associada un consum d'energia necessària per al seu funcionament. Aquest augment en el consum d'energia produeix un augment dels gasos d'efecte hivernacle emesos a l'atmosfera a causa dels combustibles fòssils utilitzats per a generar aquesta energia. L'any 1997 diversos països del món, entre ells Espanya, es van adherir al protocol de Kyoto. Aquest protocol tenia per objectiu reduir les emissions dels gasos d'efecte hivernacle que causen l'escalfament global i va servir per a impulsar l'adopció de mesures per a reduir aquestes emissions, permetent al mateix temps, millorar l'eficiència energètica de les xarxes de distribució d'aigua a pressió utilitzant energies alternatives i avaluacions regulars dels sistemes mitjançant l'elaboració d'auditories energètiques.

En la present tesi s'aborda la problemàtica dels elevats consums d'energia elèctrica que es produeixen en les xarxes de distribució d'aigua, i es proposa una metodologia (basada en una ja existent) per a avaluar la gestió d'aquestes xarxes i plantejar possibles solucions.

Com a exemple, s'aplica la metodologia proposada a un cas d'estudi hipotètic. Inicialment, es pretenia aplicar la metodologia a un cas real d'una xarxa de distribució d'aigua a pressió de Moçambic, però a causa de la falta d'informació referent al sistema triat i dificultats per a obtenir dades referents a altres sistemes, en converses mantingudes amb el director de tesi, es va optar per triar un cas real d'Espanya i, mitjançant petites modificacions en el model, realitzar l'estudi sobre aquest cas modificat. La metodologia ací presentada, té com a finalitat servir d'eina de suport als gestors dels sistemes de distribució d'aigua a pressió, i permet un millor control dels consums d'energia elèctrica que es verifiquen i alhora, dels volums d'aigua injectats en les xarxes.

El monitoratge del funcionament de les xarxes de distribució d'aigua pressuritzada juga un paper important en la gestió dels sistemes perquè permet conèixer el rendiment del sistema, identificar possibles problemes i les seues causes, prendre mesures per a millorar el seu acompliment i obtenir estalvis, tant a nivell energètic com financer, així com d'aigua. Amb l'adopció de les mesures proposades, els marges mitjans d'estalvi



d'energia elèctrica en les xarxes urbanes no són inferiors al 30% i pot arribar al 50% en les xarxes de reg modernitzades.

En inglés (máximo 2000 palabras)

The modernization of the water distribution networks, in both urban and irrigation uses, is a process that took places in past and still continue until the present in multiple countries. One of the great successes achieved with the modernization of the distribution networks in irrigation networks was the increase in productivity of crops and the irrigated areas, the reduction of water volumes associated with this process while in urban network, the progress allowed a better control and management of the injected volumes after introducing the automation process in these systems. Another progress that was obtained due the modernization and automation of water supply systems is related with the disuse of tanks. The modernization process was joined with successful and negative aspects, because it was carried out without considering the involved impacts with the nature and consequently on health.

One of the changes that originated in this whole process was the use of electricity to transport water. Years ago, the water-energy ratio was restricted to the generation of energy through water, however, the interdependence existing between the two resources and the need to know the amount of energy consumed for such transportation had not been analyzed. Due the climate changes, droughts have become more frequent and the concern of a better water resources management has required a greater level of control over it.

The modernization to pressurized water systems brings associated power consumption for its operation. The increase in energy consumption leads to increase of greenhouse gases emitted to the atmosphere due to fossil fuels used to generate energy. In 1997, several countries, including Spain joined the Kyoto Protocol. This protocol was aimed at reducing the greenhouse gases emitted to the atmosphere that cause the global warming and it served to promote the adoption of measures to reduce such emissions, allowing at the same time, the improve of energy efficiency of water pressurized systems by the use of alternative energies and regular evaluations of the systems



through the implementation of energetic audits.

This thesis analyses the high electricity consumption that occur in pressurized water systems, proposing a methodology (based on an existing one) to evaluate the performance of these systems and suggesting possible solutions.

As an example, the proposed methodology is applied to a hypothetical case of study. Initially, it is intended to apply the methodology to a real case from Mozambique of a water distribution system, but due the difficulties in obtaining the information, in discussions with the thesis director, it was decided to choose a real case from Spain and with some modifications in the model, carry out the study. The proposed methodology aims to support the managers of pressurized water systems allowing for better control of the electrical energy consumption.

Monitoring the operation of water pressurized systems have a significant role in the management because it allows to know the real performance of the system, identify potential problems and their causes, take actions to improve the performance and achieve savings, both at financial and energetic, as well as water. With the adoption of the proposed measures the saving margins average in electricity in urban systems are not less than 30% and may reach 50% at modernized irrigation systems.

Palabras clave (máximo 5): modernización, relación agua-energía, cambio climático

ÍNDICE

Resumen.....	1
Abstract.....	3
Resum	5
1. Introducción.....	7
1.1. Objetivos del estudio.....	11
1.2. Problemática.....	14
1.3. Estructura de la tesis.....	16
2. Análisis de la relación Agua-Energía	17
2.1. Estudios realizados en Estados Unidos	19
2.2. Situación en España	21
3. Metodología.....	23
3.1. Diagnóstico.....	24
3.2. Auditorías	28
3.2.1. Auditoria Hídrica	29
A. Metodología IWA/AWWA	30
3.2.2. Auditoría Energética.....	33
B. Indicadores energéticos	34
a. Indicadores de eficiencia energética del IWA.....	34
b. Indicadores de eficiencia energética propuestos	35
i. Indicador de eficiencia ideal-Sistema ideal	36
ii. Indicador de eficiencia real-Sistema real.....	37
iii. Indicador de eficiencia objetivo	38
3.3. Certificación.....	40
4. Medidas propuestas para mejora de la eficiencia energética.....	40
4.1. Mejoras en el diseño y manejo de la red	41

4.2.	Mejoras en los equipos de bombeo instalados	43
4.3.	Mejora en la contratación de la tarifa de energía	45
5.	Caso de Estudio: Red de Riego de Cap de Terme	46
5.1.	Descripción de la red inicial.....	46
5.2.	Aplicación de la metodología propuesta	49
5.2.1.	Diagnóstico.....	49
5.2.2.	Auditorías	50
6.	Acciones propuestas	56
6.1.	Ajuste de la red global e instalación de variadores de velocidad.....	58
6.2.	Sectorización de la red e instalación de variadores de velocidad	62
7.	Conclusiones y recomendaciones	70
	GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	74
	BIBLIOGRAFIA	76

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo integral del agua.....	8
Figura 2. Ciclo del agua y energía (“ <i>The Energy-Water Nexus</i> ”, 2011).....	18
Figura 3. Perfil de un sistema presurizado ideal sin exceso de presión	25
Figura 4. Perfil de un sistema presurizado ideal con exceso de presión.....	26
Figura 5. Perfil de un sistema presurizado real.....	27
Figura 6. Volumen de control de una red de abastecimiento de agua presurizada (“Towards an energy labelling of pressurized water networks, 2013”)	34
Figura 7. Perfiles comparativos entre E_{ii} y $E_{ir,0}$	39
Figura 8. Simulación de la red inicial de Cap de Terme para la hora 00:00.....	47
Figura 9. Simulación del sector 1 para la hora 00:00	64
Figura 10. Simulación del sector 2 para la hora 00:00	65
Figura 11. Simulación del sector 3 para la hora 00:00	67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Relación gasto energía-agua en California, 2001 (CEC, 2005).....	20
Tabla 2: Relación gasto energía-agua en España en 2007 (Hardy, L., Garrido, A., 2010)	22
Tabla 3 : Auditoría hídrica (IWA/AWWA, 2000).....	30
Tabla 4: Indicadores de eficiencia energética.....	35
Tabla 5: Presiones registradas en la red inicial.....	48
Tabla 6: Términos energéticos reales e ideales.....	49
Tabla 7: Resultados de la auditoría energética	51
Tabla 8: Resultados de los indicadores de gestión energéticos para la red inicial	51
Tabla 9: Volúmenes demandados en cada turno.....	53
Tabla 10: Volúmenes demandados en cada turno (Red ajustada)	59
Tabla 11: Comparación entre las presiones registradas en la red inicial y en la red ajustada	60
Tabla 12: Comparación entre los resultados de la auditoría energética de las redes inicial y ajustada	61
Tabla 13: Comparación entre los resultados de los indicadores energéticos de las redes inicial y ajustada	61
Tabla 14: Presiones registradas en el sector 1 ajustado	64
Tabla 15: Volúmenes demandados en cada turno -Sector 1	65
Tabla 16: Presiones registradas-Sector 2	66
Tabla 17: Volúmenes demandados en cada turno -Sector 2	66
Tabla 18: Presiones registradas-Sector 3	67
Tabla 19: Volúmenes demandados en cada turno -Sector 3	67
Tabla 20: Resultados del balance de energía de la red sectorizada	68
Tabla 21: Resultados de los indicadores energéticos de la red sectorizada.....	69

MOTIVACIÓN:

El ahorro y eficiencia energética es uno de los temas que en la actualidad presenta un interés creciente en diversos países europeos y americanos. Dentro de este tema se destaca la importancia del ahorro de energía y la eficiencia energética en los sistemas de distribución de agua a presión.

Este trabajo me ha permitido poner en práctica los conocimientos teóricos adquiridos durante el máster en lo que respecta a: el manejo del programa de cálculo EPANET para modelar matemáticamente una red de distribución de agua, realizar auditorías (hidráulica y energética) y su importancia para el control y monitoreo de los sistemas en lo que respecta a los consumos energéticos y volúmenes de agua demandados en la red, conocer el nexo agua-energía y la interdependencia entre ambos recursos, la importancia del correcto diseño y dimensionamiento de los sistemas de distribución de agua considerando que este debe funcionar hidráulicamente, así como la relación entre la demanda de agua y demanda de energía.

He aprendido la metodología propuesta que se aplica para evaluar la eficiencia energética de los sistemas de distribución de agua a presión y permite identificar los puntos críticos del sistema y posibles soluciones. Así, espero poder aplicarla en un futuro próximo a casos reales (urbano o de riego) en mi país, Mozambique.

Resumen

La modernización de las redes de distribución de agua, tanto en redes urbanas como en los regadíos, es un proceso que tuvo y sigue teniendo lugar en la actualidad en varios países del mundo. Uno de los grandes éxitos logrados con la modernización de las redes de distribución de agua a presión en los sistemas de regadío fue el aumento en la productividad de los cultivos y de las superficies regadas y la reducción de los volúmenes de agua asociados a este proceso; mientras que en las redes urbanas, este avance permitió un mejor control y gestión de los volúmenes inyectados en las redes una vez introducida la automatización en estos sistemas. Asimismo la modernización y automatización del suministro de agua a las redes urbanas ha contribuido a la entrada en desuso de los aljibes situados en las viviendas. En particular el proceso de modernización de regadíos no solamente estuvo acompañado de éxitos sino también de aspectos no tan positivos, ya que se llevaba a cabo sin considerar qué impactos supondrían en la naturaleza y consecuentemente en la salud.

Uno de los cambios que se originó en todo este proceso fue el empleo de la energía eléctrica para transportar el agua, dado que en el riego tradicional el agua circulaba por gravedad. Hace años, la relación agua-energía se restringía a la generación de energía por medio del agua, sin embargo, la interdependencia que existe entre los dos recursos y la necesidad de conocer la cantidad de energía que se consume para realizar dicho transporte (así como en otros muchos procesos, particularmente la depuración) no se había analizado. Debido al cambio climático, las sequías se han vuelto cada vez más frecuentes y la preocupación por gestionar de modo eficiente los recursos hídricos ha exigido mayores niveles de control del mismo, es decir, ha exigido la modernización de los sistemas. El aumento imparable de la población (con la consiguiente necesidad de producir más alimentos) es el otro factor que contribuye a aumentar la presión sobre los recursos naturales.

La modernización de las redes de agua a presión trae asociada un consumo de energía necesaria para su funcionamiento. Este aumento en el consumo de energía genera un aumento de los gases de efecto invernadero emitidos a la atmósfera debido al quemado de los combustibles fósiles

utilizados para generar dicha energía. En el año 1997 varios países del mundo, entre ellos España, se adhirieron al protocolo de Kyoto. Este protocolo tenía por objetivo reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero que causan el calentamiento global y sirvió para impulsar la adopción de medidas para reducir dichas emisiones, entre otras mejorar la eficiencia energética de las redes de distribución de agua a presión, uso de energías alternativas y la implantación sistemática de evaluaciones regulares de los sistemas mediante la elaboración de auditorías energéticas.

En la presente tesis se aborda la problemática de los elevados consumos de energía eléctrica que se producen en algunas redes de distribución de agua, en particular las de perfil irregular (importantes diferencias de cotas entre sus nudos), proponiéndose una nueva metodología para evaluar el desempeño de dichas redes y planteando posibles soluciones.

Como ejemplo, se aplica la metodología propuesta a un caso de estudio real, en particular una red de riego modernizada hace una década. Inicialmente, se pretendía aplicar la metodología a un caso real de una red de distribución de agua a presión de Mozambique, pero por la falta de información referente al sistema elegido y dificultades para obtener datos de otros sistemas, en conversaciones mantenidas con el director de tesis, se optó por elegir un caso real de España y, mediante pequeñas modificaciones en el modelo, realizar el estudio sobre este caso modificado. La metodología aquí presentada, tiene como finalidad servir de herramienta de apoyo a los gestores de los sistemas de distribución de agua a presión, permitiendo un mejor control de los consumos de energía eléctrica que se demandan.

El monitoreo del funcionamiento de las redes de distribución de agua presurizada juega un papel importante en la gestión de los sistemas porque permite conocer su rendimiento, identificar posibles problemas y sus causas, tomar medidas para mejorar su desempeño y obtener ahorros, tanto a nivel energético como de agua. Con la adopción de las medidas propuestas, los márgenes medios de ahorro de energía eléctrica en las redes urbanas no son inferiores al 30% y puede llegar al 50% en las redes de riego modernizadas.

Abstract

The modernization of the water distribution networks, in both urban and irrigation uses, is a process that took place in the past and still continues until the present in multiple countries. One of the great successes achieved with the modernization of the distribution networks in irrigation networks was the increase in productivity of crops and the irrigated areas, the reduction of water volumes associated with this process while in urban network, the progress allowed a better control and management of the injected volumes after introducing the automation process in these systems. Another progress that was obtained due to the modernization and automation of water supply systems is related with the disuse of tanks. The modernization process was joined with successful and negative aspects, because it was carried out without considering the involved impacts with the nature and consequently on health.

One of the changes that originated in this whole process was the use of electricity to transport water. Years ago, the water-energy ratio was restricted to the generation of energy through water, however, the interdependence existing between the two resources and the need to know the amount of energy consumed for such transportation had not been analyzed. Due to the climate changes, droughts have become more frequent and the concern of a better water resources management has required a greater level of control over it.

The modernization to pressurized water systems brings associated power consumption for its operation. The increase in energy consumption leads to an increase of greenhouse gases emitted to the atmosphere due to fossil fuels used to generate energy. In 1997, several countries, including Spain, joined the Kyoto Protocol. This protocol was aimed at reducing the greenhouse gases emitted to the atmosphere that cause global warming and it served to promote the adoption of measures to reduce such emissions, allowing at the same time, the improvement of energy efficiency of water pressurized systems by the use of alternative energies and regular evaluations of the systems through the implementation of energetic audits.

This thesis analyses the high electricity consumption that occur in pressurized water systems, proposing a methodology (based on an existing one) to evaluate the performance of these systems and suggesting possible solutions.

As an example, the proposed methodology is applied to a hypothetical case of study. Initially, it is intended to apply the methodology to a real case from Mozambique of a water distribution system, but due the difficulties in obtaining the information, in discussions with the thesis director, it was decided to choose a real case from Spain and with some modifications in the model, carry out the study. The proposed methodology aims to support the managers of pressurized water systems allowing for better control of the electrical energy consumption.

Monitoring the operation of water pressurized systems have a significant role in the management because it allows to know the real performance of the system, identify potential problems and their causes, take actions to improve the performance and achieve savings, both at financial and energetic, as well as water. With the adoption of the proposed measures the saving margins average in electricity in urban systems are not less than 30% and may reach 50% at modernized irrigation systems.

Resum

La modernització de les xarxes de distribució d'aigua, tant en xarxes urbanes com en els regadius, és un procés que va tenir i segueix tenint lloc en l'actualitat en diversos països del món. Un dels grans èxits assolits amb la modernització de les xarxes de distribució d'aigua a pressió en els sistemes de regadiu va ser l'augment en la productivitat dels cultius i de les superfícies regades, i la reducció dels volums d'aigua associats a aquest procés; mentre que en les xarxes urbanes, aquest avanç va permetre un millor control i gestió dels volums injectats en les xarxes una vegada introduïda l'automatització en aquests sistemes. Un altre dels avanços aconseguits gràcies a la modernització i automatització del subministrament d'aigua a les xarxes urbanes ha sigut l'entrada en desús dels aljubs situats en els habitatges. El procés de modernització no solament va estar acompanyat d'èxits sinó també d'aspectes negatius, ja que es duia a terme sense considerar quins impactes suposarien en la naturalesa i consegüentment en la salut.

Un dels majors canvis que es va originar en tot aquest procés va ser l'ús de l'energia elèctrica per a transportar l'aigua. Fa anys, la relació aigua-energia es restringia a la generació d'energia per mitjà de l'aigua, no obstant açò, la interdependència que existeix entre els dos recursos i la necessitat de conèixer la quantitat d'energia que es consumeix per a realitzar aquest transport no s'havia analitzat. A causa del canvi climàtic, les sequeres s'han tornat cada vegada més freqüents i la preocupació per gestionar de manera eficient els recursos hídrics ha exigut majors nivells de control del mateix, és a dir, ha exigut la modernització dels sistemes. La modernització de les xarxes d'aigua a pressió porta associada un consum d'energia necessària per al seu funcionament. Aquest augment en el consum d'energia produeix un augment dels gasos d'efecte hivernacle emesos a l'atmosfera a causa dels combustibles fòssils utilitzats per a generar aquesta energia. L'any 1997 diversos països del món, entre ells Espanya, es van adherir al protocol de Kyoto. Aquest protocol tenia per objectiu reduir les emissions dels gasos d'efecte hivernacle que causen l'escalfament global i va servir per a impulsar l'adopció de mesures per a reduir aquestes emissions, permetent al mateix temps, millorar l'eficiència energètica de les xarxes de distribució d'aigua a pressió utilitzant energies alternatives i avaluacions regulars dels sistemes mitjançant l'elaboració d'auditories energètiques.

En la present tesi s'aborda la problemàtica dels elevats consums d'energia elèctrica que es produeixen en les xarxes de distribució d'aigua, i es proposa una metodologia (basada en una ja existent) per a avaluar la gestió d'aquestes xarxes i plantejar possibles solucions.

Com a exemple, s'aplica la metodologia proposada a un cas d'estudi hipotètic. Inicialment, es pretenia aplicar la metodologia a un cas real d'una xarxa de distribució d'aigua a pressió de Moçambic, però a causa de la falta d'informació referent al sistema triat i dificultats per a obtenir dades referents a altres sistemes, en converses mantingudes amb el director de tesi, es va optar per triar un cas real d'Espanya i, mitjançant petites modificacions en el model, realitzar l'estudi sobre aquest cas modificat. La metodologia ací presentada, té com a finalitat servir d'eina de suport als gestors dels sistemes de distribució d'aigua a pressió, i permet un millor control dels consums d'energia elèctrica que es verifiquen i alhora, dels volums d'aigua injectats en les xarxes.

El monitoratge del funcionament de les xarxes de distribució d'aigua pressuritzada juga un paper important en la gestió dels sistemes perquè permet conèixer el rendiment del sistema, identificar possibles problemes i les seues causes, prendre mesures per a millorar el seu acompliment i obtenir estalvis, tant a nivell energètic com financer, així com d'aigua. Amb l'adopció de les mesures proposades, els marges mitjans d'estalvi d'energia elèctrica en les xarxes urbanes no són inferiors al 30% i pot arribar al 50% en les xarxes de reg modernitzades.

1. Introducción

El agua y la energía son dos recursos fundamentales para el desarrollo humano, tanto económico como social, y están profundamente relacionados, es decir, el agua sirve para generar energía, y a su vez, también permite almacenar energía potencial para su posterior transformación en energía eléctrica, en caso de necesidad, a través de las centrales hidroeléctricas. En el sentido inverso, el ciclo integral del agua no es posible sin energía. La energía es necesaria para la captación, potabilización, transporte, depuración y posterior retorno al medio natural del agua, más aún en el caso de la desalación de aguas. Hasta hace pocos años (inicio del siglo XX), la relación del agua con la energía se limitaba a la producción de energía a través del agua y nadie se preocupaba por la cantidad de energía consumida para realizar el transporte del agua. Con el aumento de la demanda de agua a lo largo del siglo XX, y con el subsiguiente desarrollo del ciclo integral del agua (captación del medio natural, producción, distribución, depuración y retorno al medio natural) y por el crecimiento de las extracciones de agua subterránea, la utilización del agua se ha ido convirtiendo cada vez más dependiente de la energía. En la actualidad, la relación agua-energía no se limita a la dependencia una de otra, sino que existe una estrecha ligazón bidireccional entre estos dos recursos. El uso del agua no sólo es gran consumidor de energía, también es una fuente de producción de energía, aunque en estos momentos el balance sea negativo (López Vera, F., 2013).

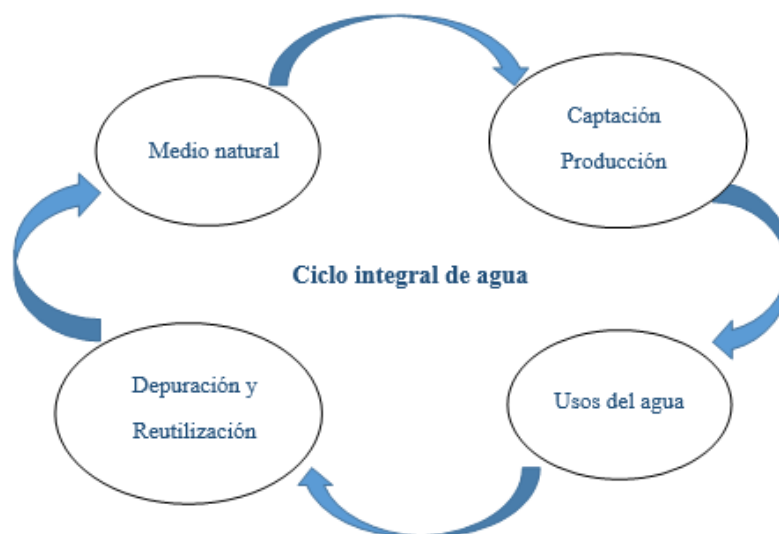


Figura 1. Ciclo integral del agua

Una de las mayores demandas de energía en la utilización del agua se verifica en el transporte de ésta en las redes de distribución de agua a presión, tanto en redes urbanas como en redes de riego. Antiguamente, el transporte de agua se realizaba únicamente por gravedad. El agua, mediante captación superficial aguas arriba y su posterior derivación, se almacenaba en depósitos o balsas situados en los puntos más elevados de las zonas a abastecer, desde donde se distribuía por gravedad mediante redes a presión, para abastecimientos urbanos, o a través de balsas y acequias, para las zonas de regadío. Este método no suponía ningún gasto de energía eléctrica, sin embargo, en algunos casos se generaban grandes pérdidas de agua, como por ejemplo si el transporte se realizaba por medio de acequias construidas en terreno natural, donde una gran cantidad de agua se perdía por infiltración en el terreno antes de llegar a su destino.

El ahorro de agua ha sido uno de los motivos principales de la introducción de las tecnologías de riego a presión. Estas tecnologías, además de permitir una mejor gestión en la distribución del recurso, generan un aumento de la productividad y una mayor flexibilidad en la elección de los cultivos. El proceso de modernización del regadío español consistió en la mejora de las técnicas de riego mediante actuaciones en las infraestructuras y gestión de las zonas regables. Estas

medidas consistieron en la sustitución de los canales abiertos por redes de riego a presión, construcción de balsas de regulación, adecuación de las estaciones de bombeo y filtrado, automatización y control del agua de riego, de forma que permitiera una mejora en la gestión sostenible de los recursos agua-energía. Sin embargo, la modernización de los regadíos conlleva a un mayor consumo de energía eléctrica una vez que están asociados a bombeos de agua a través de los que se suministra, por las redes de tuberías, la presión y el caudal requeridos por los nuevos sistemas de riego (aspersión, localizado) en las parcelas de cultivo.

Por otra parte, desde mediados de la década de los 90, se ha observado un incremento del consumo energético a nivel europeo (*Manual de Auditorías Energéticas en Comunidades de Regantes, 2010*) y asociado a él, un aumento en las emisiones de gases de efecto invernadero, por lo que en 1997 varios países del mundo, entre los que se encuentra España, se han adherido al protocolo de Kyoto con el objetivo de reducir la emisión de estos gases. El CO₂ es el que más se destaca entre los gases de efecto invernadero y es el principal gas emitido a la atmósfera a causa del consumo de combustibles fósiles. La producción de energía utiliza elevadas cantidades de combustibles fósiles y es el responsable del 78% de las emisiones de gases de efecto invernadero. Por este motivo, desde el gobierno de España se han impulsado varias políticas para la implantación del uso de energías renovables así como de ahorro de energía eléctrica, tornando más eficientes los sistemas y, de esta forma, reducir el consumo eléctrico.

En España, además de la necesidad de ahorrar energía, el agua también merece una especial atención ya que éste es un recurso escaso en este país. Con respecto a los regadíos, con el objetivo de ahorrar este recurso, el gobierno empezó a incentivar la modernización de los regadíos y desde el año 2000, se han realizado inversiones por valor de 3.815 millones de euros en la modernización de los mismos. Según el informe sobre regadíos en España, el sistema de riego que más ha aumentado en los últimos años es el localizado que ha pasado de 1.197.465 Ha en 2004, a 1.756.138 Ha en 2014. Un sistema más eficiente y cuyas demandas son más moderadas. La superficie regada por gravedad disminuye y pasa de 1.197.465 Ha en 2004 a 986.463 Ha en el 2014 (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 18/03/2015).

Debido al gran interés mostrado por los gestores de los sistemas de distribución de agua en disponer de redes energéticamente eficientes, en la presente tesis se expone una metodología que servirá de guía para los gestores en el proceso de evaluación del funcionamiento y rendimiento de los mismos, y a la luz de los problemas que se detecten, plantear soluciones para mejorar.

El proceso de modernización por el cual España pasó hace décadas, se está verificando en algunos países africanos como por ejemplo en Mozambique. Después de la guerra civil (1977-1992), varias infraestructuras de regadío quedaron destruidas y su recuperación continúa en la actualidad. La agricultura es una de las actividades económicas más importantes del país por lo cual, la necesidad de impulsar la práctica de esta actividad se ha convertido en una de las preocupaciones del gobierno de Mozambique. Actualmente, la mayor preocupación del gobierno es buscar financiación para la recuperación, modernización y construcción de sistemas de distribución de agua a presión. De momento, la preocupación por el ahorro de la energía eléctrica no constituye una inquietud para el estado mozambiqueño debido al desconocimiento del tema pero, antes de que se vuelva un problema sería interesante considerar, desde la fase inicial de la elaboración de los proyectos, la componente eficiencia y ahorro energético. Siendo un país en desarrollo, la adopción de este tipo de prácticas contribuiría positivamente en la economía del país.

1.1. Objetivos del estudio

Los objetivos de la presente Tesis de Master consisten en:

- Analizar la problemática de los elevados consumos energéticos de las redes de distribución de agua a presión, en particular las que discurren sobre terrenos de perfil irregular.
- Plantear una metodología para evaluar la eficiencia energética de los sistemas de distribución de agua a presión basada en la propuesta en el artículo “*Energy Assessment of Pressurized Water Systems, 2014*”. (Cabrera et al. 2014)
- Identificar los puntos críticos de consumo energético, sus causas y proponer medidas de ahorro y mejora del funcionamiento del sistema.
- Aplicar la metodología propuesta a un caso concreto.

Según se comentó en el capítulo anterior, la modernización de un sistema de abastecimiento de agua conlleva un consumo de energía eléctrica más elevado y en algunos casos excesivo, y esto se refleja en las facturas de energía. Los excesos de consumo de energía eléctrica pueden estar asociados a diversos factores como por ejemplo: diseño inapropiado de la red, incorrecto funcionamiento de los grupos de bombeo, contratación de tarifas eléctricas inadecuadas, operación inadecuada del sistema, elevado nivel de pérdidas de agua (pérdidas reales y aparentes) en la red, excesiva fricción generada por tuberías insuficientes y dimensionamiento incorrecto de los grupos de bombeo instalados en el sistema.

El incorrecto funcionamiento de los grupos de bombeo es, generalmente, debido a su selección inadecuada (bomba operando lejos de su punto de funcionamiento óptimo). También puede deberse a una avería en los equipos, o a la falta de dispositivos programables que permitan adecuar la presión y caudal a las necesidades del sistema.

Las pérdidas de agua en cualquier sistema de distribución por gravedad o presión constituyen un problema. En los sistemas presurizados, además de perderse elevados volúmenes de agua, se pierde energía, dado que cada m^3 de agua fugado lleva una energía asociada. La reducción de pérdidas y la gestión de la presión, tienen un papel importante en la mejora de esta situación. Al gestionar la presión se consigue una reducción de las pérdidas reales, puesto que reduciendo la presión se disminuyen directamente las fugas en las tuberías. Cuando un grupo de bombeo no dispone de ningún sistema de control que les permita ajustarse a las necesidades de caudal y presión de la red, y además, dicho grupo de bombeo funcionan a distintos puntos caudal-presión $(Q-P)_i$ a lo largo del día, este sistema de bombeo estará dimensionado para el punto $(Q-P)$ más desfavorable, lo que implica que cuando se encuentre funcionando en otros puntos diferentes al $Q-P_{+desf.}$ durante el resto del día, las presiones que proporcionará dicho grupo de presión a la red serán superiores a las necesarias, por lo que en esos momentos se estará infrautilizando el grupo de bombeo y perdiendo un porcentaje más o menos elevado de energía. El correcto dimensionado de los equipos de bombeo es fundamental para evitar bajos rendimientos. Al dimensionar los equipos de bombeo, se deben considerar las necesidades del sistema para que estos no sean infrautilizados.

La elección de las tarifas eléctricas debe tener en cuenta las necesidades del sistema en términos de demanda de agua procurando activar los grupos de bombeo en las horas en las que el coste del kWh sea mínimo. Al respecto el papel de los depósitos de regulación es esencial.

En la disminución del consumo energético de un sistema a presión (urbano o de riego) se consideran los siguientes aspectos:

- La minimización de las pérdidas de agua mediante una mejor gestión de las presiones en la red y, cuando proceda, la renovación o rehabilitación de sus tuberías.
- La disminución del consumo de agua, consecuencia de un mejor conocimiento de las necesidades. Se puede conseguir a través de un asesoramiento a la comunidad de regantes y por la modernización y reestructuración del sistema de riego. En redes urbanas con una adecuada gestión de la demanda.

- La correcta adecuación del sistema de bombeo, a las necesidades del sistema. Y ello tanto en el uso urbano como en los nuevos regadíos como en la modernización de sistemas de riego antiguos. Este punto consistiría en: introducción de variadores de frecuencia, mejora de rendimientos en los equipos de impulsión y elección de tarifas eléctricas adecuadas.

Dado que en los sistemas de distribución de agua a presión están implicados elevados consumos de energía eléctrica, es importante analizar las razones que causan dicho consumo. Por lo tanto, en la presente tesis se expone y aplica una metodología, que servirá de herramienta de apoyo para los gestores de los sistemas de abastecimiento de agua, y que les permitirá evaluar el funcionamiento y el rendimiento de los sistemas de los cuales son responsables. Esta metodología será aplicable tanto para redes de distribución de agua a presión en zonas urbanas así como para los sistemas de regadío. Aplicando la metodología planteada, se conseguirá un uso más sostenible de los recursos hídricos y energéticos con la consecuente reducción de los costes de explotación del sistema.

1.2. Problemática

La modernización de las redes de distribución de agua a presión, tanto en abastecimientos urbanos como de regadío, han traído consigo un mejor control de las presiones y caudales inyectados en las redes y una reducción en las pérdidas de agua y también un aumento de la productividad en el caso de los regadíos pero, al mismo tiempo, han ido acompañados por un incremento del consumo de energía eléctrica.

Hasta hace algunos años, en el diseño de las redes de distribución de agua a presión no se consideraba la componente ahorro energético, es decir, los sistemas eran diseñados y dimensionados para funcionar hidráulicamente de modo correcto y con la menor inversión posible pero el consumo de energía eléctrica no era tomado en consideración. Según se comentó anteriormente, la modernización viene acompañada de incrementos en los consumos de energía eléctrica, cuya generación produce un aumento de los gases de efecto invernadero emitidos a la atmosfera.

España, como país adherido al protocolo de Kyoto (año 1997), se comprometió a reducir la cantidad emitida de estos gases de efecto invernadero a la atmósfera. Una forma de reducir dichos gases de efecto invernadero era disminuir la energía eléctrica consumida, por lo que el gobierno español impulsó políticas de ahorro y eficiencia energética. Un ejemplo de esto sería una de las medidas reflejadas en el Plan de Acción 2008-2012 de la Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España para potenciar el ahorro energético en el regadío. Esta medida plantea la realización de estudios de eficiencia energética (auditorías energéticas) en comunidades de regantes, cuyos objetivos principales son la medida del consumo energético, la identificación de ineficiencias energéticas en los sistemas y la propuesta de medidas de ahorro. Todo esto también es de aplicación a cualquier sistema de distribución de agua a presión, como por ejemplo los abastecimientos de agua potable.

Lo expuesto anteriormente, junto con la modernización de los sistemas de riego en España, que tuvo mayor impacto a partir del año 2000 (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio

Ambiente, 18/03/2015) y la preocupación creciente por tener sistemas energéticamente más eficientes, que empezó una vez que las tarifas de suministro de energía eléctrica registraban aumentos constantes, sobre todo a partir de 2007 cuando se liberaliza el mercado eléctrico y los usos agrícolas pierden los subsidios energéticos, ha llevado a la realización, cada vez más extendida, de estudios de eficiencia energética en sistemas de distribución de agua a presión.

1.3. Estructura de la tesis

La presente tesis se estructura en dos partes distintas. En la primera parte se lleva a cabo una revisión bibliográfica que empieza con un enfoque de la relación entre los recursos agua y energía que pasó, de ser visto como una relación independiente, es decir, cada recurso era analizado de manera aislada, a un análisis en conjunto, una vez que se detectó la estrecha ligazón que existe entre ambos. Se aborda también la cuestión de la modernización de las redes de abastecimiento de agua convencionales (urbanas y regadíos) y los pros y contras asociados a estos sistemas. Respecto a la modernización de las redes de distribución de agua a presión en los regadíos, se hace una breve referencia a la situación en España y Mozambique. También se presentan en la primera parte los objetivos de la tesis, la problemática del trabajo, la propuesta de una metodología para la realización de estudios de eficiencia energética en redes de distribución de agua a presión y diversas soluciones para la mejora en el desempeño de las redes.

A continuación, en la segunda parte se lleva a cabo la aplicación de la metodología propuesta a un caso de estudio concreto, una red de riego real situada en Villareal, provincia de Castellón. Por último, se presentan los resultados del estudio realizado, las soluciones y medidas propuestas para mejorar la eficiencia energética del sistema acompañado de ahorros.

2. Análisis de la relación Agua-Energía

La gestión sostenible e integrada de los recursos hídricos es uno de los problemas globales que en la actualidad mayor interés suscitan. El agua dulce es un recurso limitado, algunas veces incluso escaso, y los rápidos cambios globales como el crecimiento de la población, el desarrollo económico, la migración y urbanización, están creando nuevas presiones en los recursos hídricos y en la infraestructura que suministra agua potable a la sociedad en general (ciudadanos, empresas, etc.).

Hasta hace pocos años, el nexo agua-energía se circunscribía a la producción de energía hidroeléctrica. Actualmente, las relaciones entre el sector energético y el del agua constituyen un punto muy importante para lograr mejoras en ambos sectores que contribuyan a un desarrollo económico y a un uso de los recursos más sostenibles.

Aunque en un principio ambos recursos eran recursos desconectados, la necesidad de gestionarlos mejor hace que actualmente ambas estén estrechamente relacionadas. Muchos de los nuevos desarrollos en el campo del agua necesitan una fuente de energía para funcionar, como puedan ser una desalinizadora o una bomba de agua. Por su parte, las presas usan el agua como una forma de almacenamiento de energía. Las centrales hidráulicas, que utilizan el agua como fuente de energía o las centrales termosolares, de gas y nucleares, que usan el agua para refrigerar y transformar la energía térmica y ser usada en una turbina, ponen de manifiesto el empleo del agua en la generación de energía.

El agua resulta clave para el desarrollo de las infraestructuras energéticas, como puede ser la extracción de combustible, refrigeración en las centrales térmicas o nucleares y producción de energía hidroeléctrica (CEC, 2005) y, a su vez, la energía es necesaria para extraer, tratar, transportar y entregar agua a los usuarios, dentro de unos parámetros de calidad para el consumo.

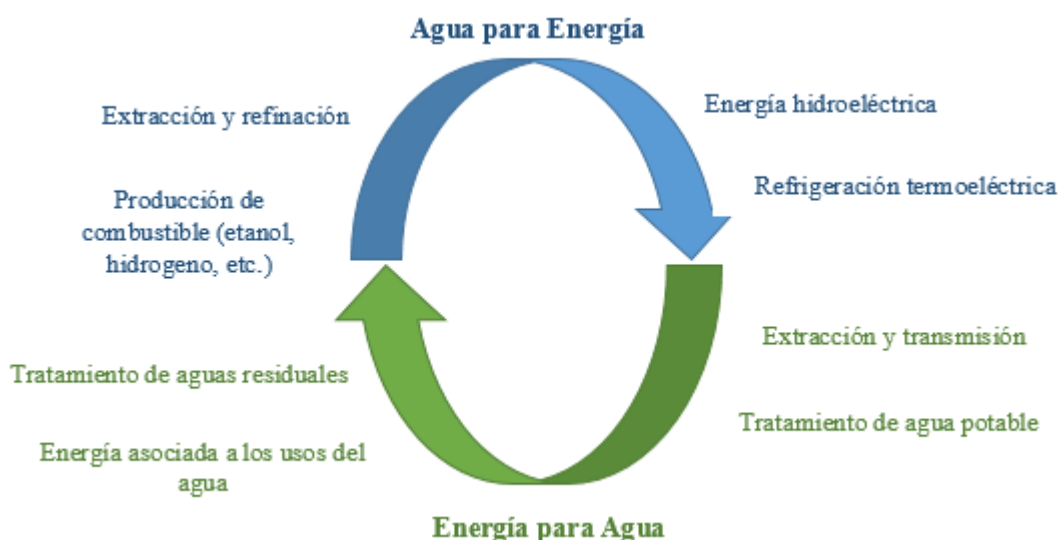


Figura 2. Ciclo del agua y energía (“*The Energy-Water Nexus*”, 2011)

La dependencia que existe entre el agua y el sector energético y viceversa, gira en torno a cuestiones como son los sistemas de gestión del agua y de infraestructuras o la energía sostenible y la eficiencia de los sistemas en funcionamiento.

Dado que con el tiempo se registran crecimientos a nivel económico y de población, las demandas de agua y energía también aumentan, puesto que ambos crecimientos implican incrementos de las demandas de producción agrícola, industrial y residencial.

Como se ha dicho anteriormente, el agua y la energía están intrínsecamente relacionados y son dos recursos esenciales para la vida. Sin embargo, en la actualidad sus perspectivas futuras se reflejan en la escasez de ambos. En el contexto actual, en el que los efectos del cambio climático y de la creciente demanda de la población mundial nos llevan a mayores demandas y competencias por el agua y la energía, es importante pensar en la gestión integrada de estos recursos, dado que ello propicia un uso más racional.

2.1. Estudios realizados en Estados Unidos

Se han realizado diversos estudios con enfoques distintos (la necesidad de energía en el sector urbano, en la agricultura y en la industria) pero pocos, con un enfoque global como el llevado a cabo por la Comisión de la Energía de California (CEC, 2005), en el cual se ha calculado, de forma detallada, el consumo de energía relacionado con el manejo de agua.

El estudio realizado por la Comisión de la Energía de California (CEC, 2005) trata de las interrelaciones entre los sectores del agua y de la energía. El uso del agua en California, según estudios, se encuentra en torno a 53.000 Mm³ en un año normal, siendo el 79% de ese volumen el que se utiliza en la agricultura.

California utiliza cerca de 14 billones de galones de agua en un año normal, con aproximadamente el 79% utilizado en la agricultura y el resto en el sector urbano. Una vez que se entrega el agua a los usuarios, en función de cada tipo de usuarios puede tener diversos fines (CEC, 2005).

En la tabla 1 (CEC, 2005) se presentan los resultados de la energía consumida en el sector del agua en 2001: se alcanzó cerca de 250.000 GWh que equivale a 19% de la demanda anual de electricidad, y 395.500 GWh que equivale a 32% de la demanda anual de gas natural.

Tabla 1: Relación gasto energía-agua en California, 2001 (CEC, 2005)

	Electricidad (GWh)	Gas natural (millones de termias)	Diésel (millones de galones)
Abastecimiento de agua y tratamiento			
Urbana	7.554	19	desconocido
Agricultura	3.188		
Usos finales			
Agricultura	7.372	18	88
Residencial	27.887	4.220	desconocido
Comercial			
Industrial			
Tratamiento de aguas residuales	2.012	27	desconocido
Energía total	48.012	4.284	88
Energía total	250.494	13.571	desconocido
Porcentaje de energía	19%	32%	desconocido

Dado que se trata de una cuestión de evidente interés, después del estudio realizado por la Comisión de Energía de California, diversas empresas estadounidenses se interesaron y se dieron cuenta de la importancia del tema, ya que la racionalización del consumo de energía y del agua es importante a nivel económico de un país.

El sector energético en EE.UU. prevé un aumento considerable de las necesidades para el año 2030: un 38% para el petróleo, un 20% para el gas natural, un 54% para el carbón, y un 58% para las energías renovables, según el informe Anual Energy Outlook 2006 con proyecciones a 2030 (EIA 2006).

2.2.Situación en España

Se ha estimado que el sector del agua en España requiere un gasto energético que, en términos porcentuales, puede representar aproximadamente el 7% del gasto energético total. Las etapas que más energía requieren son el abastecimiento y el tratamiento del agua, con un 64% del gasto energético total. En el caso del regadío, la componente energética (es decir, la intensidad energética) ha aumentado hasta 0,34 kWh/m³ en el año 2008 con respecto al año de 1990 (Corominas, 2009). El incremento verificado en el sector agrícola resulta de la transformación y modernización de los regadíos tradicionales, esencialmente basados en acequias y sistemas de distribución a cielo abierto y por gravedad, en regadíos más tecnificados y eficientes, en los que se logran aumentos en la productividad, ahorros en agua, mejora de la calidad de los productos, pero el consumo energético inevitablemente aumenta considerablemente.

En la tabla 2 se cuantifican los consumos energéticos por etapa. La etapa de abastecimiento y tratamiento de agua, incluye la energía consumida por la red de abastecimiento público para bombear el agua desde la fuente hasta las estaciones de potabilización. Ésta etapa representa un 64% de toda la energía relacionada con el agua. La energía relacionada con el agua en la etapa de distribución, representa un 20% y, por último, un 16% que representa la etapa de tratamiento de aguas residuales. Como se puede observar, el mayor consumo de energía se verifica en la etapa de abastecimiento y tratamiento de agua.

Tabla 2: Relación gasto energía-agua en España en 2007 (Hardy, L., Garrido, A., 2010)

Etapas del ciclo	Uso del agua	Electricidad	
	Volumen (Mm ³)	Consumo (GWh)	Porcentaje (%)
Abastecimiento y tratamiento de agua		11.861	64
Urbano	4.526	5.979	33
Desalación	694	2.276	12
Agrícola	20.360	4.196	23
Energía	8.759	1.656	9
Distribución		3.629	20
Residencial	2.544	441	2,4
Comercio	852	148	0,8
Municipal y otros	96	17	0,1
Industrial	1.840	349	1,9
Agrícola	20.360	2.469	13
Agua no registrada	1.191	206	1,1
Tratamiento de aguas residuales		2.893	16
Recogida de agua	5.204	260	1,4
Depuración	4.570	2.338	13
Agua reciclada (tratamiento y distribución)	501	294	1,6
Total de la energía relacionada con el agua		18.354	
Demanda total de energía en España		260.073	

3. Metodología

Para una buena gestión de un sistema de abastecimiento de agua, es importante conocer su funcionamiento real y tener una idea precisa de cuán eficiente es el sistema desde el punto de vista energético. La eficiencia desde un punto de vista energético, de un sistema se concreta en el que utiliza la mínima energía necesaria para su funcionamiento dentro de los parámetros (estándares de calidad) exigidos.

En el presente capítulo se expone la metodología que se propone para la evaluación de la eficiencia energética de los sistemas de distribución de agua a presión. El procedimiento es el detallado en el artículo “*Energy Assessment of Pressurized Water Systems, 2014*”. (Cabrera et al. 2014)

La metodología contempla globalmente el estado de la red, es decir, se tiene en consideración los aspectos relacionados con el funcionamiento hidráulico del sistema (fugas, pérdidas por rozamiento en las tuberías, pérdidas localizadas, etc.) y su funcionamiento energético (energía mínima requerida, energía aportada al sistema, energía consumida, etc.). Dicho estudio contempla tanto la energía requerida como la energía topográfica disponible. Para ambas situaciones, el análisis se estructura en cinco etapas: diagnóstico, auditorías, búsqueda de posibles soluciones, toma de decisiones y certificación de los sistemas eficientemente energéticos.

El procedimiento propuesto en la presente tesis se centrará en el estudio en función de la energía requerida, ya que permite realizar un análisis más detallado y, en función del estado y resultados obtenidos mediante la realización de un diagnóstico de la red, se pasa a una etapa donde el estudio se realiza de forma más pormenorizada. La metodología propuesta se divide en tres partes: diagnóstico, auditorías, que incorpora las etapas búsqueda de soluciones y toma de decisiones, y por último, la certificación. Se propone que la última etapa, certificación, se considere como una segunda fase del proceso de estudio de la eficiencia energética de las redes de distribución de agua presurizada, para el caso de que se implemente esta metodología

propuesta en países africanos, concretamente en Mozambique, cuyo tema ahorro y eficiencia energética están poco desarrollados.

3.1. Diagnóstico

En la primera etapa de diagnóstico, se obtiene información referente al estado de la red, es decir, nos permite saber, a partir de un primer análisis, los consumos energéticos registrados en la red, términos energéticos reales (energía total aportada al sistema, la energía consumida por los usuarios, la energía topográfica asociada a la red, etc.) y los términos energéticos ideales que representan los consumos que se registrarían en la red en caso de que fuera un sistema ideal.

Un sistema ideal se refiere a una red de distribución de agua donde no hay pérdidas de carga por fricción o fugas. En los sistemas ideales se pueden registrar dos situaciones: sistema ideal sin exceso de presión (figura 3) y sistema ideal con exceso de presión (figura 4). Un sistema ideal sin exceso de presión es aquel en que no hay pérdidas de carga por fricción y fugas. En este caso, no hay exceso de presión porque la presión en el punto crítico (p_{ci}) es igual a la presión de servicio requerida (p_0), es decir, la presión en el punto crítico es igual a la requerida. La aplicación de la ecuación de continuidad en este caso es directa. El volumen total inyectado en las estaciones de bombeo es igual a la suma de todas las demandas de los nudos de consumo ($V = \sum v_i$) y la energía suministrada (E_{Si}) es:

$$E_{Si} = \gamma \cdot V \cdot H_{hi} = \gamma \sum v_j \left[(z_j - z_l) + \frac{P_{ji}}{\gamma} \right] = \gamma \sum v_j \left[(z_j - z_l) + \frac{P_0}{\gamma} (z_h - z_j) \right] = E_{U0} + E_{ti} \quad (1)$$

Donde E_{U0} es la energía mínima requerida por los usuarios y E_{ti} es la energía topográfica que depende de las cotas del terreno. La energía topográfica se corresponde con el área entre la línea discontinua y la línea superior horizontal. Los cálculos del balance de energía son matemáticamente estáticos y se aplican para períodos de tiempo cortos. Por lo tanto, para períodos más largos, la energía suministrada total al sistema debe ser calculada por integración.

$$E_{U0} = \gamma \sum v_j \cdot (z_h - z_j) + \frac{P_0}{\gamma} \quad (2)$$

$$E_{ti} = \gamma \sum v_j \cdot (z_h - z_j) = \gamma \sum v_j \frac{P_{jt,i}}{\gamma} \quad (3)$$

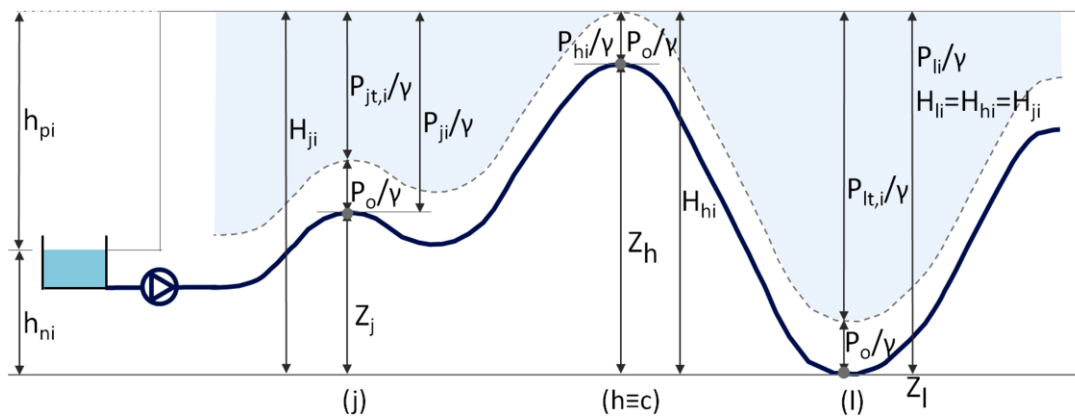


Figura 3. Perfil de un sistema presurizado ideal sin exceso de presión

En un sistema ideal con exceso de presión, la energía suministrada al sistema supera el valor mínimo requerido. En la figura 4 se presenta el perfil para un sistema ideal con exceso de presión.

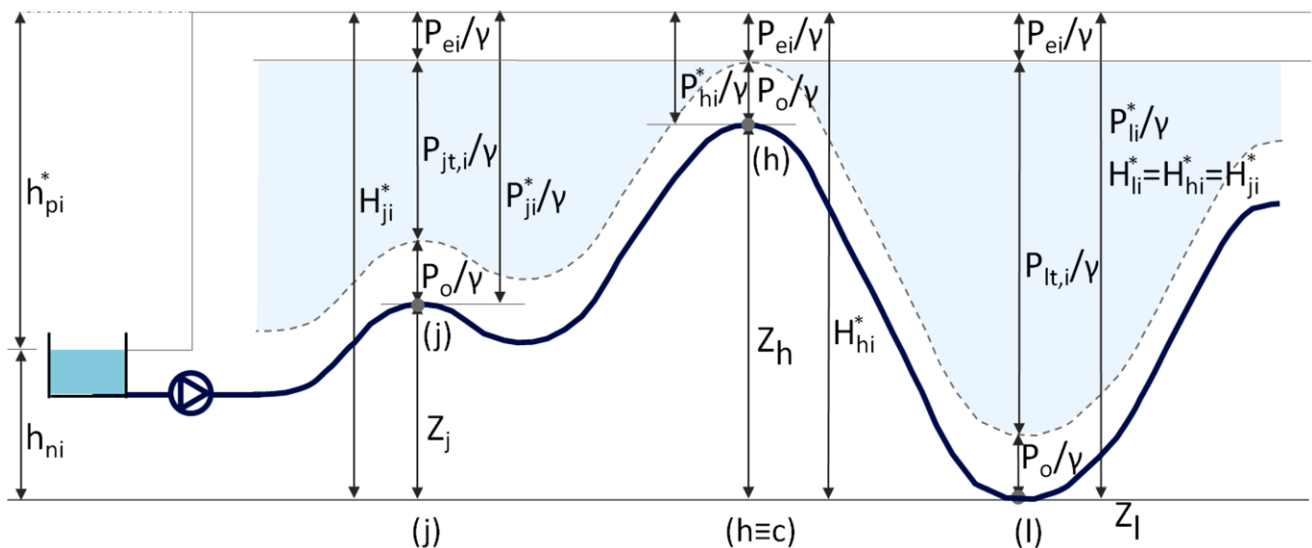


Figura 4. Perfil de un sistema presurizado ideal con exceso de presión

En un sistema real (figura 5), las pérdidas por fricción dependen del flujo y del nivel de fugas en la red, es decir, si el volumen de agua que circula por la red aumenta, el volumen de agua fugado y las pérdidas por fricción también son mayores.

En un sistema real, la energía mínima requerida por los usuarios es la misma que en un sistema ideal. Sin embargo, la energía topográfica cambia ya que está vinculada a la línea de carga hidráulica. Las pérdidas de energía (energía reducible global) en este caso son diferentes de cero, como ocurre cuando se trata de un sistema ideal. Las pérdidas ahora incluyen:

- Energía asociada en las fugas (E_{r_l})
- Energía disipada por fricción en tuberías, válvulas y otros elementos (E_{r_f})
- Energía perdida en las estaciones de bombeo (E_{r_p}) debido a ineficiencias (eléctrica, fricción o fallos en la operación de las bombas).
- Otras pérdidas (E_{r_0}) debido a la rotura de carga de tuberías o a presión en depósitos.

En resumen, la energía real suministrada al sistema viene dada por la siguiente expresión:

$$E_{Sr} = E_{U0} + E_{tr} + E_{rg} = (E_{U0} + E_{tr}) + E_{rl} + E_{rf} + E_{rp} + E_{r0} \quad (4)$$

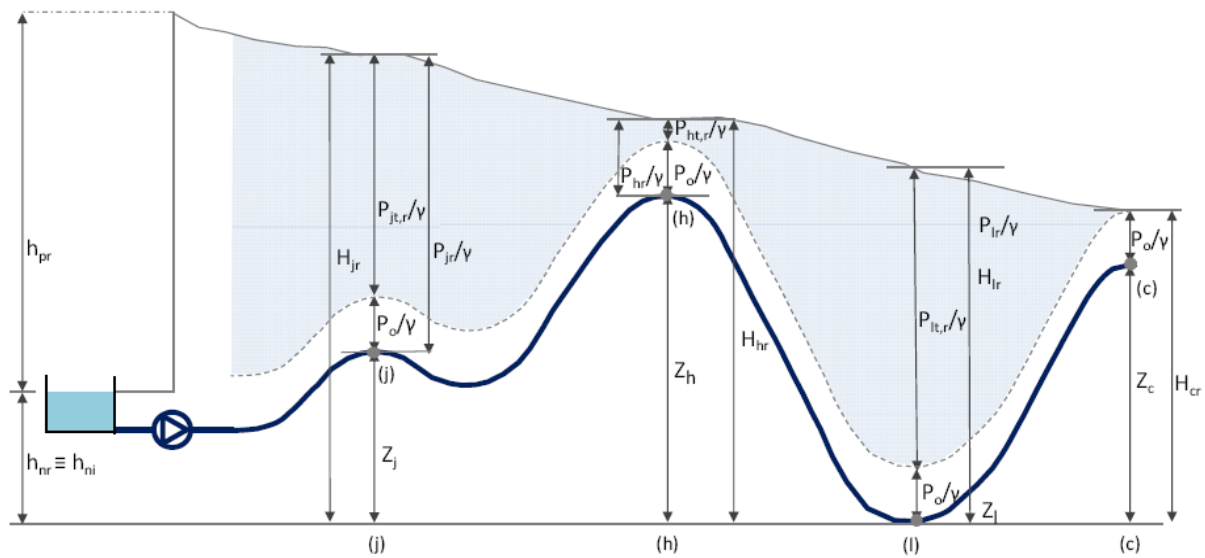


Figura 5. Perfil de un sistema presurizado real

3.2. Auditorías

Terminada la etapa de diagnóstico y tras verificar que el consumo de energía eléctrica es excesivo, se llevan a cabo las auditorías, hídrica y energética. Señalar que la optimización del consumo de energía no es posible sin antes optimizar el consumo de agua, es decir, primero se realiza la auditoría hídrica y después la auditoría energética. Con la realización de una auditoría hídrica se pretende conocer los volúmenes de agua inyectados en la red y determinar el nivel de pérdidas en la misma. Con los resultados de dicha auditoría hídrica se plantean diversas acciones con el objetivo de revertir dicho escenario, centrándose básicamente, en la reducción del nivel de pérdidas de agua en el sistema. Terminada la auditoría hídrica, se lleva a cabo la auditoría energética, que permite conocer los consumos energéticos verificados en el sistema: energía natural, energía aportada por los grupos de bombeo, energía que se pierde por fugas, etc. Los valores correspondientes a los consumos verificados por las bombas pueden ser extraídos de las facturas de energía eléctrica del sistema emitidas por la compañía de suministro o bien calculados mediante datos extraídos de las simulaciones que se realicen con el programa de cálculo EPANET. Con estos datos, se calculan los indicadores energéticos referentes a las eficiencias ideal, real y objetivo. Los dos primeros valores se calculan con los datos del sistema, y la eficiencia objetivo se obtiene por estimación, dependiendo del nivel de pérdidas admisible (tanto por fricción como por pérdidas locales) que se pretende alcanzar en el sistema y de la energía suministrada a la red. En esta primera etapa también se puede tener una idea de los márgenes de ahorro energético que se pueden alcanzar al mejorar el funcionamiento de la red calculando también los términos energéticos ideales.

Con los resultados de las auditorías, es posible identificar los puntos con más margen de mejora del sistema y qué medidas o intervenciones se pueden tomar para minimizar esos problemas. Las medidas pueden ser tanto de carácter operacional como de carácter estructural. En el caso de intervenciones operacionales, puede que sea necesario la realización de una inversión o ninguna, basta con que se realicen ajustes en los puntos de operación del sistema y se reduzcan las fugas, caso de que existan, para incrementar el desempeño del mismo. Para el caso de las

intervenciones estructurales, éstas pueden tener un coste de inversión que puede ser muy elevado ya que están asociadas a obras y cambios en los elementos del sistema.

Las acciones propuestas, deben presentar un buen balance coste-beneficio, es decir, los gastos realizados en inversiones se deben reflejar en un ahorro energético acorde con la inversión realizada.

Así pues, después de analizadas las primeras acciones a tomar para cada tipo de energía, la toma de decisiones requiere un análisis coste-beneficio que se basa en la comparación entre la energía ahorrada y los costes asociados a las intervenciones realizadas.

3.2.1. Auditoria Hídrica

La auditoría hídrica representa el seguimiento flujo de agua desde la extracción, a través del sistema de distribución de agua, hasta la propiedad de los usuarios (AWWA 2006).

Todos los sistemas de distribución de agua pierden agua por diversas razones, y en algunos sistemas, no hay estadísticas precisas de la cantidad de agua perdida. Sin embargo, la mayor parte de las pérdidas de agua que se producen en los sistemas pueden ser evaluadas y controladas mediante la realización de una auditoría hídrica regular.

Respecto a los programas de gestión de redes de abastecimiento, las auditorías hídricas representan un punto de partida importante porque aportan información referente sobre como se reparte el volumen de agua inyectado en una red. La aplicación de una auditoria hídrica permite determinar el nivel de pérdidas de la red de abastecimiento en análisis y para ello, se separan en dos términos: pérdidas aparentes y pérdidas reales o fugas. Al determinar cada uno de los dos términos antes mencionados, se puede tener una idea del volumen de agua fugado en la red, dónde y por qué se pierde el agua y qué medidas se pueden llevar a cabo para reducir las fugas.

El nivel de detalle en la auditoría hídrica varía en función de la información disponible sobre el sistema, al igual que en otros estudiosos, cuanta mayor sea la información disponible referente al problema, más detallado llega a ser el estudio.

A. Metodología IWA/AWWA

Históricamente, el proceso de auditoría hídrica ha sido utilizado de forma inconsistente. Una metodología para la realización de auditorías hídricas fiables fue desarrollada conjuntamente por la Asociación Americana de Trabajos del Agua (AWWA) y la Asociación Internacional del Agua (IWA) en el año 2000.

La propuesta del IWA/AWWA está orientada hacia la determinación del volumen de agua consumido y las pérdidas, que pueden ser aparentes o reales.

Varias son las agencias reguladoras, estatales y regionales, que han empezado a adoptar dicha metodología como práctica mejorada y fiable respecto al proceso impreciso que utilizaban para el cálculo del agua no contabilizada, y como método estándar para obtener datos que permitan hacer comparaciones de desempeño y evaluación.

A continuación se presenta el balance hídrico de la metodología propuesta por el IWA/AWWA, ilustrándose los diversos componentes en que los volúmenes de agua son monitoreados.

Para una mejor aclaración, la definición de los términos usados por el IWA/AWWA se describen posteriormente.

Tabla 3 : Auditoría hídrica (IWA/AWWA, 2000)

Volumen entrante al sistema	Consumo autorizado	Consumo autorizado facturado	Consumo facturado medido	Volumen facturado
			Consumo facturado no medido	
		Consumo autorizado no facturado	Consumo facturado no medido	Volumen no facturado
			Consumo no facturado medido	
	Volumen perdido	Pérdidas aparentes	Consumo no autorizado	
			Errores de medición (avería de los contadores)	
		Pérdidas reales	Fugas en las tuberías	
			Fugas en los tanques de almacenamiento	
	Fugas en acometidas			

➤ Volumen entrante al sistema

Corresponde al volumen bombeado a la red (medido o estimado a la salida de las estaciones elevadoras, pozos, etc.) introducidos en la red de distribución.

➤ Consumo autorizado

El consumo autorizado se entiende como aquél volumen de agua, medido y/o no medido, utilizado para fines residenciales, comerciales e industriales y otros usuarios que estén implícita o explícitamente autorizados a hacerlo por el suministrador de agua. El consumo autorizado puede incluir consumos en hidrantes de protección contra incendios, limpieza de tuberías y calles, riego de jardines municipales, etc.

➤ Consumo autorizado facturado medido

Es la cantidad de agua consumida por los usuarios y que es determinada a través del sistema de micromedición. Comprende aquellos usuarios domésticos, industriales y comerciales, así como de instituciones de carácter social y público, que generan periódicamente ingresos a la empresa a través de un sistema de facturación y cobros.

➤ Consumo autorizado facturado no medido

Es el volumen de agua autorizado y consumido por cualquier tipo de usuario, cuyo consumo es estimado (sin medición) y cobrado a través de una tarifa fija o plana. Se aplica a los usuarios donde aún no se ha implementado el sistema de medición o en las instalaciones temporales.

➤ Consumo autorizado no facturado

Es el consumo de agua permitido y que no genera ningún tipo de ingresos al operador. Está asignado a usuarios registrados y conocidos. Estos consumos pueden ser medidos o no estar sujetos a ningún tipo de medición. Por ejemplo: el agua empleada para el lavado de filtros.

➤ Volumen perdido

Se entiende como volumen perdido la diferencia entre el volumen entrante al sistema y el consumo autorizado.

➤ Pérdidas reales o físicas

Representan el volumen que pierde en el sistema a través de defectos en la red, bien sea en las tuberías, acometidas y depósitos de almacenamiento (incluyendo filtraciones en las redes de distribución, y el contador).

➤ Pérdidas aparentes

Se presentan por usos no autorizados (conexiones clandestinas) o por errores de lectura o de procesamiento de datos del sistema de información de la empresa (cálculo de consumos, catastro de redes, sistema informático, etc.)

➤ Volumen facturado y no facturado

El volumen facturado es el volumen de agua consumido y por el cual el operador del sistema recibe ingresos, mientras que el volumen no facturado es el que al no ser facturado, el operador no recibe ningún tipo de ingreso. Comprende el consumo autorizado pero no facturado y el volumen de agua perdido (pérdidas reales y aparentes).

3.2.2. Auditoría Energética

La ecuación integral de la energía se aplica a un volumen de control cuyos volúmenes de agua entrantes y salientes y los flujos energéticos que atraviesan los límites de la superficie definida son conocidos. Este proceso implica haber resuelto la ecuación del balance hídrico y el modelo matemático de la red. Los límites de la superficie definen qué elementos son externos (los que contribuyen aportando energía al flujo) y qué elementos son internos (los que pueden almacenar o disipar energía). Los grupos de bombeo son elementos externos, porque siempre aportan energía al flujo, mientras que las acometidas y fugas representan la salida de la superficie de control del sistema. La figura 6 representa el volumen de control y los flujos de agua y energías entrantes y salientes de un sistema de abastecimiento de agua presurizado. El modelo matemático es indispensable para cuantificar los flujos de energías entrantes y salientes a través de los límites

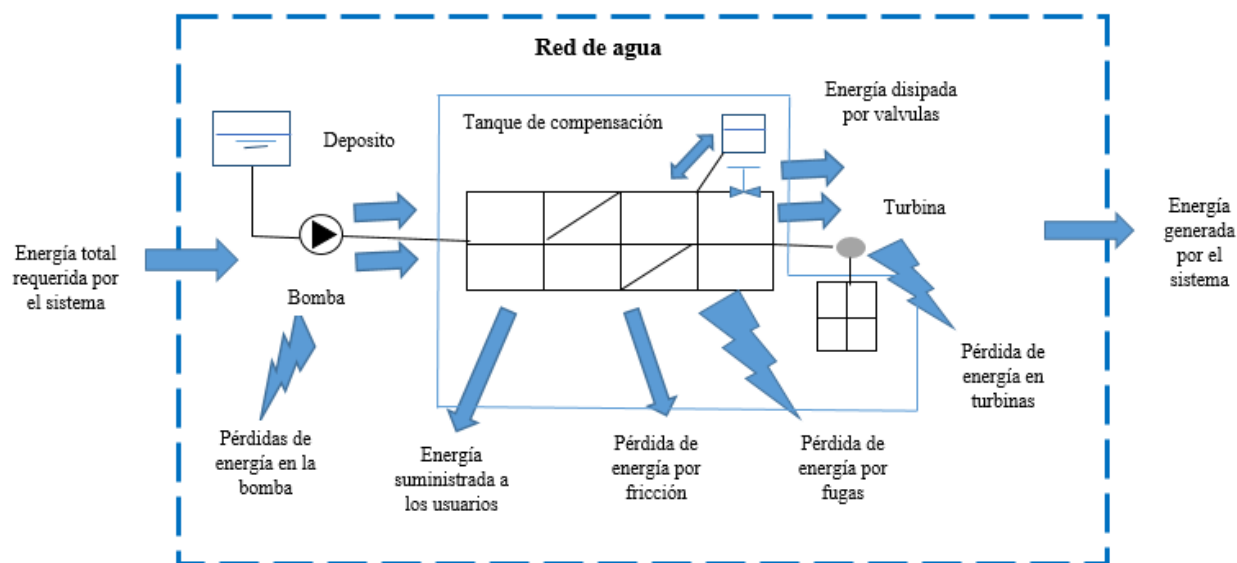


Figura 6. Volumen de control de una red de abastecimiento de agua presurizada (“Towards an energy labelling of pressurized water networks, 2013”)

B. Indicadores energéticos

a. Indicadores de eficiencia energética del IWA

Tradicionalmente los indicadores energéticos se han expresados en kWh/m³ como una relación entre el trabajo de eje y el volumen medido, una relación conocida como intensidad energética. Los indicadores aquí propuestos proporcionan una evaluación global del sistema a largo plazo. El nivel de referencia se corresponde con el del nudo de menor cota.

Según se define en el Manual de Indicadores de Gestión del IWA (Alegre, 2006), se han definido siete indicadores divididos en dos grupos: indicadores de contexto e indicadores de eficiencia energética.

Los indicadores de contexto (C1 y C2) dependen solamente de las características físicas del sistema y son independientes de las fugas. Para determinar cuán eficiente es la operación de una red (Alegre et al. 2006), se han propuesto los cinco indicadores que se presentan en la tabla 5:

Tabla 4: Indicadores de eficiencia energética

Indicadores de eficiencia	Definición
I1	Representa el exceso de energía suministrada al sistema, y es el cociente entre la energía real que entra al sistema y la energía mínima útil necesaria definida.
I2	Es una medida de la eficiencia de la utilización de la energía inyectada al sistema, y es el cociente entre la energía útil y la energía entrante al sistema (fracción de la energía total que es útil).
I3	Representa la energía asociada a las pérdidas por fricción. Proporciona información referente a la capacidad hidráulica del sistema (la capacidad para transportar y distribuir agua). Una red con las tuberías correctamente dimensionadas presenta un nivel de pérdidas por fricción moderado o reducido. Valores entre [0,2-0,4] se consideran aceptables. Una red donde no se registran pérdidas por fricción implica un diseño muy costoso.
I4	Representa la energía asociada a las fugas, mide la energía perdida debido a las fugas registradas en la red. En su cálculo intervienen: la energía que se pierde por fugas en la red real $E_L(t_p)$, la energía asociada a pérdidas por fricción en la red real $E_F(t_p)$ y la energía asociada a pérdidas por fricción en la red sin fugas $E_F'(t_p)$.
I5	Representa la cantidad de energía en exceso entregada a los usuarios. Es el cociente entre la energía entregada a los usuarios y la energía mínima útil. Es un indicador que proporciona información de las condiciones globales del sistema, pero en algunas situaciones puede ser que, para determinados sectores, la información proporcionada no sea realista. El indicador I5 refleja la cantidad de energía en exceso que se entrega a los usuarios en función de la energía mínima útil, es decir, hasta qué punto la presión en los nudos de la red está cerca de la mínima requerida exigida en el sistema. Como se mencionó anteriormente, cuanto más cerca el resultado esté de la unidad, más próximo a la presión mínima de servicio están los valores de presión de la red.

b. Indicadores de eficiencia energética propuestos

Además de los indicadores de gestión propuestos por el IWA, en la presente tesis, se presentan tres nuevos indicadores propuestos por otros autores (Cabreta et. al 2014) que permiten evaluar la eficiencia energética de los sistemas de abastecimiento de agua presurizados. La eficiencia energética de los sistemas de distribución presurizados puede ser definida como la relación que existe entre la mínima energía requerida por los usuarios y la energía que realmente se suministra al sistema. Según lo mencionado previamente, los dos primeros indicadores (eficiencia real y

eficiencia ideal), se basan en un balance de la energía del sistema en el que se utilizan, los valores de energía requerida por los usuarios, la mínima cantidad de energía que se debe suministrar al sistema y la energía real consumida. Estos dos indicadores son calculados de acuerdo con los datos del sistema considerando un período mínimo de un año y los valores obtenidos mediante simulaciones con el programa de cálculo EPANET. El tercer indicador, eficiencia objetivo, representa el valor correspondiente a una meta alcanzable vinculado a un nivel de pérdidas máximo que se puede reducir.

La eficiencia real, proporciona información sobre el rendimiento actual y real del sistema y, cuando se utiliza en conjunto con la eficiencia ideal, se obtiene la diferencia de rendimiento máximo que se puede conseguir si se mejora la eficiencia real del sistema. La eficiencia ideal viene limitada por la energía topográfica ligada a la topografía de la red. Las eficiencias real, ideal y objetivo, se refieren a los casos en que se tiene un sistema real, ideal u objetivo.

i. Indicador de eficiencia ideal-Sistema ideal

La energía mínima requerida en un sistema ideal, se representa por E_{U0} y la energía suministrada se representa por E_{Si} . Considerando que parte de la energía topográfica incluida en la energía suministrada en un sistema ideal se puede recuperar, esta medida se refleja en la mejora de la eficiencia energética de los sistemas. Puesto que no siempre se puede recuperar parte de la energía topográfica, la eficiencia energética se puede desagregar en eficiencia energética con recuperación de energía (η_{wi}) y en eficiencia energética sin recuperación de energía (η_{ai}).

La eficiencia energética de un sistema ideal con y sin recuperación de energía son dadas por:

$$\eta_{wi} = \frac{E_{U0} + E_{ti}}{E_{Si}} = 1 - \frac{E_{ei}}{E_{Si}} \quad (5)$$

$$\eta_{ai} = \frac{E_{U0}}{E_{Si}} = 1 - \frac{E_{ti}}{E_{Si}} - \frac{E_{ei}}{E_{Si}} = 1 - \theta_{ti} - \frac{E_{ei}}{E_{Si}} \quad (6)$$

Con respecto a la ecuación 6, si no hay exceso de energía suministrada, y considerando que hay recuperación de energía, la eficiencia energética será igual a uno. Si la red es plana, el término de energía topográfica (E_{ti}) es cero, por lo tanto, calcular la eficiencia energética, en este caso, es irrelevante.

En la ecuación 6, el término θ_{ii} representa la fracción de energía suministrada que se pierde, considerando que no hay recuperación de energía. Si θ_{ii} se acerca a su límite superior, se debe plantear la posibilidad de instalar válvulas reductoras de presión para reducir las presiones y fugas en la red. En casos extremos, sectorizar la red puede ser la mejor alternativa para reducir el término de energía topográfica.

ii. Indicador de eficiencia real-Sistema real

En los sistemas reales, además de considerarse para el cálculo de la eficiencia energética, la energía mínima requerida por los usuarios y la energía total aportada al sistema, se incluyen también las pérdidas que se verifican en la red. La expresión para el cálculo del rendimiento es:

$$\eta_{ar} = \frac{E_{U0}}{E_{Sr}} = 1 - \frac{E_{tr}}{E_{Sr}} - \frac{E_{er}}{E_{Sr}} - \frac{E_{rg}}{E_{Sr}} = 1 - \theta_{tr} - \theta_{er} - \lambda_{rg} \quad (7)$$

Donde θ representa los porcentajes de energía topográfica y λ las pérdidas reducibles. Advertir que las pérdidas reducibles se refieren a las energías asociadas a las fugas, disipada por fricción en las tuberías, pérdidas en las estaciones de bombeo y otras que puedan existir. La contribución de cada una de las ineficiencias del sistema anteriormente citadas, se expresa en la ecuación siguiente:

$$\eta_{ar} = 1 - (\theta_{tr} + \theta_{er} + \lambda_{rl} + \lambda_{rf} + \lambda_{rp} + \lambda_{r0}) \quad (8)$$

La energía mínima requerida es dato, y la energía total suministrada se calcula a partir de la energía consumida por las bombas, que puede ser calculada mediante lecturas reales realizadas

en el sistema (facturas de energía) o por estimación, recurriendo a los datos extraídos del programa EPANET, y la energía topográfica, que depende de la topografía del sistema.

iii. Indicador de eficiencia objetivo

Conociendo las eficiencias real e ideal del sistema, y haciendo la diferencia $(\eta_{ai}-\eta_{ar})$ se puede estimar el margen de mejora en términos de eficiencia energética del sistema, es decir, lo cerca que el segundo término puede llegar a estar del primero después de implementadas las medidas de mejora, considerando que la relación coste-beneficio debe ser aceptable. Al nuevo término se le denomina eficiencia objetivo y se le atribuye la nomenclatura $\eta_{ar,0}$. Considerando que la eficiencia energética mejora, las pérdidas de energía que se registran en la red se reducen, por lo que, el término E_{Sr} pasa a denominarse $E_{Sr,0}$ y la ecuación 4 se convierte en:

$$E_{Sr,0} = E_{U0} + E_{tr,0} + E_{rg} = (E_{U0} + E_{tr,0}) + E_{rl,0} + E_{rf,0} + E_{rp,0} + E_{r0,0} \quad (4.a)$$

La energía mínima requerida por los usuarios (E_{u0}) es la misma, y la energía topográfica, que depende del nivel de pérdidas, debe ser calculada nuevamente en función de las nuevas presiones que se registran en la red ($E_{tr,0}$). Las presiones se determinan ajustando el modelo matemático de la red de acuerdo con el nuevo nivel de pérdidas, y obteniéndose presiones complementarias $[(p_{jt,r})_0]$.

$$E_{tr,0} = \gamma \sum v_j \cdot \left(\frac{P_{jt,r}}{\gamma} \right)_0 \quad (9)$$

Los términos E_{ti} y $E_{tr,0}$ son similares, por lo que se puede asumir que:

$$E_{tr,0} - E_{ti} = \gamma \sum v_j \left\{ \left[\left(\frac{P_{jt,t}}{\gamma} \right)_0 - \frac{P_{jt,r}}{\gamma} \right] \right\} \rightarrow 0 \quad (10)$$

Este término tendrá un signo positivo o negativo dependiendo de la topografía del sistema, la posición del punto crítico, y las condiciones de trabajo. La figura 7 ilustra los dos casos, la situación (a) para $E_{ti} > E_{tr,0}$ y la situación (b) para $E_{ti} < E_{tr,0}$. Para el caso de que la red funcione bajo condiciones óptimas (comportamiento ideal), la energía topográfica es siempre la misma, incluso cuando la posición del nudo crítico cambie. En este caso, el sistema es estático y la línea de gradiente hidráulico es siempre constante y horizontal. Para el caso en el que la red presenta un comportamiento real, la energía topográfica varía dependiendo de la ubicación del punto crítico, es decir, cuanto más alejado esté el nudo crítico, mayor es la energía necesaria para asegurar que la presión mínima requerida en este punto sea la estipulada, puesto que la longitud va aumentando y las pérdidas a lo largo de la tubería también aumentan.

En una red plana, la diferencia será siempre positiva. Para que el sistema funcione con la presión de servicio hasta el nudo más lejano, que en este caso es el nudo crítico, la presión debe ser mayor que la presión requerida. En un sistema con un terreno irregular, este valor dependerá de la topografía y de la posición del nudo crítico.

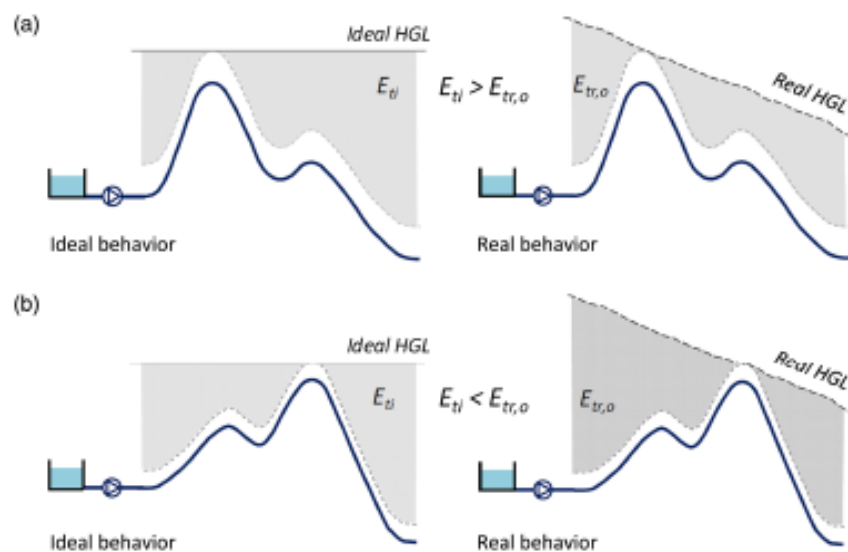


Figura 7. Perfiles comparativos entre E_{ti} y $E_{tr,0}$

La eficiencia objetivo $\eta_{ar,0}$ depende del nivel de pérdidas máximo que se pretende alcanzar en la red, y se calcula mediante:

$$\eta_{ar,0} = \frac{E_{U0}}{E_{Sr,0}} = \frac{E_{U0}}{E_{Si}} \frac{E_{Si}}{E_{Sr,0}} = \eta_{ai} \frac{E_{Si}}{E_{Sr,0}} \quad (11)$$

3.3. Certificación

Por último, en lo referente a la certificación, ésta dependerá de la legislación de cada país. En estos momentos, en el caso de Mozambique, es más importante centrarse en la relación agua-energía y en la importancia que el ahorro y gestión sostenible de estos recursos representa para la economía del país y, posteriormente, cuando el tema esté más desarrollado, se plantee la necesidad de elaborar una normativa que permita certificar a los sistemas de distribución de agua a presión.

4. Medidas propuestas para mejora de la eficiencia energética

Realizado el estudio referente a la eficiencia energética de una red de distribución de agua y detectadas las ineficiencias del mismo, entraríamos en la siguiente etapa, que sería el planteamiento de posibles soluciones. Las medidas correctoras pueden ser a nivel de diseño y manejo de la red, mejora en los equipos y mejora en la contratación de los servicios de suministro de energía eléctrica. Las medidas propuestas van desde un cambio en la concepción del diseño de las redes, a pequeños ajustes que se pueden realizar en redes ya existentes y sin la necesidad de realizar grandes inversiones. Algunas de las propuestas son difíciles de aplicar una vez que la red ya está configurada (red urbana o de riego) pues exigiría un reajuste de todo el diseño incluyendo las inversiones que también habría que considerar. Sin embargo, algunas de las propuestas son más factibles de aplicar y los resultados en términos de ahorro energético y económico pueden ser visibles a corto plazo.

4.1. Mejoras en el diseño y manejo de la red

Las mejoras en el diseño afectan la configuración inicial de la red y en algunas situaciones pueden ser complicadas de realizar puesto que partiendo de un diseño de red ya existente, los cambios requieren de grandes inversiones. Además suele pasar que las inversiones que han configurado el diseño inicial de la red no hayan sido todavía amortizadas por la explotación, lo que puede encarecer más las reformas. En lo referente a las mejoras en el manejo de la red, estas pueden ser más fáciles de llevar a cabo puesto que afectan a cambios menos profundos de la red en estudio.

➤ Sectorización de la instalación por zonas de cota homogénea

Se recomienda que esta medida se considere en la fase de diseño de la red puesto que una vez ya construida puede ser poco rentable. Se basa en la minimización de la energía aportada a las zonas de menor cota topográfica de la red.

El diseño de la red de riego se realiza para que los hidrantes de consumo reciban el caudal de diseño a una presión mínima de funcionamiento ya que el diseño de la estación de bombeo está condicionado por los hidrantes de mayor cota topográfica y que estén a una mayor distancia haciendo con que el resto de los hidrantes reciban agua con exceso de presión. El exceso será tanto mayor cuanto mayor sea el desnivel de la zona regable. Los excesos de presión pueden ser reducidos mediante la sectorización de la red, es decir, distribución por sectores con la menor diferencia de cotas posible. De esta forma, se consigue que la energía suministrada en cada sector se adapte mejor a la energía requerida por la zona, siendo su eficiencia de suministro energético mayor.

➤ Reorganización del reparto de agua en turnos con el mismo volumen de demanda (Redes de Riego)

En el caso de redes de riego, se recomienda que se reorganicen el reparto de agua en turnos de riego con un mismo volumen de demanda después de la sectorización de la red. Con esta medida se consigue que las bombas funcionen de manera más homogénea, los volúmenes demandados

entre los distintos turnos pasarán a ser similares y se conseguirá, a su vez, una mejora en los rendimientos del sistema.

➤ Instalación de válvulas reductoras de presión

Estos elementos se utilizan para evitar el exceso de presión en las redes en instalaciones donde los desniveles topográficos son muy importantes. Si la configuración de la red permite que la distribución se realice por gravedad desde una toma situada a mayor cota que la cota más elevada de la red y la presión en los nudos alcanza la mínima requerida de servicio, la instalación de una válvula reductora de presión no supone ningún gasto de energía para los gestores de la red porque la energía aportada es natural. Solamente se pierde la energía inherente a la configuración de la red de distribución y que se podría aprovechar mediante instalación de turbinas para la generación de energía, en vez de disipar la energía instalando válvulas reductoras de presión. Sin embargo, se la cota de la toma de agua es inferior que la cota más elevada de la red, es necesario la instalación de grupos de bombeo para que las presiones en los nudos de mayor cota pueda alcanzar la presión requerida de servicio. En este caso, instalar válvulas reductoras de presión, supone un derroche de energía porque se tiene que aportar energía al sistema y a la vez, disipar dicha energía para que en los nudos de cota inferior no se llegue a alcanzar presiones demasiosas altas.

Por tanto en redes cuyos desniveles topográficos son importantes (superior a 30m) y que requieran estaciones de bombeo se recomienda que el diseño o manejo de la red se realice mediante sectores para evitar así la instalación de válvulas reductoras de presión en las tuberías principales situadas a menor cota.

➤ Establecimiento de un protocolo de mantenimiento periódico de las instalaciones

La mayoría de los sistemas de distribución de agua tienen previstas las partidas presupuestarias para ejecución del proyecto pero muy pocas consideran el mantenimiento posterior de dichas instalaciones. Por ejemplo en las estaciones de bombeo, la falta de mantenimiento puede originar una disminución del rendimiento energético y pérdidas energéticas en el sistema con el paso del tiempo provocadas por la variación de la curva Q-H. La falta de limpieza de las captaciones

pueden originar la aparición de algas que pueden impedir el cierre adecuado de las válvulas e incluso la obstrucción de filtros y rodets de las bombas.

El mantenimiento de las instalaciones debe incluir actividades como:

- Revisión del funcionamiento de las válvulas instaladas en el sistema (válvulas de corte, reductoras de presión, retención, etc.).
- Revisión del sistema de limpieza en las estaciones de filtración y evitar la proliferación de algas en las captaciones (depósitos o balsas).
- Revisión del funcionamiento de los grupos de bombeo y consumo energético de los equipos.

4.2. Mejoras en los equipos de bombeo instalados

Los equipos de bombeo tienen una gran importancia capital en la eficiencia energética de las redes de distribución de agua a presión. El consumo de energía en estos equipos depende de las necesidades energéticas de la red hidráulica, de los motores que las accionan, de los mecanismos de regulación y control y del mantenimiento de los equipos. En algunas ocasiones mejorar el funcionamiento de los equipos de bombeo constituye el grueso de las medidas que se puede llevar a cabo en una comunidad de regantes con el fin de mejorar la eficiencia energética del sistema.

➤ Estaciones de bombeo sobredimensionadas

Las estaciones de bombeo se dimensionan para un caudal de diseño superior al caudal demandado por los usuarios durante la mayor parte del tiempo, lo que no significa que los equipos estén bien o mal dimensionados. Sin embargo, hay circunstancias que hacen que, durante algún tiempo, una estación de bombeo esté o se encuentre sobredimensionada o infradimensionada. Cuando se proyecta una estación de bombeo se prevé abastecer a la totalidad

de los usuarios, en el caso de redes urbanas, y a la totalidad de la superficie regable, en el caso de Comunidades de Regantes, pero esto no se produce inmediatamente después de la puesta en funcionamiento la red, sino que se proyecta para un futuro próximo. Con el paso del tiempo, en el caso de las redes urbanas, estas suelen crecer o, al contrario, puede quedarse cierta superficie urbana sin edificar, por lo que las necesidades de caudal pueden ser mayores o menores a las previstas, y en el caso de redes de riego, puede ocurrir que la superficie agrícola se destine a otros fines, se produzca un cambio en el tipo de cultivo, no siempre se llegue a poner en riego toda la superficie prevista para ello o se abandonen parcelas de cultivo, lo que puede llevar a un aumento o a una reducción de las necesidades de caudal. En el caso en el que se registre una reducción en las necesidades de caudal, las bombas inicialmente dimensionadas estarán trabajando casi siempre muy lejos del punto de funcionamiento, lo que conlleva a una eficiencia energética del sistema baja. En estos casos, se recomienda la sustitución de al menos una de las bombas por dos con la mitad del caudal nominal de la bomba de mayor capacidad. Esta medida permite que, a caudales más bajos, la estación de bombeo trabaje con un mejor rendimiento.

➤ Accionamiento de bombas mediante variadores de velocidad

Las necesidades de caudal y presión no suelen ser constantes en las redes de distribución de agua. Como las bombas son dimensionadas para las máximas necesidades, cuando la demanda de caudal es más baja, las bombas funcionarán con un bajo rendimiento. O bien la bomba trabajará con un caudal muy superior a la demanda, o bien será necesario estrangular la válvula, lo que lleva a un mayor consumo de energía y a una menor vida de la bomba.

Una bomba impulsada por un motor de velocidad fija, la regulación del caudal ha de hacerse mediante la apertura y cierre de una válvula. En cambio, si se utiliza un variador de velocidad la regulación es más eficiente una vez que el motor no consumirá el exceso de energía que posteriormente se disipa en la válvula. Los variadores de velocidad permiten reducir la potencia absorbida por la bomba en los períodos de menor demanda de caudal. Además del ahorro energético, existen otras ventajas como el menor desgaste de los elementos mecánicos y menos ruidos y vibraciones.

En el caso de estaciones de bombeo ya en funcionamiento, se pueden alcanzar grandes ahorros energéticos mediante la instalación de un variador de velocidad para regular el trabajo de una bomba ya existente.

➤ Instalación de arrancadores estáticos

En el arranque de los motores que accionan las bombas se producen intensidades muy altas así como un elevado par de arranques, que puede ser perjudicial para el motor desde el punto de vista mecánico. Los arranques bruscos implican trabajos de mantenimiento más frecuentes. Para evitar estos casos, se puede limitar la intensidad de arranque. Los variadores de frecuencia reducen los picos de intensidad pero en caso de bombas que trabajan a un régimen fijo el uso de arrancadores estáticos es más indicado.

4.3.Mejora en la contratación de la tarifa de energía

Estas medidas no suponen un ahorro energético, pero sí un ahorro económico como resultado de una mejor gestión de la energía. Consisten básicamente en adecuar el consumo de energía a las condiciones de las compañías suministradoras de energía eléctrica permitiendo que se beneficien de ventajas como tarifas más económicas, consumo en horas valle en que el precio de la energía es más barato, etc. Así, se reducen los costes energéticos que suponen una importante partida en los costes totales de operación de los sistemas de distribución de agua a presión.

Respecto a la selección de la tarifa a contratar se debe hacer en función de las horas de utilización de las instalaciones a plena carga. La contratación de tarifas varía en función de cada país por lo que, este punto debe adaptarse y estar en conformidad con las leyes aplicables del país.

5. Caso de Estudio: Red de Riego de Cap de Terme

5.1. Descripción de la red inicial

El presente estudio se refiere a la red de riego de Cap de Terme que pertenece a la comunidad de regantes de Villareal. El cultivo cuenta con una superficie de 2.406 ha, divididas en 12.000 parcelas, distribuidas en los términos municipales de Villarreal, Alquerías y Burriana. La red de riego de Cap de Terme entró en funcionamiento en 2006. Transcurridos 2 años desde su puesta en funcionamiento, se detectó que los consumos energéticos generados de la red eran muy elevados, creando ciertas inquietudes en la comunidad de regantes.

En el presente capítulo se aplicará la metodología propuesta en la tesis para evaluar los consumos energéticos registrados e identificar los posibles problemas y sus causas, dirigidos hacia la mejora del funcionamiento de la red de riego. La red es ramificada, y se abastece mediante un embalse que distribuye el agua por toda la red a partir de una estación de bombeo constituida por 5 bombas que funcionan todas a la vez. La red está conformada por 477 tuberías, 478 nudos y cerca de 55 km de tubería. El análisis que aquí se presenta ha sido realizado con datos relativos al año de 2011. El riego se realiza durante 8 horas al día repartidas en 4 turnos de dos horas cada uno.

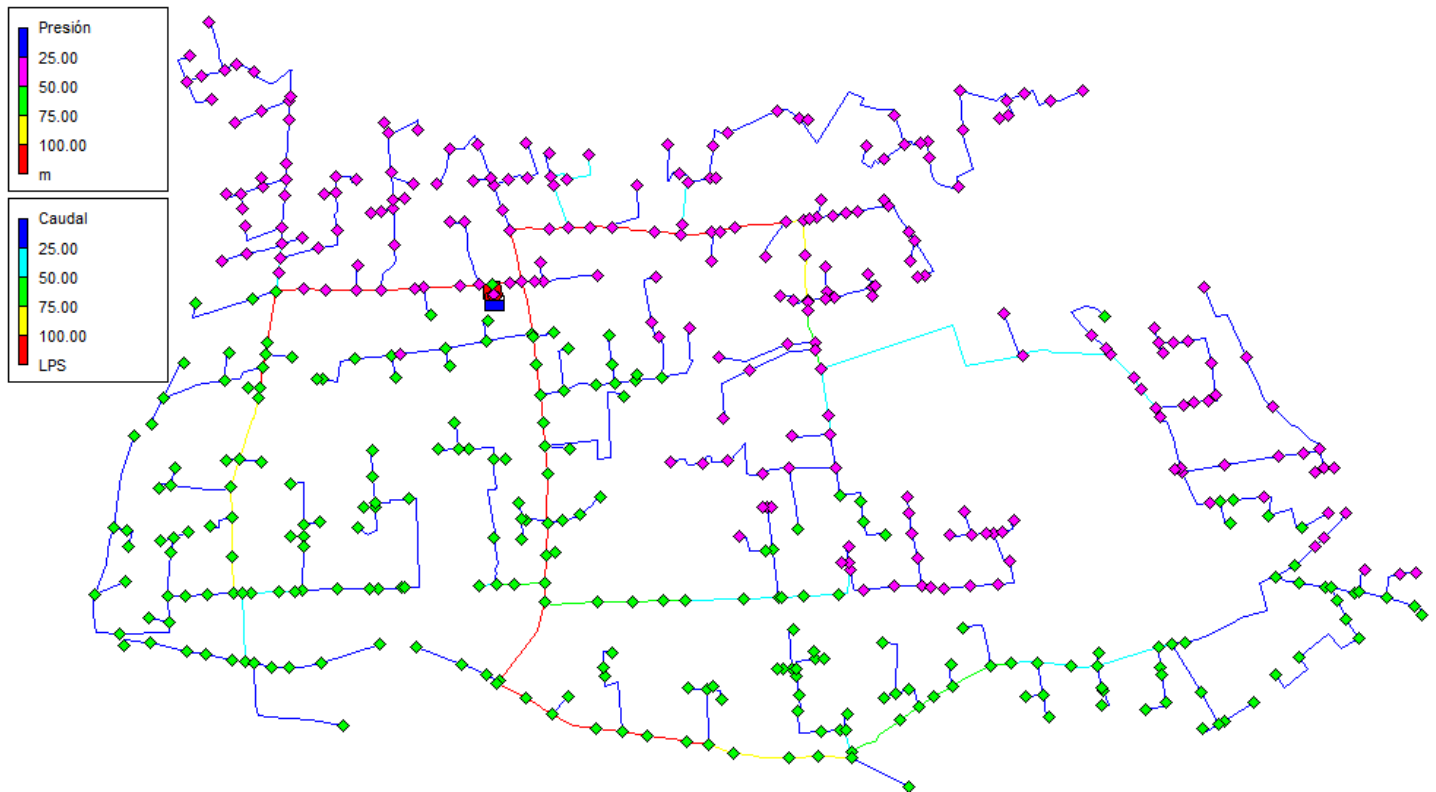


Figura 8. Simulación de la red inicial de Cap de Terme para la hora 00:00

Con el modelo matemático de la red se hace el balance hídrico, de donde se obtiene que el volumen diario inyectado en la red es 20.030 m³ y el demandado 18.586 m³.

Con respecto a las fugas en las tuberías, éstas se han calculado mediante la siguiente expresión:

$$d_k^{leak} = \frac{\beta_k \cdot L_k}{2} (p_{N_1}^\alpha + p_{N_2}^\alpha) \quad (12)$$

donde β_k es el coeficiente característico de pérdidas de la tubería, L_k la longitud y P_N indica la presión en los nudos aguas arriba (N_1) y aguas abajo (N_2) y α es el exponente característico que representa el comportamiento de las fugas. En el caso de estudio, los parámetros β y α se obtuvieron mediante la calibración del modelo, donde $\beta=4 \cdot 10^{-5}$ y $\alpha=0.8$. En términos

porcentuales, el volumen fugado representa un 7% del volumen inyectado en la red, es decir, 1.444 m³ diarios.

De forma generalizada, la red presenta valores de presión muy elevados en los nudos. En la tabla 6 se presentan los valores de las presiones referentes a las presiones máxima y mínima de la red, registradas en cada hora.

La red inicial no dispone de ningún sistema que permita regular y controlar el funcionamiento de los equipos en régimen variable. Las necesidades de presión y caudal en una red de distribución no suelen ser constantes a lo largo del día. En general, los grupos de bombeo son dimensionados para las máximas necesidades [(H-Q)_{máx.}] y como consecuencia, en muchos períodos el rendimiento de las bombas está muy lejos del máximo ($\eta_{máx.}$), es decir, la bomba trabajará, la mayor parte de su tiempo, en puntos de funcionamiento [(H-Q)_i] distintos del punto utilizado para su dimensionado, lo que conlleva un consumo de energía superior al requerido e incluso una menor vida útil de la bomba. Por el contrario, una estación de bombeo en la que hay al menos una bomba regulada por un variador de velocidad es más eficiente, siempre y cuando el régimen de trabajo de la misma se encuentre dentro de un rango determinado. Al no tener ningún dispositivo que permita regular el funcionamiento de las bombas, las potencias absorbidas por estas son elevadas, lo que conlleva a elevados consumos energéticos. La potencia máxima absorbida por las bombas para el escenario en análisis es de 83,72 kW y la media de 81,80 kW. La red no está sectorizada y la zona baja del sistema recibe agua con exceso de presión.

Tabla 5: Presiones registradas en la red inicial

Hora	0.00	01.00	02.00	03.00	04.00	05.00	06.00	07.00	08.00
Presión Mínima	37,74	37,74	34,27	34,27	36,65	36,65	45,19	45,19	37,74
Presión Máxima	59,83	59,83	56,61	56,61	57,75	57,75	68,24	68,24	59,83

5.2. Aplicación de la metodología propuesta

5.2.1. Diagnóstico

Tal y como se indicó en capítulos anteriores, en la metodología propuesta en la presente tesis la evaluación de la eficiencia energética de un sistema de distribución de agua a presión se inicia con un diagnóstico que permite detectar si el sistema presenta alguna anomalía con respecto a los consumos de energía eléctrica verificados.

Se calculan los términos energéticos reales e ideales y los rendimientos para cada caso, tanto para el sistema real como para el sistema ideal.

Tabla 6: Términos energéticos reales e ideales

Términos energéticos reales	Energía de eje ($E_{sr,p}$)	2.967 kWd/año
	Energía natural (E_{nr})	1.817 kWd/año
	Energía total aportada (E_{sr})	4.784 kWd/año
Términos energéticos ideales	Energía mínima requerida por los usuarios (E_{u0})	1.532 kWd/año
	Energía topográfica ideal (E_{ti})	635 kWd/año
	Energía total aportada (E_{si})	2.167 kWd/año

Con los resultados de la tabla 6 se calculan los rendimientos ideal y real del sistema, a partir de los cuales, ya se puede tener una idea con respecto a la eficiencia energética del sistema, si es buena o mala.

Aplicando las fórmulas 6 y 7 se obtuvieron los siguientes valores:

$$\eta_{ai} = 0,70 \quad \eta_{ar} = 0,32$$

Los resultados arriba presentados indican que en un sistema ideal, sin fugas, el rendimiento del sistema puede llegar a 0,70. El segundo valor indica el rendimiento real, es decir, el rendimiento del sistema en las actuales condiciones de funcionamiento y, como se puede observar, está muy lejos de lo que es el rendimiento ideal. El margen de mejora del rendimiento del sistema es significativo, por lo que es importante que se evalúen las posibles alternativas de mejora considerando siempre el factor económico, teniendo en cuenta que el sistema entró en funcionamiento hace poco tiempo y no se pretenden realizar grandes inversiones para conseguir dicha mejora.

Con respecto al porcentaje de energía topográfica en el sistema, este valor es de 0,30, que representa un valor alto para lo que se considera aceptable, pues se recomienda que este valor sea igual o inferior a 0,20.

5.2.2. Auditorías

En primer lugar, para realizar la auditoría hídrica y con la ayuda del programa EPANET, se simuló el modelo y se obtuvieron los valores referentes a los volúmenes inyectado y demandado en la red, 20.030 m³ y 18.586 m³ respectivamente, a partir de los cuales se obtiene el volumen fugado, que se corresponde con un 7% (1.444 m³).

Como se puede ver, el volumen fugado en el presente caso de estudio es reducido por lo que no representan un problema. Éste valor puede ser considerado como el valor de las fugas indetectables.

Realizada la auditoría hídrica, se lleva a cabo la auditoría energética donde se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 7: Resultados de la auditoría energética

Energía entrante (kWh/d)		Energía de salida (kWh/d)		Energía disipada (kWh/d)
E _N	E _P	E _U	E _L	E _F
1.817 (38%)	2.967 (62%)	4.218 (88%)	338 (7%)	229 (5%)

Los resultados presentados en la tabla 7 muestran lo siguiente:

- La mayor parte de la energía que entra al sistema es aportada por los grupos de bombeo y representa un 62%, siendo la energía restante aportada por el depósito. Los grupos de bombeo aportan anualmente 1.083 MWh/año y la energía natural aportada es de 663 MWh/año.
- El 88% de la energía que se aporta al sistema se entrega a los usuarios, un 7% de la energía se pierde en fugas y el 5% restante representa la energía que se pierde por fricción, es decir, energía que se disipa debido al caudal que se demanda y al caudal fugado. En términos de cifras, la energía asociada a las fugas es igual a 120,45MWh/año y la energía asociada a las pérdidas por fricción es 87,24MWh/año.

Con respecto a los indicadores de eficiencia energética del IWA, los resultados se presentan en la tabla siguiente:

Tabla 8: Resultados de los indicadores de gestión energéticos para la red inicial

Indicadores	I1	I2	I3	I4	I5
Red inicial	1,91	0,88	0,05	0,08	1,68

El indicador I1 muestra cuantas veces la energía que se inyecta al sistema excede a la energía útil teóricamente necesaria. En este caso excede en más de uno, por lo que existe un margen de mejora. El segundo indicador energético I2, indica el porcentaje de energía entregada a los usuarios, es decir, un 88% se entrega a los usuarios y el resto, se pierde tanto por fugas como por fricción. El tercer indicador I3, proporciona información referente a la capacidad hidráulica del sistema, es decir, su capacidad de transporte y distribución de agua. Desde un punto de vista

energético, tener una red de tuberías correctamente dimensionadas significaría que en esta red las pérdidas de carga serían reducidas o casi inexistentes, por lo que el resultado de I3 sería cero. Obtener esta cifra en la práctica es casi, si no inalcanzable, porque eliminar todas las pérdidas en una red es imposible. Los valores aceptables suelen estar entre 0,2 y 0,4. En el caso en análisis, el resultado es un 5%. Desde el punto de vista energético la red no se ve afectada por las pérdidas por fricción, sin embargo, en términos de funcionamiento hidráulico las velocidades de circulación del agua en las tuberías son muy bajas y en algunos tramos son inferiores a 0,5 m/s lo que puede crear problemas de sedimentación. Lo recomendable es que se cambien algunas tuberías del sistema por tuberías con diámetros más pequeños para evitar velocidades muy bajas. El cuarto indicador (I4) es el que está directamente relacionado con las fugas. Indica la cantidad de energía que se pierde por fugas junto con la energía que se pierde por fricción debido a estas fugas. Como se puede ver se pierde un 8%, valor que representa un porcentaje bajo, mostrando claramente que las fugas en éste caso no son un problema. El indicador I5 refleja la cantidad de energía en exceso que se entrega a los usuarios en función de la energía mínima útil, es decir, hasta qué punto la presión en los nudos de la red está cerca de la mínima requerida exigida en el sistema. Como se mencionó anteriormente, cuanto más cerca el resultado esté de la unidad, más próximos a la presión mínima estarán los valores de presión de la red.

Con estos resultados, se puede tener una idea del tipo de estrategia a llevar a cabo, qué puntos del sistema se debe tomar en consideración en la toma de decisiones y los márgenes de mejora para incrementar el rendimiento del sistema. Según se puede observar con los resultados de los indicadores propuestos por el IWA, al igual que con los resultados de los indicadores propuestos por otros autores (Cabrera et.al 2014), existe un margen significativo de mejora en la red.

Con respecto al reparto de agua y respectiva demanda energética, en la tabla 9 se presentan los volúmenes de agua entregados en cada turno. Los resultados demuestran que hay una distribución irregular entre los cuatro turnos, siendo el turno 2 el que presenta un mayor volumen demandado, por lo que es el que más energía consume.

Tabla 9: Volúmenes demandados en cada turno

Turnos	Volúmenes (m ³)	Energía mínima por turno (kWh/d)	Intensidad de energía (kWh/m ³)
Turno 01	4.776	377,95	0,0792182
Turno 02	5.208	415,17	0,0797165
Turno 03	4.997	385,39	0,0771294
Turno 04	3.685	291,10	0,0789959

Con respecto a los indicadores propuestos en el artículo “*Energy Assessment of Pressurized Water Systems, 2014*”, según se comentó anteriormente en el apartado referente al diagnóstico, de un primer estudio se ha obtenido un rendimiento igual a 0,70 para el sistema ideal, y para el real, 0,32. La diferencia entre estos dos valores, indica que existe un importante margen de mejora de la eficiencia energética del sistema, por lo que se debe calcular cuál es el margen de mejora. Este margen de mejora viene dado por medio del rendimiento objetivo.

Para obtener el valor correspondiente al rendimiento objetivo, se calculan las energías que se pierden en los grupos de bombeo, por fugas, por fricción y por otro tipo de pérdidas originadas, por ejemplo, por depósitos de compensación que puedan existir en el sistema. Para el cálculo de la energía asociada a las fugas, son necesarios los datos referentes a los nudos de menor y mayor cota, volumen fugado y presión mínima requerida. Aplicando la fórmula 13 se obtiene un valor de 85,67 kWh/d correspondiente a la energía asociada a las fugas.

$$E_{r,0} = \gamma \cdot \Delta V_0 \left[\frac{p_0}{\gamma} + \left(Z_h - \frac{Z_h + Z_l}{2} \right) \right] \quad (13)$$

La energía asociada a las pérdidas por fricción se calcula aplicando la fórmula 15. La distancia media entre la estación de bombeo y los nudos de consumo ($L_{pm}=2,2\text{km}$) se calcula por estimación recurriendo al modelo en EPANET. Las pérdidas de carga unitaria en las tuberías ($J_m=1,5\text{m/km}$) se calculan mediante los resultados proporcionados por el EPANET referentes a las pérdidas unitarias en cada hora de simulación. Las pérdidas locales originadas en la estación

de bombeo se calculan mediante la fórmula 14. El valor obtenido para la energía asociada a las pérdidas por fricción es 336,73 kWh/d.

$$h_m = \frac{8 \cdot k}{\pi^2 \cdot g \cdot D_{Ac}^4} \cdot Q^2 \quad (14)$$

$$E_{rf,0} = \gamma \cdot (V + \Delta V_0) \cdot \left[L_{pm} \cdot J_m + \frac{\Delta p_{rf,p}}{\gamma} \right] \quad (15)$$

En relación a la energía asociada a las pérdidas locales originadas en la estación de bombeo, esta se calcula por medio de la fórmula 16. El rendimiento considerado para las bombas es un 82%. Una vez que se tiene la red, la distancia entre la estación de bombeo y el nudo crítico se puede obtener a través de ésta. El valor a que se llega es 444,49 kWh/d.

$$E_{rp,0} = \gamma \cdot (V + \Delta V_0) \cdot h_{pr} \cdot \left(\frac{1}{\eta_{p0}} - 1 \right) \quad (16) \quad E_{ti} = 635,35 \text{ kWh/d}$$

La energía topográfica (635,35 kWh/d) y mínima requerida por los usuarios (1.532,53 kWh/d) se calculan mediante las formulas 2 y 3 (ver subcapítulo 3.2.2 Auditoría Energética). Para el cálculo de la energía topográfica se necesitan los volúmenes demandados en cada nudo, las cotas de cada nudo y la cota del nudo de mayor cota. La energía mínima requerida por los usuarios depende del volumen entregado a los usuarios, volúmenes demandados en cada nudo, cotas de los nudos y cota del nudo de menor cota. Con estos datos, se calcula la energía que se debe suministrar al sistema, teniendo en cuenta la posibilidad de llevar a cabo intervenciones en éste con la finalidad de mejorar el rendimiento actual. La energía aportada al sistema, reduciendo las pérdidas, viene dada por la fórmula 17, que es la suma de la energía mínima requerida por los usuarios, energía topográfica y energías asociadas a pérdidas por fricción, por fugas y pérdidas locales en las estaciones de bombeo. El valor obtenido para la energía que se ha de aportar al sistema, una vez mejorado su rendimiento, es 3.127 kWh/d contra 4.784 kWh/d que representa la energía total aportada en las actuales condiciones de funcionamiento.

Con este resultado se calcula la eficiencia objetivo que es igual a 0,50 y se calcula aplicando la fórmula 18. Como se puede verificar, la red inicial presenta una eficiencia igual a 0,32 y se puede llegar a un 0,50, valor que está más cerca de la eficiencia ideal. Respecto a la energía topográfica, se consigue una reducción del valor inicial que era 0,30 y pasa a 0,20 que es lo recomendable.

$$E_{sr,0} = E_{u0} + E_{ii} + E_{rl,0} + E_{rf,0} + E_{rp,0} + E_{r0,0} \quad (17)$$

$$\eta_{ar,0} = \frac{E_{u0}}{E_{sr,0}} \quad (18)$$

6. Acciones propuestas

De acuerdo con los resultados, en las actuales condiciones de funcionamiento, la red no es eficiente. Es importante, a la hora de proponer las medidas de ahorro y mejora de la eficiencia energética, prestar atención a los puntos críticos de consumo de energía en la red y que puede estar asociado a elevados volúmenes de agua fugados en el sistema, incorrecto diseño de la red y/o ineficiencias en el funcionamiento de los grupos de bombeo.

En el diseño de una red de distribución de agua a presión para riego, es importante definir sectores de riego de forma que cada uno de estos sectores suministre agua a un conjunto de hidrantes de presión homogénea, y en caso de redes muy extensas, además de la sectorización, se pueden crear sistemas de bombeo independientes. La red en análisis funciona desde el punto de vista hidráulico, sin embargo, no permite realizar la sectorización, siguiendo el criterio de cotas homogéneas, debido al incorrecto diseño desde el punto de vista energético. Más adelante, se desarrolla con más detalle la propuesta referente a la sectorización de la red.

Según lo anteriormente comentado, la red en general presenta elevados valores de presión, con mayor incidencia en la zona de cotas bajas, como es lógico y normal. La instalación de válvulas reductoras de presión es una de las soluciones para este tipo de situaciones pero, debe evitarse siempre que sea posible porque en algunos casos puede suponer un gasto de energía. Si la zona regable puede alimentarse por gravedad, es decir, si la toma está situada a una cota mayor que la cota más elevada de la red y no hay aporte de energía a la red o al embalse del sistema, la instalación de válvulas reductoras de presión no supondrá ningún gasto energético porque la energía aportada es natural. Sin embargo, si la cota del embalse o depósito es inferior que la cota más elevada de la zona regable, es necesario la instalación de grupos de bombeo para que las presiones en los nudos de mayor cota pueda alcanzar la presión requerida de servicio. En este caso, instalar válvulas reductoras de presión, supone un derroche de energía porque se tiene que aportar energía al sistema y a la vez, disipar dicha energía para que en los nudos de cota inferior no se lleguen a alcanzar presiones demasiado altas.

Otra medida que se puede adoptar para reducir las presiones en una red, es la instalación de variadores de velocidad en los grupos de bombeo. Al instalar un variador de velocidad se consigue que los caudales suministrados por las bombas se ajusten a la demanda del sistema en cada momento, por lo que las presiones también se ajustan en función de la demanda, haciendo con que las presiones en la red disminuyan.

De acuerdo con los resultados de la auditoría energética realizada, la energía que actualmente se suministra al sistema es superior a la necesaria. El sistema opera actualmente con las cinco bombas funcionando a la vez y, partiendo de un primer análisis, se observa o se detecta que el sistema es capaz de satisfacer la demanda operando únicamente con cuatro bombas, sin embargo, las presiones siguen elevadas en la red.

Según lo que se comentó anteriormente, el sistema no presenta ningún dispositivo que permita controlar o regular el funcionamiento de los equipos de bombeo, es decir, las cinco bombas instaladas son de velocidad fija, por lo que no se pueden ajustar los caudales que se inyectan en la red en función de las necesidades a lo largo de las distintas horas del día, suponiendo un mayor gasto energético y bajo rendimiento de la red.

Con respecto a las tarifas eléctricas, es muy importante estudiar la tarifa más ajustada a la potencia demandada y cuál es el consumo real del sistema, porque se pueden beneficiar de descuentos o tarifas más económicas y consumos en las horas valle en que el precio de la energía es más barato. La elección de la tarifa se debe realizar en función de las horas de utilización de las instalaciones a plena carga. En caso en que la distribución a la red de riego se realice por gravedad, se recomienda también que se ajuste el consumo energético a la discriminación horaria, es decir, conviene adaptar el consumo energético a los períodos del tipo de discriminación elegido, centrandolo en las horas valle y llano y evitando el consumo en horas punta. Si se trata de estaciones de bombeo que suministran directo a la red, se recomienda que el riego se realice por la noche porque coincide con las tarifas eléctricas más bajas.

Con relación a la distribución horaria de las tarifas de acceso de alta tensión, en el presente caso se ha aplicado la tarifa del Período 6 (Orden ITC/2794/2007) que es la más barata y en Agosto, esta tarifa se aplica a lo largo de todo el mes. El riego se realiza en un total de ocho horas repartidas en cuatro turnos de dos horas cada uno. La tarifa elegida se aplica entre las 24 horas hasta las 08 horas de la mañana. Se ha analizado y estudiado la posibilidad de aumentar las horas de riego a 12 horas, resultando en un total de 6 turnos de dos horas cada uno. Con esta medida se consigue una reducción de las pérdidas por fricción en las tuberías debido a que los caudales circulantes también disminuyen. Sin embargo, resulta que algunas horas de riego coinciden con los períodos cuyas tarifas son más caras. En este caso se puede realizar el riego alternando los días para evitar el riego en esos períodos de tarifas más caras y realizar el riego en las horas llano.

Continuando con el tema de las tarifas eléctricas, se estudió también la posibilidad de realizar el riego con dos tipos de turnos, o riego mixto, es decir, una parte del año el riego se repartiría en cuatro turnos y el resto del año en seis turnos. Esta medida permite ahorrar más, pero solo es aplicable en caso de aprobación por el gobierno ya que, según las leyes en vigor, el período de contratación es de un año.

En lo referente al reparto de agua por turnos, se recomienda que, después de la sectorización siguiendo el criterio de cotas homogéneas en la red, se reorganicen los turnos de riego de modo que los volúmenes demandados por cada turno sean iguales o similares.

A continuación, se presenta la descripción y análisis de las posibles soluciones para el caso de estudio.

6.1. Ajuste de la red global e instalación de variadores de velocidad

De un primer análisis se concluyó que el sistema era capaz de satisfacer la demanda funcionando solamente con cuatro de las cinco bombas instaladas. Sin embargo, las presiones siguen elevadas en la red, por lo que hay que ajustarlas en función de la presión mínima requerida de servicio exigida en la misma. Tal y como ya se ha señalado, los volúmenes demandados en cada turno de

riego son diferentes y lo recomendable es que estos se repartan uniformemente o sean próximos entre sí.

El ajuste de los volúmenes demandados por turno, se realizó mediante reorganización de cada uno de los distintos turnos de riego y por lo tanto, de los patrones de consumo de algunos de los hidrantes de ese turno. Al reorganizar los turnos de riego, se consigue que el funcionamiento de las bombas sea más homogéneo, así como una mejora de los rendimientos y volúmenes demandados, que ahora pasarán a ser similares entre los distintos turnos.

Tabla 10: Volúmenes demandados en cada turno (Red ajustada)

Turnos	Volúmenes (m3)	Emin por turno (kWh/d)	Intensidad de energía(kWh/m3)
Turno 01	4.666	377,64	0,080934
Turno 02	4.666	377,99	0,081009
Turno 03	4.666	370,78	0,079464
Turno 04	4.669	376,02	0,080535

Anteriormente ya se explicó que el sistema no presenta ningún dispositivo que permita controlar o regular el funcionamiento de los equipos de bombeo, es decir, las cinco bombas instaladas son de velocidad fija, lo que imposibilita que se ajusten las presiones que se transmiten a la red en función de las distintas necesidades según la hora del día, lo que supone un mayor gasto energético (mayor al requerido) y un bajo rendimiento de la red. Para zanjar el problema, se propone la instalación de variadores de velocidad de modo que el sistema de bombeo funcione con dos bombas de velocidad fija y dos bombas de velocidad variable, permitiendo un mejor ajuste de las presiones suministradas a la red y consiguiendo una reducción de las mismas. El ajuste de las velocidades de giro de las bombas, se realizó para cada turno y teniendo en cuenta que la presión mínima necesaria en el nudo crítico en cada uno de los turnos debe ser mayor o igual a 20 mca. Con la instalación de los variadores de velocidad y el posterior ajuste de las velocidades de giro de las bombas se consigue una reducción en las presiones, presentándose los nuevos valores en la tabla 12. La instalación de variadores de velocidad, además de permitir ajustar las presiones suministradas a la red en función de las requeridas, también consigue una

reducción de la potencia absorbida por las bombas una vez estas se encuentren reguladas. La potencia media y máxima absorbida por las bombas para el escenario en análisis (ajuste de la red global) es inferior a la potencia media y máxima absorbida por las bombas del escenario de la red inicial ya que, en el caso actual, se propone que dos de las bombas funcionen mediante instalación de variadores de velocidad. Para las bombas de velocidad fija, las potencias media y máxima absorbidas son 76,82 y 77,27 kW respectivamente, y para las bombas de velocidad variable, las potencias media y máxima absorbidas son 55,25 y 56,91 kW respectivamente.

Al reducir las presiones, se reducen también las fugas en la red. Según se expuso anteriormente, en el caso de estudio las fugas no representan un problema ya que en términos porcentuales representan solo un 7% del consumo energético.

Tabla 11: Comparación entre las presiones registradas en la red inicial y en la red ajustada

	Hora	0.00	01.00	02.00	03.00	04.00	05.00	06.00	07.00	08.00
Red Inicial	Presión									
	Mínima	37,74	37,74	34,27	34,27	36,65	36,65	45,19	45,19	37,74
	Presión									
	Máxima	59,83	59,83	56,61	56,61	57,75	57,75	68,24	68,24	59,83
Red Ajustada	Presión									
	Mínima	20,45	20,45	20,59	20,59	20,06	20,06	20,66	20,66	20,45
	Presión									
	Máxima	43,64	43,64	42,74	42,74	41,93	41,93	42,02	42,02	43,64

Si nos encontráramos en la fase de diseño de la red, se podría estudiar la posibilidad de instalar pequeños grupos de bombeo que funcionasen en paralelo, lo que permitiría un mejor ajuste de los caudales y de las presiones suministradas en función de la demanda requerida en cada momento, obteniéndose así una estación de bombeo cuyo funcionamiento sería más eficiente, comparado con una estación de bombeo con bombas de mayor capacidad y sin dispositivos de control y regulación de caudales y presiones.

Con respecto a la auditoría energética, los resultados obtenidos para la solución propuesta se presentan en las siguientes dos tablas, comparándose con los valores obtenidos para la red inicial y para la red ajustada.

Tabla 12: Comparación entre los resultados de la auditoría energética de las redes inicial y ajustada

Redes	Energía entrante (kWh/d)		Energía de salida (kWh/d)		Energía disipada (kWh/d)
	E _N	E _P	E _U	E _L	E _F
Red inicial	1.817 (38%)	2.967 (62%)	4.218 (88%)	338 (7%)	229 (5%)
Red ajustada	1.774 (49%)	1.829 (51%)	3.213 (89%)	179 (5%)	210 (6%)

Tabla 13: Comparación entre los resultados de los indicadores energéticos de las redes inicial y ajustada

Indicadores	C1	C2	I1	I2	I3	I4	I5
Red inicial	0,38	2,19	1,91	0,88	0,05	0,08	1,68
Red ajustada	0,49	2,19	1,44	0,89	0,06	0,06	1,29

De acuerdo con lo expuesto en las dos tablas anteriores, los resultados de las auditorías energéticas muestran una clara mejora y reducción de los consumos energéticos en la red. Inicialmente, gran parte de la energía que entraba al sistema provenía de los bombeos, aportando más energía de lo que realmente el sistema requería. Al reajustar los turnos de riego y con la instalación de variadores de velocidad, se consigue un mejor uso de la energía natural aportada por el embalse y que las bombas aporten menos energía que en la situación inicial, cumpliendo siempre el requisito de presión mínima igual a 20 mca en los nudos. Al lograr que las bombas trabajen menos, se consigue que los consumos energéticos del sistema disminuyan considerablemente.

En términos de cifras, la energía natural aportada al sistema anualmente es 663 MWh/año mientras que en la red ajustada este valor baja a 648 MWh/año. Con respecto a la energía aportada por las bombas, para la red inicial se obtiene un gasto anual energético igual a 1.083 MWh/año y en la red ajustada, igual a 668 MWh/año. Como se puede ver, con la medida propuesta se consigue una reducción del consumo energético generado por las bombas del 38%. Al ajustar la red, se consigue también una reducción de las energías que se pierden en fugas y por fricción. En términos de coste anual energético, la medida propuesta supone un gasto de 88.985,74 €, mientras que en la red inicial se tiene un gasto de 144.352,49 €.

Con respecto a los indicadores de gestión energéticos, donde mayor se aprecia una mejora es en los indicadores I1 e I5. El indicador I1 en la red ajustada, muestra la reducción con respecto a la energía en exceso que se inyecta al sistema, y el indicador I5, refleja que en la red ajustada se verifica también una reducción de la energía en exceso que se entrega a los usuarios. Esta reducción se debe a un mejor ajuste de las presiones en la red con respecto a la presión mínima establecida. Dado que las pérdidas por fricción y fugas en la red en análisis son bajas, la mejora energética en estos campos también es poco notable o baja.

6.2. Sectorización de la red e instalación de variadores de velocidad

En el diseño de una red de distribución es importante definir sectores de riego de forma que cada uno suministre agua a los hidrantes de presión homogénea. En el caso de redes muy extensas, además de la sectorización también se pueden crear sistemas de bombeo independientes. Esta medida se debe considerar en la etapa de diseño de la red de riego ya que en algunos casos, adoptar esta medida con la red construida puede resultar poco rentable. Estas medidas permiten minimizar los excesos de presión en la red. De esta forma, la energía suministrada en cada sector estará más adaptada a la energía requerida de acuerdo con la zona regable, siendo la eficiencia de suministro energético mayor. La red en análisis funciona desde el punto de vista hidráulico, sin embargo, no permite realizar la sectorización siguiendo el criterio de cotas homogéneas debido al incorrecto diseño desde el punto de vista energético. La sectorización se realizó siguiendo el trazado de la red y se dividió en tres sectores. En el escenario en análisis (sectorización de la

red), igual que en el escenario 1 (ajuste de la red global), se han reorganizado los turnos de riego de modo que se distribuyan uniformemente los volúmenes de riego y los consumos energéticos. Cabe señalar que en las actuales condiciones, la sectorización de la red implica la realización de obra civil para la instalación de tuberías que permitan la alimentación de cada sector de forma independiente.

Para el caso de que la red se encuentre en la etapa de diseño, se puede estudiar la posibilidad de instalar pequeños grupos de bombeo, lo que permite un mejor ajuste de los caudales y de las presiones suministradas en función de la demanda requerida en cada momento. También se obtiene un mejor rendimiento de la estación de bombeo y una reducción de la potencia absorbida de las bombas.

Para el sector 1 se propone el funcionamiento de una bomba y la instalación de un variador de velocidad que permita ajustarla en función de las necesidades de cada turno. Las presiones máxima y mínima registradas se presentan en la siguiente tabla 15, y los volúmenes demandados se presentan en la posterior tabla 16:

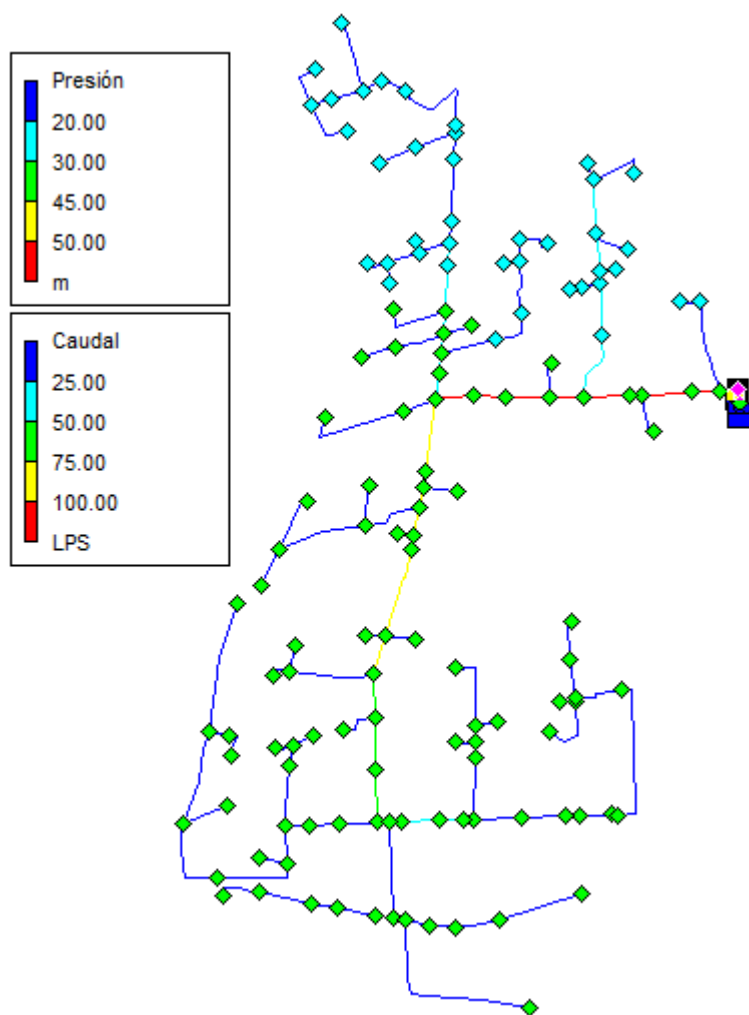


Figura 9. Simulación del sector 1 para la hora 00:00

Tabla 14: Presiones registradas en el sector 1 ajustado

Hora	0.00	01.00	02.00	03.00	04.00	05.00	06.00	07.00	08.00
Presión Mínima	21,23	21,23	20,85	20,85	20,99	20,99	20,46	20,46	21,23
Presión Máxima	41,79	41,79	40,19	40,19	38,35	38,35	37,85	37,85	41,79

Tabla 15: Volúmenes demandados en cada turno -Sector 1

Turnos	Volúmenes (m3)	Emin por turno (kWh/d)	Intensidad de energía(kWh/m3)
Turno 01	1.369	114,55	0,083674
Turno 02	1.369	106,82	0,078023
Turno 03	1.369	107,21	0,078313
Turno 04	1.372	112,52	0,082012

Para el sector 2 se propone que funcionen dos bombas y la instalación de un variador de velocidad para cada una de ellas. Con esta medida se logra el ajuste de caudales y presiones, obteniéndose los siguientes resultados:

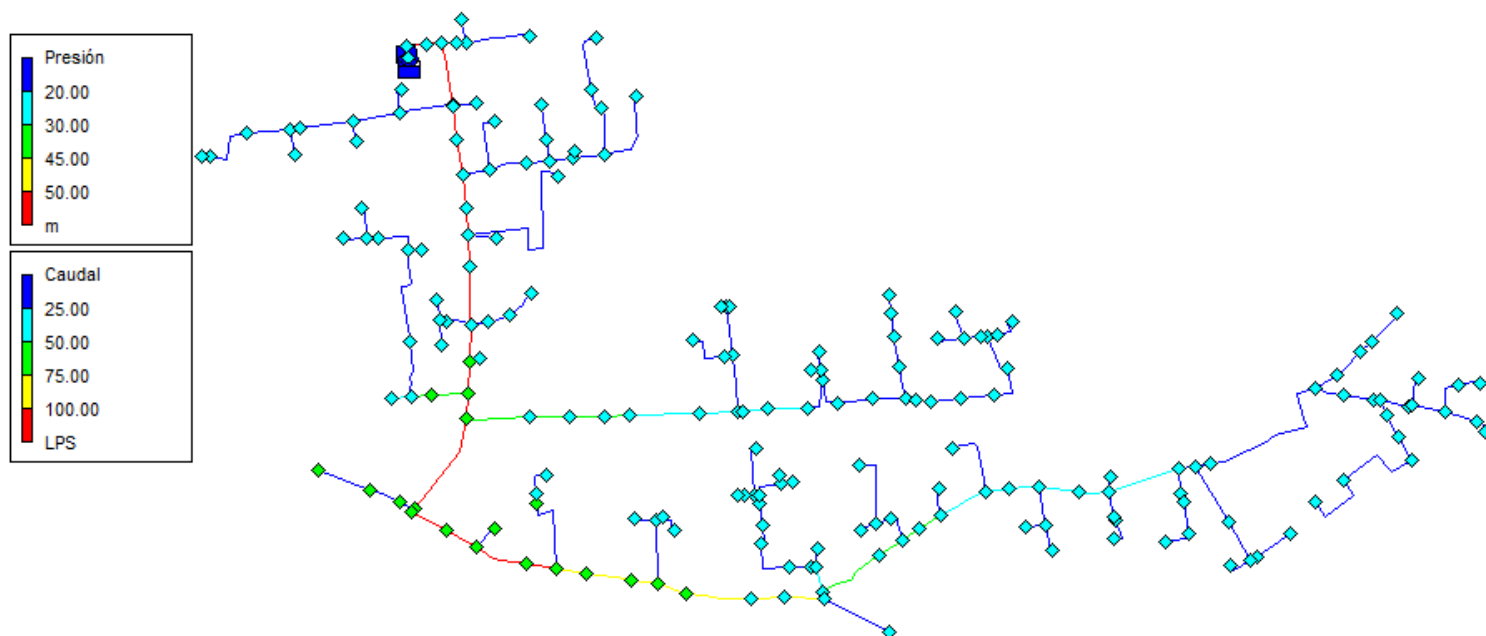


Figura 10. Simulación del sector 2 para la hora 00:00

Tabla 16: Presiones registradas-Sector 2

Hora	0.00	01.00	02.00	03.00	04.00	05.00	06.00	07.00	08.00
Presión Mínima	20,46	20,46	20,93	20,93	20,07	20,07	21,48	21,48	20,46
Presión Máxima	32,79	32,79	33,78	33,78	35,15	35,15	33,48	33,48	32,79

Tabla 17: Volúmenes demandados en cada turno -Sector 2

Turnos	Volúmenes (m ³)	Emin por turno (kWh/d)	Intensidad de energía(kWh/m ³)
Turno 01	1.970	157,82	0,08208
Turno 02	1.970	136,01	0,07079
Turno 03	1.969	136,66	0,07127
Turno 04	1.967	134,31	0,07026

Para el sector 2, se propone que funcionen dos bombas porque este sector presenta un mayor volumen demandado comparado con los otros dos sectores, sector 1 y 3. De esta forma se asegura cumplir con el suministro y necesidades de la red, debiéndose instalar también un variador de velocidad para cada bomba.

Con respecto al sector 3, el procedimiento fue el mismo que para los demás sectores proponiéndose que funcione con una bomba debidamente regulada. Con este ajuste, se obtienen los valores que se presentan a continuación:

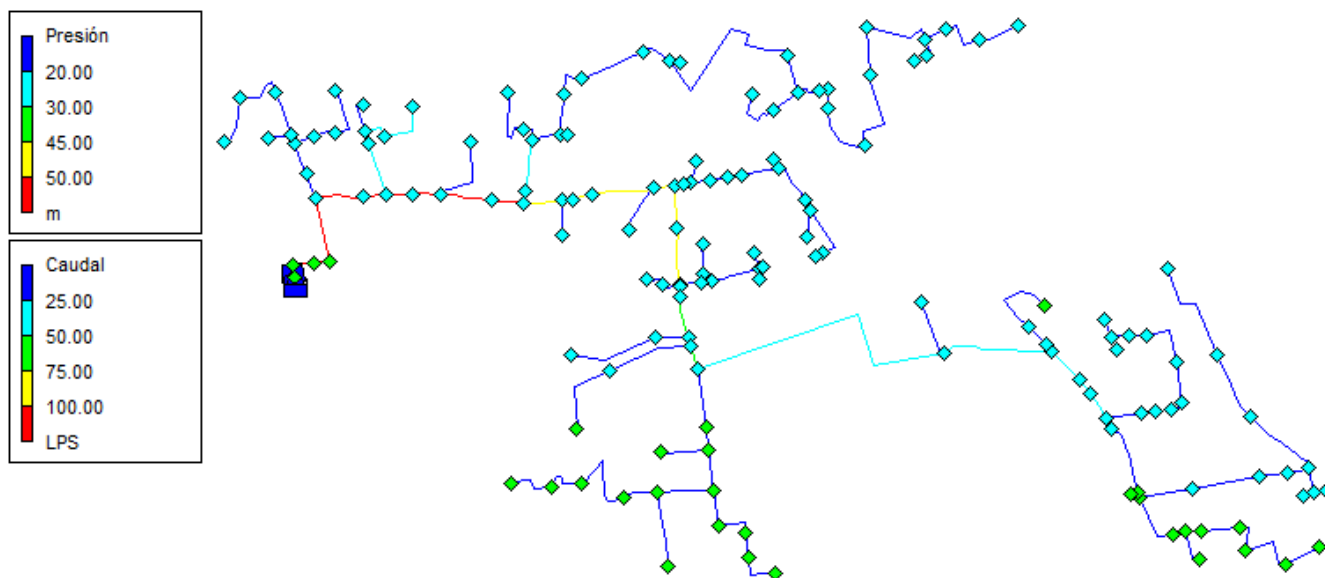


Figura 11. Simulación del sector 3 para la hora 00:00

Tabla 18: Presiones registradas-Sector 3

Hora	0.00	01.00	02.00	03.00	04.00	05.00	06.00	07.00	08.00
Presión Mínima	20,46	20,46	20,30	20,30	20,77	20,77	20,87	20,87	20,46
Presión Máxima	33,36	33,36	34,60	34,60	36,65	36,65	34,68	34,68	33,36

Tabla 19: Volúmenes demandados en cada turno -Sector 3

Turnos	Volúmenes (m ³)	Emin por turno (kWh/d)	Intensidad de energía(kWh/m ³)
Turno 01	1.262	97,60	0,07733
Turno 02	1.256	96,64	0,07694
Turno 03	1.257	98,52	0,07838
Turno 04	1.258	95,64	0,07603

Con respecto a las potencias absorbidas por las bombas en la red sectorizada, estas son inferiores comparadas con los valores que se obtienen en los anteriores escenarios. Para el sector 1, las potencias máxima y mínima son 67,98 y 70,89 kW, el sector 2 tiene 41,08 y 44,24 kW y por último, el sector 3 tiene como valores 76,82 y 77,27 kW. Al sectorizar la red se consigue ajustar mejor las presiones en la misma. Siempre que sea posible se recomienda la sectorización de las redes para permitir que el abastecimiento en cada sector se realice de forma homogénea, es decir, con presiones similares. Con la sectorización de la red, se consigue que los grupos de bombeo consuman solamente la energía demandada por el sector al cual se suministra y se consigue un uso más eficiente de la energía.

Tabla 20: Resultados del balance de energía de la red sectorizada

Redes	Energía entrante (kWh/d)		Energía de salida (kWh/d)		Energía disipada (kWh/d)
	E_N	E_P	E_U	E_L	E_F
Sector 1 ajustado	514 (52%)	480 (48%)	898 (90%)	48 (5%)	48 (5%)
Sector 2 ajustado	785 (52%)	724 (48%)	1422 (94%)	52 (3%)	35 (3%)
Sector 3 ajustado	483 (49%)	494 (51%)	876 (90%)	54 (5%)	47 (5%)

Al sectorizar el sistema, además de permitir un mejor ajuste de las presiones y caudales demandados por la red, se logra también una reducción en los consumos energéticos generados por los grupos de bombeo. En lo referente a las fugas, según se mencionó anteriormente, poco influyen ya que su valor representa un porcentaje bajo. El consumo energético generado por los grupos de bombeo en la red inicial y no sectorizada es 2.967 kWh/d (1.083 MWh/año), mientras que en la red sectorizada y ajustada, los grupos de bombeo tienen un consumo igual a 1.698 kWh/d (620 MWh/año). Estas cifras arrojan una reducción del consumo energético de 43%, es decir, 463 MWh/año que en términos de gastos supone un valor igual a 82.612,24 €.

Cabe señalar que para el caso en estudio, la sectorización de la red tiene como inconveniente la necesidad de realizar intervenciones, no solo a nivel operacional sino también a nivel estructural, para permitir que el riego en cada sector se realice de forma independiente.

En la tabla siguiente se presentan los resultados de los indicadores de gestión energéticos propuestos por el IWA analizados para cada sector. Igual que en la anterior propuesta, los indicadores muestran que se registra una mejora en la eficiencia energética del sistema al implementar las medidas.

Tabla 21: Resultados de los indicadores energéticos de la red sectorizada

Indicadores	I1	I2	I3	I4	I5
Sector 1 ajustado	1,37	0,91	0,05	0,05	1,24
Sector 2 ajustado	1,44	0,81	0,16	0,05	1,17
Sector 3 ajustado	1,30	0,90	0,05	0,06	1,16

7. Conclusiones y recomendaciones

En la presente tesis se ha mostrado una metodología que permite evaluar la eficiencia energética de los sistemas de distribución de agua a presión. Para la aplicación de la metodología se ha elegido un caso real de España y mediante la ejecución de algunas modificaciones, se ha realizado el estudio sobre este caso modificado.

El principal problema detectado en la red está relacionado con los elevados consumos energéticos que se registraban. Al analizar los resultados de la simulación de la red existente proporcionados por el programa de cálculo EPANET, se detectó que las presiones registradas en los nudos más desfavorables, es decir, los nudos situados a mayor cota, eran superiores a las presiones necesarias. Esto significa que se está entregando más energía de la necesaria al sistema o que se está entregando energía en exceso al sistema. Como ejemplo de esto, indicar que en el nudo más desfavorable la presión obtenida era de 34,27 mca mientras que solo era necesaria una presión de 20 mca.

Al mismo tiempo, también se verificó que el sistema no estaba dotado de ningún tipo de dispositivo de control y regulación de las presiones ni de los caudales inyectados en la red a lo largo del día.

El diseño de la red de distribución es un factor muy importante a la hora de suministrar agua en sistemas presurizados de forma eficiente desde el punto de vista energético. Uno de los factores determinantes para el diseño de la red es la topografía del terreno, ya que esta nos condiciona a la hora de decidir el trayecto de las tuberías. En función de la topografía, se recomienda, siempre que sea posible, analizar la probabilidad y necesidad de sectorización de la red, porque al sectorizar una red, se consigue que los grupos de bombeo consuman solamente la energía demandada por el sector al cual se suministra, se consigue un uso eficiente de la energía y que el abastecimiento en cada sector se realice de forma homogénea.

Para mejorar el rendimiento de la red, se han estudiado algunas medidas, entre ellas: la sectorización de la red por zonas de cota homogénea, reorganización del reparto del agua en turnos y la instalación de variadores de velocidad.

Para la sectorización de la red por zonas de cota homogénea y tras analizar la topografía de la red, se han identificado tres sectores de cotas diferentes y dentro de ellos, dos de cota homogénea y uno que, debido al diseño de la red, presenta una distribución de cotas menos homogénea.

Con respecto a falta de dispositivos de control y regulación de caudales, se ha propuesto la instalación de variadores de velocidad. Mediante la instalación de variadores de velocidad se puede reducir la potencia absorbida por la bomba en los períodos de menor demanda de caudal. Esta forma de regular el caudal es más eficiente que la regulación mediante el estrangulamiento de la válvula. Además de conseguir un ahorro energético, el uso de variadores produce otros beneficios como, por ejemplo, un menor desgaste de los elementos mecánicos. También se reducen otros efectos como ruidos y vibraciones, siempre y cuando el punto de funcionamiento se mantenga dentro de un determinado rango de operación.

No se ha instalado ninguna válvula reductora de presión en la red.

La elección de la tarifa eléctrica más ajustada también desempeña un papel fundamental a la hora de reducir los gastos energéticos en un sistema, por lo que es importante conocer el consumo real de la red y la potencia demandada.

Se insiste de nuevo en la poca incidencia de las fugas en los resultados obtenidos. Repetir que en este caso no suponen ningún problema y que solo representan el 7% del total del consumo energético de la red.

Inicialmente la red presentaba un consumo energético total igual a 4.784 kWh/día (1.746 MWh/año).

Respecto a las bombas, estas presentaban un consumo igual a 2.967 kWh/día (1.083 MWh/año). Mediante la reorganización del reparto del agua entre los turnos de riego, la instalación de dos

variadores de velocidad y la paralización de una de las bombas se consigue que el consumo originado por los grupos de bombeo descienda hasta 1.829 kWh/día (628 MWh/año) que representa una reducción anual de energía de 38%.

Con respecto a las presiones en la red se consigue también una reducción. Al inicio, las presiones máxima y mínima alcanzaban 68,24 mca y 34,27 mca y con las medidas propuestas los valores bajan hasta 43,64 mca y 20,06 mca, valor muy próximo al perseguido de 20 mca para el punto más desfavorable.

Las presiones máxima y mínima que se registran en cada sector son:

- Sector 1: 20,46 mca y 41,79 mca
- Sector 2: 20,07 mca y 33,78 mca
- Sector 3: 20,30 mca y 36,65 mca

Sectorizando la red, poniendo en funcionamiento cuatro bombas (una bomba en los sectores 1 y 3 y dos en el sector 2), instalando variadores de velocidad en cada sector y reorganizando el reparto de agua de los turnos de riego, se obtiene un consumo energético total de 3.479 kWh/día (1.270 MWh/año) frente a 4.784 kWh/día (1.746 MWh/año) que representa el consumo de la red en su estado inicial. En lo referente a los consumos generados por las bombas, adoptando las medidas propuestas se consigue una reducción, pasando de 2.967 kWh/día (1.083 MWh/año) que se tenía inicialmente, hasta 1.698 kWh/día (620 MWh/año) que se obtienen una vez aplicadas las distintas mejoras. Esto supone un ahorro energético en la red del 43%.

En relación con los costes asociados a cada una de las soluciones presentadas, para la primera propuesta la adquisición de dos variadores de velocidad en la red supone un inversión aproximada de 15.770,00 € (no incluye mano de obra) mientras que en la segunda propuesta, además de la instalación de cuatro variadores de velocidad, será necesario la realización de obra civil para permitir que el riego en cada sector se realice de forma independiente, teniendo un coste aproximado de 84.047,09 €.

Además de las medidas técnicas propuestas, el establecimiento de un protocolo de mantenimiento periódico de las instalaciones es muy importante. El personal de las comunidades de regantes debe estar capacitado para realizar actividades de mantenimiento periódicas de los elementos de distribución de la red y así mismo, deben ser capaces de detectar averías, roturas y anomalías en el funcionamiento de la misma. El mantenimiento de las instalaciones debe incluir actividades como:

- Revisión del funcionamiento de las válvulas instaladas en el sistema (válvulas de corte, reductoras de presión, retención, etc.).
- Revisión del sistema de limpieza en las estaciones de filtración y evitar la proliferación de algas en las captaciones (depósitos o balsas).
- Revisión del funcionamiento de los grupos de bombeo y consumo energético de los equipos.

La problemática abordada y la metodología seguida, aunque se ha concretado para un caso particular, es de carácter general y puede ser aplicada para redes de distribución de agua a presión urbana y de riego. Por ello confío en poder aplicarla en un futuro a casos reales en Mozambique.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

E_{ei} ; E_{er} - energía suministrada en exceso en sistema ideal y en un sistema real

E_{ti} ; E_{tr} - energía topográfica requerida en el caso ideal y real

$E_{tr,0}$ - energía topográfica requerida en el caso objetivo

E_{si} ; E_{sr} - energía total suministrada en un sistema ideal y en un sistema real

$E_{sr,0}$ - energía a suministrar al sistema (energía objetivo)

E_{rp} ; $E_{rp,0}$ - energía reducible en la estación de bombeo (caso ideal y objetivo)

E_{r0} ; $E_{r0,0}$ - otras energías reducibles (caso real y objetivo)

E_{rf} ; $E_{rf,0}$ - energía reducible por fricción (caso real y objetivo)

E_{U0} - energía mínima requerida por los usuarios (igual en el caso real e ideal)

E_{rg} ; $E_{rg,0}$ - energía global reducible (caso real y objetivo)

E_{ri} ; $E_{ri,0}$ - energía reducible asociada a las fugas (caso real y objetivo)

h_{pi} - altura de bombeo en el caso ideal

h_{pr} - altura de bombeo en el caso real

h_{ni} ; h_{nr} - altura natural aportada al sistema (caso ideal y real)

H_{cr} ; H_{hr} - altura piezométrica en el nudo crítico y en nudo de cota más elevada (caso real)

H_{jr} ; H_{lr} - altura piezométrica en el nudo j y en el nudo de menor cota (caso real)

H_{hi} - altura piezométrica en el nudo de cota más elevada

H_{ji} - altura piezométrica en el nudo j

H_{li} – altura piezométrica en el nudo de menor cota

H_{Ni} – altura piezométrica en el embalse

P_{ci} – presión en el nudo crítico (caso ideal)

P_{cr} – presión en el nudo crítico (caso real)

P_{ei} – exceso de presión del sistema (caso ideal)

P_{hi} – presión en el nudo de cota más elevada

P_{hr}, P_{jr}, P_{lr} – presión en el nudo de cota más elevada, nudo j y nudo de menor cota (caso real)

$P_{t,r}$ – presión topográfica en el nudo de cota más baja (caso real)

V – volumen total demandado al sistema

v_j – volumen demandado en el nudo j

Z_c, Z_h, Z_j, Z_l – cota del nudo crítico, cota del nudo de cota más elevada, cota del nudo j , cota del nudo de menor cota

Z_n – cota de succión

$\Delta V, \Delta V_0$ – volumen total fugado en la red real y volumen total fugado en el caso objetivo

η_{ai}, η_{ar} – rendimiento del sistema en el caso ideal y en el caso real

$\eta_{ar,0}$ – rendimiento del sistema en el caso objetivo

θ_{ti}, θ_{tr} – porcentaje de energía total topográfica (caso ideal y real)

θ_{ei}, θ_{er} – porcentaje de energía en exceso (caso ideal y real)

γ - peso específico del agua

BIBLIOGRAFIA

Alegre, H., Baptista, J.M., Cabrera Jr., E., Cubillo, F., Duarte, P., Hirner, W., Merkel, W. y Parena, R. (2006). *“Performance Indicators for Water supply Services”*. Second Edition manual of Best Practices.

Almandoz, J., Cabrera E., Arregui, F., Cabrera Jr. E. y Cobacho, R. (2005). *“Leakage Assessment through Water Distribution Network Simulation”*. Journal of Water resources Planning and Management.

Cabrera, E., Cabrera, Jr., Gómez, E., Soriano, J., Espert, V., (2014) *“Energy Assessment of Pressurized Water Systems”*. Journal of Water resources Planning and Management.

Cabrera, E., Cabrera, Jr., Cobacho, R., Soriano, J., (2014) *“Towards an energy labelling of pressurized water networks”*, 12ª Conferencia Internacional de Computación y Control para la Industria del Agua, CCWI2013

Cabrera, E., Cabrera, Jr., Cobacho, R., Pardo, M., (2010) *“Energy Audit of Water Networks”*. Journal of Water Resources Planning and Management, November/December, 2010/669.

Calandro, Tony (2011) *“The Energy-Water Nexus: An Emerging Risk”*- <http://voxglobal.com/2011/03/the-energy-water-nexus-an-emerging-risk/>

Fontana, N., Giugni, M., Portolano, D., (2012) *“Losses Reduction and Energy Production in Water-Distribution Networks”*. Journal of Water resources Planning and Management, May/June, 2012. 138:237-244

Hardy, L., Garrido, A., (2010) *“Análisis y Evaluación de las Relaciones entre el agua y la Energía en España”*.

Iglesias Rey, P., Martínez Solano, Fco., (2012) “*Análisis y Diseño de Redes de Distribución de Agua mediante el programa EPANET 2 vE*”. Valencia

Lión, G., Peñuelas, F., Sánchez Calvo, R., Sirgado, L., Sinobas, R., Villasante, A., (2008) “*Consumo de Energía con Bombas de Velocidad Variable*”.

Rocamora Osorio, M^a., Abardías Sánchez, R., Camara Zapata, J., Melián Navarro, M^a., Puerto Molina, H., Ruiz Canales, A., (2010) “*Manual de Auditorías Energéticas en Comunidades de Regantes*”.

López Vera, Fernando (2013), “*Agua y Energía, un binomio inseparable*”-
<http://www.iagua.es/blogs/fernando-lopez-vera/agua-y-energia-un-binomio-inseparable>

Martínez Alzamora, Fernand (2002), “*Análisis Hidráulico y de Calidad en Redes de Distribución de Agua-Manual del Usuario-Epanet 2.0 en Español*” (Grupo REDHISP. Inst. Ingeniería del Agua y M.A.-Universidad Politécnica de Valencia -España)

CEC (California Energy Commission), 2005 “*Californias’s Water-Energy Relationship Report*”
Report CEC-700-2005-011-SF, Noviembre 2005

IDEA (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía), (2005). “*Ahorro y Eficiencia Energética en Agricultura de Regadío*”. Madrid

IDEA (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía), (2008). “*Ahorro y Eficiencia Energética en las Comunidades de Regantes*”. Madrid

MAGRAMA (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente), 2015. “*Aumenta la superficie regada en España pero se mantiene una tendencia a la baja en el volumen de agua de riego utilizado en el sector agrario*” - <http://www.magrama.gob.es/es/prensa/noticias/aumenta-la-superficie-regada-en-esp%C3%B1a-pero-se-mantiene-una-tendencia-a-la-baja-en-el-volumen-de-agua-de-riego-utilizado-en-el-sector-agrario-/tcm7-367091-16>